

Universidad de **Cádiz**

Proyectos de fin de carrera de **Ingeniería Química**

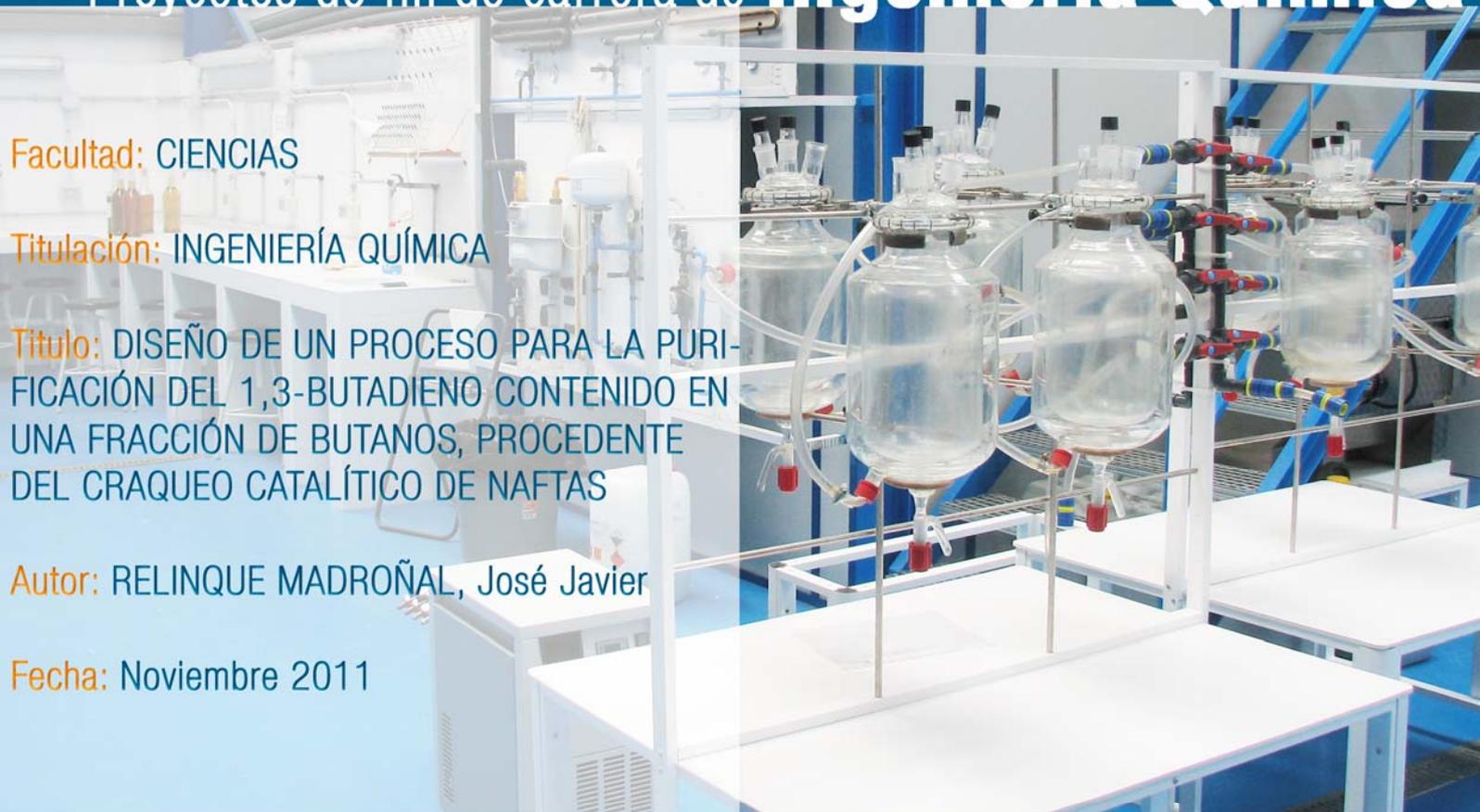
**Facultad:** CIENCIAS

**Titulación:** INGENIERÍA QUÍMICA

**Título:** DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA PURIFICACIÓN DEL 1,3-BUTADIENO CONTENIDO EN UNA FRACCIÓN DE BUTANOS, PROCEDENTE DEL CRAQUEO CATALÍTICO DE NAFTAS

**Autor:** RELINQUE MADROÑAL, José Javier

**Fecha:** Noviembre 2011





FACULTAD DE CIENCIAS

TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO



# DOCUMENTOS DEL PROYECTO

## • MEMORIA

- MEMORIA DESCRIPTIVA
- ANEXOS A LA MEMORIA
  - ANEXO DE GENERACIÓN DE DATOS TERMODINÁMICOS
    - ANEXO DE DISEÑO DE UNIDADES
    - ANEXO DE DISEÑO HIDRÁULICO DE UNIDADES
    - ANEXO DE DISEÑO MECÁNICO DE UNIDADES
    - ANEXO DE DISEÑO DE UNIDADES AUXILIARES

## • PLANOS

## • PLIEGO DE CONDICIONES

## • PRESUPUESTO



FACULTAD DE CIENCIAS

TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO



# *DOCUMENTOS DEL PROYECTO*

## *TOMO I*

### • **MEMORIA**

- **MEMORIA DESCRIPTIVA**
- **ANEXOS A LA MEMORIA**
  - **ANEXO DE GENERACIÓN DE DATOS TERMODINÁMICOS**
    - **ANEXO DE DISEÑO DE UNIDADES**



---

**TOMO I**

**MEMORIA DESCRIPTIVA (MD)**

Capítulo MD.C1. Introducción	P.11
MD.C1.1. Presentación de la edición	P.11
MD.C1.2. Introducción al proceso	P.16
MD.C1.2.1. La industria petroquímica	P.16
MD.C1.2.2. La producción de la fracción de butanos	P.21
MD.C1.2.3. El butadieno y algunos derivados	P.29
MD.C1.2.4. Vías de producción de butadieno comercial	P.36
MD.C1.2.5. El proceso seleccionado	P.43
MD.C1.2.6. Ubicación	P.50
MD.C1.2.7. Objeto	P.53
MD.C1.2.8. Justificación	P.56
Capítulo MD.C2. Descripción de las corrientes	P.59
MD.C2.1. Capacidad y funcionamiento de la planta	P.59
MD.C2.2. Descripción de las corrientes principales	P.61
MD.C2.2.1. Alimentación de butadieno crudo	P.62
MD.C2.2.2. Alimentación vaporizada	P.63
MD.C2.2.3. Líquido separado de la alimentación	P.64
MD.C2.2.4. Mezcla de la alimentación vaporizada y el extractante	P.65
MD.C2.2.5. Destilado de “EXTRACTIVA 1”	P.65
MD.C2.2.6. Residuo de “EXTRACTIVA 1”	P.66
MD.C2.2.7. Destilado de “EXTRACTIVA 2”	P.67
MD.C2.2.8. Residuo de “EXTRACTIVA 2”	P.67
MD.C2.2.9. Destilado de “MÚLTIPLE”	P.68

# Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

## Índice general

---

MD.C2.2.10. Residuo de “MÚLTIPLE”	P.68
MD.C2.2.11. Destilado de “BINARIA”	P.69
MD.C2.2.12. Residuo de “BINARIA”	P.69
MD.C2.2.13. Extractante recuperado	P.70
MD.C2.2.14. Vapor residual de “RECUPERACIÓN”	P.71
MD.C2.2.15. Extractante de make-up	P.71
MD.C2.2.16. Estrategia de recirculación	P.72
Capítulo MD.C3. Viabilidad del proyecto	P.75
MD.C3.1. Viabilidad técnica	P.75
MD.C3.2. Viabilidad económica	P.76
MD.C3.3. Viabilidad legal	P.77
MD.C3.3.1. Marco jurídico	P.78
MD.C3.3.2. Marco normativo	P.81
Capítulo MD.C4. Ubicación del proceso	P.83
MD.C4.1. Selección de la ubicación	P.83
MD.C4.2. Suministros a la planta	P.85
MD.C4.3. Consideraciones ambientales	P.85
Capítulo MD.C5. Ubicación en terreno	P.91
MD.C5.1. Generalidades	P.91
MD.C5.2. Disposición seleccionada	P.92
Capítulo MD.C6. Criterios de ingeniería	P.95
MD.C6.1. Criterios de diseño de recipientes a presión	P.95

---

MD.C6.1.1. Separadores gas-líquido	P.96
MD.C6.1.2. Torres de destilación	P.99
MD.C6.1.3. Acumuladores	P.103
MD.C6.2. Criterios de diseño de tanques	P.104
MD.C6.3. Criterios de diseño de cambiadores de calor	P.106
MD.C6.4. Criterios de selección de bombas	P.113
MD.C6.5. Criterios de selección de materiales	P.115
Capítulo MD.C7. Hojas de datos de equipos	P.117
MD.C7.1. Generalidades sobre recipientes a presión	P.117
MD.C7.1.1. Separadores gas-líquido	P.118
MD.C7.1.2. Torres de destilación	P.126
MD.C7.2. Hojas de datos de recipientes a presión	P.127
MD.C7.2.1. Separadores gas-líquido	P.127
MD.C7.2.2. Torres de destilación	P.129
MD.C7.2.3. Acumuladores	P.136
MD.C7.3. Generalidades sobre tanques	P.138
MD.C7.4. Hojas de datos de tanques	P.141
MD.C7.5. Generalidades sobre tuberías y bombas	P.144
MD.C7.6. Hojas de datos de tuberías y bombas	P.145
Capítulo MD.C8. Control de procesos	P.159
MD.C8.1. Sistemas de control	P.159
MD.C8.1.1. Nomenclatura de los instrumentos	P.160
MD.C8.1.2. Instrumentación	P.161
MD.C8.1.3. Medidores de temperatura	P.162

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

### Índice general

---

MD.C8.1.4. Medidores de presión	P.163
MD.C8.1.5. Medidores de caudal	P.163
MD.C8.1.6. Medidores de nivel	P.164
MD.C8.1.7. Elementos finales de control	P.164
MD.C8.2. Sistemas de control distribuido (SCD)	P.164
Capítulo MD.C9. Estudio de seguridad e higiene	P.169
MD.C9.1. Introducción	P.169
MD.C9.2. Objeto del estudio	P.170
MD.C9.3. Marco legal de la seguridad e higiene en el trabajo	P.170
MD.C9.4. Evaluación de riesgos en el presente proyecto	P.174
MD.C9.4.1. Riesgo químico	P.174
MD.C9.4.2. Riesgo de explosión e incendio	P.180
MD.C9.4.3. Riesgo físico	P.185
MD.C9.4.4. Riesgo eléctrico	P.195
MD.C9.4.5. Riesgo en la manipulación de máquinas y herramientas	P.199
MD.C9.4.6. Riesgo en el almacenamiento de sustancias químicas	P.199
MD.C9.5. Medidas preventivas	P.200
MD.C9.5.1. Medidas preventivas para riesgo químico	P.200
MD.C9.5.2. Medidas prev. para minimizar el riesgo de explosión e incendio	P.202
MD.C9.5.3. Medidas preventivas para minimizar riesgos físicos	P.203
MD.C9.5.4. Medidas preventivas para minimizar el riesgo eléctrico	P.204
MD.C9.5.5. Medidas preventivas para minimizar el riesgo en la manipulación de máquinas y herramientas	P.204

---

MD.C9.5.6. Medidas preventivas para minimizar el riesgo en el almacenamiento de sustancias químicas	P.205
Capítulo MD.C10. Evaluación de impacto ambiental	P.225
MD.C10.1. Introducción	P.225
MD.C10.1.1. Metodología en la elaboración del EsIA	P.225
MD.C10.2. Estudio del proyecto y su entorno	P.227
MD.C10.2.1. Definición de la planta	P.227
MD.C10.2.2. Localización	P.227
MD.C10.2.3. Descrp. de trabajos durante la construcción de la planta	P.228
MD.C10.2.4. Descripción de maquinaria que se empleará durante la construcción de la planta	P.228
MD.C10.2.5. Descripción de materias primas y productos	P.230
MD.C10.2.6. Descripción del proceso	P.230
MD.C10.2.7. Vertido de residuos	P.230
MD.C10.2.8. Usos del agua	P.230
MD.C10.2.9. Características de los residuos	P.230
MD.C10.2.10. Definición del entorno	P.231
MD.C10.2.11. Descripción general del entorno	P.231
MD.C10.3. Identificación de los efectos generados por el PFC sobre el medio	P.232
MD.C10.4. Comentario y establecimiento de medidas correctoras y prev.	P.236
MD.C10.4.1. Medidas para corregir la emisión de polvo	P.236
MD.C10.4.2. Medidas para corregir la erosión del suelo	P.236
MD.C10.4.3. Medidas para controlar los efluentes líquidos	P.236
MD.C10.4.4. Medidas para controlar los ruidos	P.237
MD.C10.4.5. Medidas para controlar incendios y explosiones	P.237

# Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

## Índice general

---

MD.C10.4.6. Medidas para preservar la fauna aviaria	P.238
MD.C10.5. Programa de vigilancia ambiental	P.238
MD.Bibliografía	P.240

## **ANEXOS**

### **ANEXO 1 (A1)**

Capítulo A1.C1. Fundamentación teórica del equilibrio	P.247
Capítulo A1.C2. Equilibrio de fases para "SIMPLE"	P.285
A1.C2.1. Introducción de la composición de la fase líquida	P.287
A1.C2.2. Introducción de la presión de equilibrio	P.289
A1.C2.3. Introducción de datos	P.290
A1.C2.3.1. Parámetros UNIFAC	P.291
A1.C2.3.2. Coeficientes de <i>Antoine</i>	P.292
A1.C2.3.3. Prop. críticas y temperaturas de ebullición normal	P.293
A1.C2.3.4. Otras propiedades	
A1.C2.3.5. Reglas de combinación de <i>Prausnitz</i>	P.294
A1.C2.4. Cálculos de temperatura (1)	P.295
A1.C2.5. Cálculo de presión de saturación (1)	P.296
A1.C2.6. Cálculo de los coeficientes de actividad	P.297
A1.C2.6.1 Cálculo de $r_i$	P.298
A1.C2.6.2. Cálculo de $q_j$	P.298
A1.C2.6.3. Cálculo de $e_{ki}$	P.299
A1.C2.6.4. Cálculo de $\tau_{mk}$	P.300
A1.C2.6.5. Cálculo de $\beta_{ik}$	P.301
A1.C2.6.6. Cálculo de $\theta_k$	P.302
A1.C2.6.7. Cálculo de $s_k$	P.303
A1.C2.6.8. Cálculo de $J_i$	P.303

---

A1.C2.6.9. Cálculo de $L_i$	P.305
A1.C2.6.10. Cálculo del coeficiente de actividad combinatorio	P.306
A1.C2.6.11. Cálculo del coeficiente de actividad residual	P.307
A1.C2.6.12. Cálculo del coeficiente de actividad	P.308
A1.C2.7. Cálculo de la presión de saturación (2)	P.309
A1.C2.8. Cálculos de temperatura (2)	P.312
A1.C2.9. Cálculo de la presión de saturación (3)	P.313
A1.C2.10. Cálculo de la composición de vapor	P.314
A1.C2.11. Cálculo de los $\Phi_i$	P.315
A1.C2.11.1. Cálculo de temp. reducidas puras y cruzadas	P.316
A1.C2.11.2. Cálculo de coeficientes viriales puros y cruzados	P.319
A1.C2.11.3. Cálculo de coeficientes delta puros y cruzados	P.323
A1.C2.11.4. Cálculo de volúmenes de líquido saturado	P.325
A1.C2.11.5. Cálculo de $\Phi_i$	P.326
A1.C2.12. Cálculo de la presión de saturación (4)	P.330
A1.C2.13. Cálculos de temperatura (3)	P.331
A1.C2.14. Comprobación de la convergencia	P.333
A1.C2.15. Datos de equilibrio	P.335
Capítulo A1.C3. Equilibrio de fases para “EXTRACTIVA 1”	P.337
A1.C3.1. Introducción de la composición de la fase líquida	P.337
A1.C3.2. Introducción de la presión de equilibrio	P.340
A1.C3.3. Introducción de datos	P.341
A1.C3.3.1. Parámetros UNIFAC	P.342
A1.C3.3.2. Coeficientes de <i>Antoine</i>	P.344
A1.C3.3.3. Propiedades críticas y temperaturas de ebullición normal	P.345

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

### Índice general

---

A1.C3.3.4. Otras propiedades	P.346
A1.C3.3.5. Reglas de combinación de Prausnitz	P.347
A1.C3.4. Cálculos de temperatura (1)	P.348
A1.C3.5. Cálculo de presión de saturación (1)	P.350
A1.C3.6. Cálculo de los coeficientes de actividad	P.351
A1.C3.6.1 Cálculo de $r_i$	P.351
A1.C3.6.2. Cálculo de $q_j$	P.352
A1.C3.6.3. Cálculo de $e_{ki}$	P.353
A1.C3.6.4. Cálculo de $\tau_{mk}$	P.354
A1.C3.6.5. Cálculo de $\beta_{ik}$	P.356
A1.C3.6.6. Cálculo de $\theta_k$	P.359
A1.C3.6.7. Cálculo de $s_k$	P.360
A1.C3.6.8. Cálculo de $J_i$	P.360
A1.C3.6.9. Cálculo de $L_i$	P.361
A1.C3.6.10. Cálculo del coeficiente de actividad combinatorio	P.362
A1.C3.6.11. Cálculo del coeficiente de actividad residual	P.363
A1.C3.6.12. Cálculo del coeficiente de actividad	P.364
A1.C3.7. Cálculo de la presión de saturación (2)	P.365
A1.C3.8. Cálculos de temperatura y coef. de actividad (2)	P.366
A1.C3.9. Cálculo de la presión de saturación (3)	P.368
A1.C3.10. Cálculo de la composición de vapor	P.368
A1.C3.11. Cálculo de los $\Phi_i$	P.369
A1.C3.11.1. Cálculo de temp. reducidas puras y cruzadas	P.370
A1.C3.11.2. Cálculo de coeficientes viriales puros y cruzados	P.371
A1.C3.11.3. Cálculo de coeficientes delta puros y cruzados	P.373
A1.C3.11.4. Cálculo de volúmenes de líquido saturado	P.375

---

A1.C3.11.5. Cálculo de $\Phi_i$	P.375
A1.C3.12. Cálculo de la presión de saturación (4)	P.376
A1.C3.13. Cálculos de temperatura y coef. de actividad (3)	P.377
A1.C3.14. Comprobación de la convergencia	P.379
A1.C3.15. Datos de equilibrio	P.380
Capítulo A1.C4. Equilibrio de fases para “EXTRACTIVA 2”	P.383
A1.C4.1. Introducción de la composición de la fase líquida	P.383
A1.C4.2. Introducción de la presión de equilibrio	P.385
A1.C4.3. Introducción de datos	P.386
A1.C4.3.1. Parámetros UNIFAC	P.387
A1.C4.3.2. Coeficientes de <i>Antoine</i>	P.388
A1.C4.3.3. Propiedades críticas y temperaturas de ebullición normal	P.389
A1.C4.3.4. Otras propiedades	P.390
A1.C4.3.5. Reglas de combinación de Prausnitz	P.391
A1.C4.4. Cálculos de temperatura (1)	P.391
A1.C4.5. Cálculo de presión de saturación (1)	P.393
A1.C4.6. Cálculo de los coeficientes de actividad	P.393
A1.C4.6.1 Cálculo de $r_i$	P.394
A1.C4.6.2. Cálculo de $q_j$	P.394
A1.C4.6.3. Cálculo de $e_{ki}$	P.395
A1.C4.6.4. Cálculo de $\tau_{mk}$	P.396
A1.C4.6.5. Cálculo de $\beta_{ik}$	P.397
A1.C4.6.6. Cálculo de $\theta_k$	P.400
A1.C4.6.7. Cálculo de $s_k$	P.401
A1.C4.6.8. Cálculo de $J_i$	P.401

# Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

## Índice general

---

A1.C4.6.9. Cálculo de $L_i$	P.402
A1.C4.6.10. Cálculo del coeficiente de actividad combinatorio	P.402
A1.C4.6.11. Cálculo del coeficiente de actividad residual	P.403
A1.C4.6.12. Cálculo del coeficiente de actividad	P.404
A1.C4.7. Cálculo de la presión de saturación (2)	P.405
A1.C4.8. Cálculos de temperatura y coef. de actividad (2)	P.406
A1.C4.9. Cálculo de la presión de saturación (3)	P.407
A1.C4.10. Cálculo de la composición de vapor	P.408
A1.C4.11. Cálculo de los $\Phi_i$	P.408
A1.C4.11.1. Cálculo de temp. reducidas puras y cruzadas	P.409
A1.C4.11.2. Cálculo de coeficientes viriales puros y cruzados	P.410
A1.C4.11.3. Cálculo de coeficientes delta puros y cruzados	P.411
A1.C4.11.4. Cálculo de volúmenes de líquido saturado	P.411
A1.C4.11.5. Cálculo de $\Phi_i$	P.412
A1.C4.12. Cálculo de la presión de saturación (4)	P.413
A1.C4.13. Cálculos de temperatura y coef. de actividad (3)	P.413
A1.C4.14. Comprobación de la convergencia	P.414
A1.C4.15. Datos de equilibrio	P.416
Capítulo A1.C5. Equilibrio de fases para "MÚLTIPLE"	P.417
A1.C5.1. Introducción de la composición de la fase líquida	P.417
A1.C5.2. Introducción de la presión de equilibrio	P.419
A1.C5.3. Introducción de datos	P.420
A1.C5.3.1. Parámetros UNIFAC	P.421
A1.C5.3.2. Coeficientes de <i>Antoine</i>	P.422
A1.C5.3.3. Propiedades críticas y temperaturas de ebullición normal	P.423

---

A1.C5.3.4. Otras propiedades	P.423
A1.C5.3.5. Reglas de combinación de Prausnitz	P.424
A1.C5.4. Cálculos de temperatura (1)	P.425
A1.C5.5. Cálculo de presión de saturación (1)	P.425
A1.C5.6. Cálculo de los coeficientes de actividad	P.426
A1.C5.6.1 Cálculo de $r_i$	P.426
A1.C5.6.2. Cálculo de $q_j$	P.427
A1.C5.6.3. Cálculo de $e_{ki}$	P.427
A1.C5.6.4. Cálculo de $\tau_{mk}$	P.428
A1.C5.6.5. Cálculo de $\beta_{ik}$	P.429
A1.C5.6.6. Cálculo de $\theta_k$	P.430
A1.C5.6.7. Cálculo de $s_k$	P.431
A1.C5.6.8. Cálculo de $J_i$	P.432
A1.C5.6.9. Cálculo de $L_i$	P.432
A1.C5.6.10. Cálculo del coeficiente de actividad combinatorio	P.433
A1.C5.6.11. Cálculo del coeficiente de actividad residual	P.433
A1.C5.6.12. Cálculo del coeficiente de actividad	P.434
A1.C5.7. Cálculo de la presión de saturación (2)	P.435
A1.C5.8. Cálculos de temperatura (2)	P.436
A1.C5.9. Cálculo de la presión de saturación (3)	P.437
A1.C5.10. Cálculo de la composición de vapor	P.437
A1.C5.11. Cálculo de los $\Phi_i$	P.438
A1.C5.11.1. Cálculo de temperaturas reducidas puras y cruzadas	P.438
A1.C5.11.2. Cálculo de coeficientes viriales puros y cruzados	P.439
A1.C5.11.3. Cálculo de coeficientes delta puros y cruzados	P.440
A1.C5.11.4. Cálculo de volúmenes de líquido saturado	P.440

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

### Índice general

---

A1.C5.11.5. Cálculo de $\Phi_i$	P.441
A1.C5.12. Cálculo de la presión de saturación (4)	P.441
A1.C5.13. Cálculos de temperatura (3)	P.442
A1.C5.14. Comprobación de la convergencia	P.443
A1.C5.15. Datos de equilibrio	P.444
Capítulo A1.C6. Equilibrio de fases para “BINARIA”	P.445
A1.C6.1. Introducción de la composición de la fase líquida	P.445
A1.C6.2. Introducción de la presión de equilibrio	P.447
A1.C6.3. Introducción de datos	P.448
A1.C6.3.1. Parámetros UNIFAC	P.449
A1.C6.3.2. Coeficientes de <i>Antoine</i>	P.450
A1.C6.3.3. Propiedades críticas y temperaturas de ebullición normal	P.450
A1.C6.3.4. Otras propiedades	P.451
A1.C6.3.5. Reglas de combinación de Prausnitz	P.451
A1.C6.4. Cálculos de temperatura (1)	P.452
A1.C6.5. Cálculo de presión de saturación (1)	P.453
A1.C6.6. Cálculo de los coeficientes de actividad	P.454
A1.C6.6.1 Cálculo de $r_i$	P.454
A1.C6.6.2. Cálculo de $q_j$	P.455
A1.C6.6.3. Cálculo de $e_{ki}$	P.455
A1.C6.6.4. Cálculo de $\tau_{mk}$	P.456
A1.C6.6.5. Cálculo de $\beta_{ik}$	P.457
A1.C6.6.6. Cálculo de $\theta_k$	P.458
A1.C6.6.7. Cálculo de $s_k$	P.459

---

A1.C6.6.8. Cálculo de $J_i$	P.459
A1.C6.6.9. Cálculo de $L_i$	P.460
A1.C6.6.10. Cálculo del coeficiente de actividad combinatorio	P.461
A1.C6.6.11. Cálculo del coeficiente de actividad residual	P.461
A1.C6.6.12. Cálculo del coeficiente de actividad	P.462
A1.C6.7. Cálculo de la presión de saturación (2)	P.463
A1.C6.8. Cálculos de temperatura (2)	P.464
A1.C6.9. Cálculo de la presión de saturación (3)	P.465
A1.C6.10. Cálculo de la composición de vapor	P.466
A1.C6.11. Cálculo de los $\Phi_i$	P.467
A1.C6.11.1. Cálculo de temp. reducidas puras y cruzadas	P.467
A1.C6.11.2. Cálculo de coeficientes viriales puros y cruzados	P.468
A1.C6.11.3. Cálculo de coeficientes delta puros y cruzados	P.469
A1.C6.11.4. Cálculo de volúmenes de líquido saturado	P.470
A1.C6.11.5. Cálculo de $\Phi_i$	P.470
A1.C6.12. Cálculo de la presión de saturación (4)	P.471
A1.C6.13. Cálculos de temperatura (3)	P.472
A1.C6.14. Comprobación de la convergencia	P.473
A1.C6.15. Datos de equilibrio	P.474
Capítulo A1.C7. Equilibrio de fases para “RECUPERACIÓN”	P.477
A1.C7.1. Introducción de la composición de la fase líquida	P.477
A1.C7.2. Introducción de la presión de equilibrio	P.479
A1.C7.3. Introducción de datos	P.480
A1.C7.3.1. Parámetros UNIFAC	P.480
A1.C7.3.2. Coeficientes de <i>Antoine</i>	P.482

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

### Índice general

---

A1.C7.3.3. Propiedades críticas y temperaturas de ebullición normal	P.483
A1.C7.3.4. Otras propiedades	P.483
A1.C7.3.5. Reglas de combinación de Prausnitz	P.484
A1.C7.4. Cálculos de temperatura (1)	P.485
A1.C7.5. Cálculo de presión de saturación (1)	P.486
A1.C7.6. Cálculo de los coeficientes de actividad	P.486
A1.C7.6.1 Cálculo de $r_i$	P.486
A1.C7.6.2. Cálculo de $q_j$	P.487
A1.C7.6.3. Cálculo de $e_{ki}$	P.488
A1.C7.6.4. Cálculo de $\tau_{mk}$	P.489
A1.C7.6.5. Cálculo de $\beta_{ik}$	P.490
A1.C7.6.6. Cálculo de $\theta_k$	P.492
A1.C7.6.7. Cálculo de $s_k$	P.493
A1.C7.6.8. Cálculo de $J_i$	P.493
A1.C7.6.9. Cálculo de $L_i$	P.494
A1.C7.6.10. Cálculo del coeficiente de actividad combinatorio	P.494
A1.C7.6.11. Cálculo del coeficiente de actividad residual	P.495
A1.C7.6.12. Cálculo del coeficiente de actividad	P.495
A1.C7.7. Cálculo de la presión de saturación (2)	P.495
A1.C7.8. Cálculos de temperatura y coef. de actividad (2)	P.496
A1.C7.9. Cálculo de la presión de saturación (3)	P.497
A1.C7.10. Cálculo de la composición de vapor	P.497
A1.C7.11. Cálculo de los $\phi_i$	P.498
A1.C7.11.1. Cálculo de temp reducidas puras y cruzadas	P.498
A1.C7.11.2. Cálculo de coeficientes viriales puros y cruzados	P.499

---

A1.C7.11.3. Cálculo de coeficientes delta puros y cruzados	P.500
A1.C7.11.4. Cálculo de volúmenes de líquido saturado	P.500
A1.C7.11.5. Cálculo de $\Phi_i$	P.500
A1.C7.12. Cálculo de la presión de saturación (4)	P.501
A1.C7.13. Cálculos de temperatura y coef. de actividad (3)	P.501
A1.C7.14. Comprobación de la convergencia	P.502
A1.C7.15. Datos de equilibrio	P.503
<b>ANEXO 2 (A2)</b>	
Capítulo A2.C1. Diseño de "SIMPLE"	P.507
A2.C1.1. Introducción	P.507
A2.C1.2. Balance y diseño de "SIMPLE"	P.509
A2.C1.3. Diseño hidromecánico de "SIMPLE"	P.526
A2.C1.3.1. Dimensionado hidráulico de la unidad de separación	P.527
A2.C1.3.2. Diseño mecánico (I). Determinación de la presión de diseño	P.540
A2.C1.3.3. Diseño mecánico (II). Determinación de espesores para el casco y los cabezales sometidos a presión interna	P.542
A2.C1.3.4. Diseño mecánico (III). Determinación del espesor del aislamiento y de la chapa envolvente	P.550
A2.C1.3.5. Diseño mecánico (IV). Determinación del espesor requerido para soportar la carga por viento	P.556
A2.C1.3.6. Diseño mecánico (V). Determinación del peso del aparato en operación	P.563
A2.C1.3.7. Diseño mecánico (VI). Determinación del espesor del faldón	P.570
A2.C1.3.8. Diseño mecánico (VII). Determinación del espesor requerido para soportar la carga sísmica	P.572

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

### Índice general

---

A2.C1.3.9. Diseño mecánico (VIII). Diseño del anillo de la base	P.577
A2.C1.3.10. Diseño mecánico (IX). Cálculo de las tubuladuras y peso del extractor de neblina	P.583
A2.C1.3.11. Diseño mecánico (X). Iteración de cálculos	P.595
A2.C1.3.12. Diseño mecánico (XI). Comprobaciones	P.603
A2.C1.3.13. Cálculo de orejas de izado y pintado del casco y cabezales	P.607
Capítulo A2.C2. Resolución de “EXTRACTIVA 1”	P.629
A2.C2.1. Introducción	P.629
A2.C2.2. Resolución de columna	P.631
Capítulo A2.C3. Resolución de “EXTRACTIVA 2”	P.649
A2.C3.1. Introducción	P.649
A2.C3.2. Resolución de columna	P.652
Capítulo A2.C4. Resolución de “MÚLTIPLE”	P.665
A2.C4.1. Introducción	P.665
A2.C4.2. Resolución de columna	P.668
Capítulo A2.C5. Resolución de “BINARIA”	P.681
A2.C5.1. Introducción	P.681
A2.C5.2. Resolución de columna	P.684
Capítulo A2.C6. Diseño de “RECUPERACIÓN”	P.701
A2.C6.1. Balance y diseño de “RECUPERACIÓN”	P.701
A2.C6.2. Diseño hidromecánico de “RECUPERACIÓN”	P.706

---

A2.C6.2.1. Dimensionado hidráulico de la unidad de separación	P.707
A2.C6.2.2. Diseño mecánico (I). Determinación de la presión de diseño	P.712
A2.C6.2.3. Diseño mecánico (II). Determinación de espesores para el casco y los cabezales sometidos a presión interna	P.713
A2.C6.2.4. Diseño mecánico (III). Determinación del espesor del aislamiento y de la chapa envolvente	P.714
A2.C6.2.5. Diseño mecánico (IV). Determinación del peso del aparato en operación	P.715
A2.C6.2.6. Diseño mecánico (V). Diseño del soporte	P.716
A2.C6.2.7. Diseño mecánico (VI). Cálculo de las tubuladuras y refuerzos	P.717
A2.C6.2.8. Cálculo de orejas de izado y pintado del casco y cabezales	P.722
Capítulo A2.C7. Estrategia de recirculaciones	P.729

**TOMO II**

**ANEXO 3 (A3)**

Capítulo A3.C1. Diseño hidráulico de "EXTRACTIVA 1"	P.735
A3.C1.1. Datos previos	P.735
A3.C1.2. Determinación de propiedades físicas	P.739
A3.C1.2.1. Densidad de la fase líquida	P.739
A3.C1.2.2. Viscosidad de la fase líquida	P.740
A3.C1.2.3. Densidad de la fase vapor	P.743
A3.C1.2.4. Viscosidad de la fase vapor	P.747
A3.C1.2.5. Tensión superficial de corrientes	P.751

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

### Índice general

---

A3.C1.2.6. Difusividad del clave ligero en fase líquida	P.753
A3.C1.3. Diseño hidráulico	P.754
A3.C1.3.1. Recopilación y conversión de datos y propiedades	P.757
A3.C1.3.2. Determinación gráfica del nº de pasos por columna	P.759
A3.C1.3.3. Estimación de dimensiones previas	P.762
A3.C1.3.4. Fijación de los límites de operación	P.765
A3.C1.3.5. Cálculo reiterado de áreas de columna y otras dimensiones	P.767
A3.C1.3.6. Verificaciones de las magnitudes calculadas con los límites de operación	P.776
A3.C1.3.7. Estimación de las pérdidas de carga	P.784
A3.C1.4. Decisiones finales de diseño hidráulico	P.795
A3.C1.4.1. Determinación de eficacia por zonas	P.795
A3.C1.4.2. Decisión final de columna	P.802
A3.C1.4.3. Evaluación de alternativas	P.808
Capítulo A3.C2. Diseño hidráulico de “EXTRACTIVA 2”	P.821
A3.C2.1. Datos previos	P.821
A3.C2.2. Determinación de propiedades físicas	P.824
A3.C2.2.1. Densidad de la fase líquida	P.824
A3.C2.2.2. Viscosidad de la fase líquida	P.826
A3.C2.2.3. Densidad de la fase vapor	P.828
A3.C2.2.4. Viscosidad de la fase vapor	P.831
A3.C2.2.5. Tensión superficial de corrientes	P.834

---

A3.C2.2.6. Difusividad del clave ligero en fase líquida	P.836
A3.C2.3. Diseño hidráulico	P.837
A3.C2.3.1. Recopilación y conversión de datos y propiedades	P.839
A3.C2.3.2. Determinación gráfica del nº de pasos por columna	P.841
A3.C2.3.3. Estimación de dimensiones previas	P.842
A3.C2.3.4. Fijación de los límites de operación	P.844
A3.C2.3.5. Cálculo reiterado de áreas de columna y otras dimensiones	P.845
A3.C2.3.6. Verificaciones de las magnitudes calculadas con los límites de operación	P.849
A3.C2.3.7. Estimación de las pérdidas de carga	P.851
A3.C2.4. Decisiones finales de diseño hidráulico	P.855
A3.C2.4.1. Determinación de eficacia por zonas	P.855
A3.C2.4.2. Evaluación de alternativas	P.858
A3.C2.4.3. Decisión final de columna	P.870
Capítulo A3.C3. Diseño hidráulico de "MÚLTIPLE"	P.875
A3.C3.1. Datos previos	P.821
A3.C3.2. Determinación de propiedades físicas	P.878
A3.C3.2.1. Densidad de la fase líquida	P.878
A3.C3.2.2. Viscosidad de la fase líquida	P.880
A3.C3.2.3. Densidad de la fase vapor	P.881
A3.C3.2.4. Viscosidad de la fase vapor	P.884
A3.C3.2.5. Tensión superficial de corrientes	P.887

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

### Índice general

---

A3.C3.2.6. Difusividad del clave ligero en fase líquida	P.889
A3.C3.3. Diseño hidráulico	P.890
A3.C3.3.1. Recopilación y conversión de datos y propiedades	P.892
A3.C3.3.2. Determinación gráfica del nº de pasos por columna	P.894
A3.C3.3.3. Estimación de dimensiones previas	P.895
A3.C3.3.4. Fijación de los límites de operación	P.897
A3.C3.3.5. Cálculo reiterado de áreas de columna y otras dimensiones	P.898
A3.C3.3.6. Verificaciones de las magnitudes calculadas con los límites de operación	P.902
A3.C3.3.7. Estimación de las pérdidas de carga	P.904
A3.C3.4. Decisiones finales de diseño hidráulico	P.908
A3.C3.4.1. Determinación de eficacia por zonas	P.908
A3.C3.4.2. Evaluación de alternativas	P.912
A3.C3.4.3. Decisión final de columna	P.923
Capítulo A3.C4. Diseño hidráulico de "MÚLTIPLE"	P.929
A3.C4.1. Datos previos	P.929
A3.C4.2. Determinación de propiedades físicas	P.933
A3.C4.2.1. Densidad de la fase líquida	P.933
A3.C4.2.2. Viscosidad de la fase líquida	P.934
A3.C4.2.3. Densidad de la fase vapor	P.936
A3.C4.2.4. Viscosidad de la fase vapor	P.939
A3.C4.2.5. Tensión superficial de corrientes	P.942

---

A3.C4.2.6. Difusividad del clave ligero en fase líquida	P.943
A3.C4.3. Diseño hidráulico	P.944
A3.C4.3.1. Recopilación y conversión de datos y propiedades	P.946
A3.C4.3.2. Determinación gráfica del nº de pasos por columna	P.948
A3.C4.3.3. Estimación de dimensiones previas	P.949
A3.C4.3.4. Fijación de los límites de operación	P.951
A3.C4.3.5. Cálculo reiterado de áreas de columna y otras dimensiones	P.952
A3.C4.3.6. Verificaciones de las magnitudes calculadas con los límites de operación	P.956
A3.C4.3.7. Estimación de las pérdidas de carga	P.958
A3.C4.4. Decisiones finales de diseño hidráulico	P.962
A3.C4.4.1. Determinación de eficacia por zonas	P.962
A3.C4.4.2. Decisión final de columna	P.966
<b>ANEXO 4 (A4)</b>	
Capítulo A4.C1. Diseño mecánico de “EXTRACTIVA 1”	P.973
A4.C1.1. Introducción	P.973
A4.C1.2. Diseño mecánico de “EXTRACTIVA 1”	P.974
A4.C1.2.1. Diseño mecánico (I). Determinación de la presión de diseño	P.974
A4.C1.2.2. Diseño mecánico (II). Determinación de espesores para el casco, los cabezales y el cono reductor sometidos a presión interna	P.978
A4.C1.2.3. Diseño mecánico (III). Determinación del espesor del aislamiento y de la chapa envolvente	P.987
A4.C1.2.4. Diseño mecánico (IV). Determinación del espesor requerido para soportar la carga por viento	P.993

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

### Índice general

---

A4.C1.2.5. Diseño mecánico (V). Determinación del peso de los aparatos en operación	P.999
A4.C1.2.6. Diseño mecánico (VI). Determinación del espesor del faldón	P.1008
A4.C1.2.7. Diseño mecánico (VII). Determinación del espesor requerido para soportar la carga sísmica	P.1009
A4.C1.2.8. Diseño mecánico (VIII). Diseño del anillo de la base	P.1011
A4.C1.2.9. Diseño mecánico (IX). Cálculo de las tubuladuras y refuerzos	P.1015
A4.C1.2.10. Diseño mecánico (X). Iteración de cálculos	P.1027
A4.C1.2.11. Diseño mecánico (XI). Comprobaciones	P.1028
A4.C1.2.12. Cálculo de orejas de izado y pintado del casco y cabezales	P.1031
Capítulo A4.C2. Diseño mecánico de unidades principales	P.1039
A4.C2.1. Introducción	P.1039
A4.C2.2. Diseño mecánico de “EXTRACTIVA 2”	P.1040
A4.C2.2.1. Diseño mecánico (I). Determinación de la presión de diseño	P.1041
A4.C2.2.2. Diseño mecánico (II). Determinación de espesores para el casco y los cabezales	P.1042
A4.C2.2.3. Diseño mecánico (III). Determinación del espesor del aislamiento y de la chapa envolvente	P.1043
A4.C2.2.4. Diseño mecánico (IV). Determinación del espesor final requerido para soportar la carga por viento	P.1044
A4.C2.2.5. Diseño mecánico (V). Determinación del espesor final requerido para soportar la carga sísmica	P.1045
A4.C2.2.6. Diseño mecánico (VI). Determinación del peso final del aparato en operación	P.1045
A4.C2.2.7. Diseño mecánico (VII). Diseño final del anillo de la base	P.1046

---

A4.C2.2.8. Diseño mecánico (VIII). Cálculo de las tubuladuras y refuerzos	P.1047
A4.C2.2.9. Diseño mecánico (IX). Comprobaciones	P.1055
A4.C2.2.10. Cálculo de orejas de izado y pintado del casco y cabezales	P.1057
A4.C2.3. Diseño mecánico de “MÚLTIPLE”	P.1060
A4.C2.3.1. Diseño mecánico (I). Determinación de la presión de diseño	P.1061
A4.C2.3.2. Diseño mecánico (II). Determinación de espesores para el casco y los cabezales	P.1062
A4.C2.3.3. Diseño mecánico (III). Determinación del espesor del aislamiento y de la chapa envolvente	P.1063
A4.C2.3.4. Diseño mecánico (IV). Determinación del espesor final requerido para soportar la carga por viento	P.1064
A4.C2.3.5. Diseño mecánico (V). Determinación del espesor final requerido para soportar la carga sísmica	P.1065
A4.C2.3.6. Diseño mecánico (VI). Determinación del peso final del aparato en operación	P.1065
A4.C2.3.7. Diseño mecánico (VII). Diseño final del anillo de la base	P.1066
A4.C2.3.8. Diseño mecánico (VIII). Cálculo de las tubuladuras y refuerzos	P.1067
A4.C2.3.9. Diseño mecánico (IX). Comprobaciones	P.1074
A4.C2.3.10. Cálculo de orejas de izado y pintado del casco y cabezales	P.1076
A4.C2.4. Diseño mecánico de “BINARIA”	P.1079
A4.C2.4.1. Diseño mecánico (I). Determinación de la presión de diseño	P.1080
A4.C2.4.2. Diseño mecánico (II). Determinación de espesores para el casco y los cabezales	P.1081

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

### Índice general

---

A4.C2.4.3. Diseño mecánico (III). Determinación del espesor del aislamiento y de la chapa envolvente	P.1082
A4.C2.4.4. Diseño mecánico (IV). Determinación del espesor final requerido para soportar la carga por viento	P.1083
A4.C2.4.5. Diseño mecánico (V). Determinación del espesor final requerido para soportar la carga sísmica	P.1084
A4.C2.4.6. Diseño mecánico (VI). Determinación del peso final del aparato en operación	P.1084
A4.C2.4.7. Diseño mecánico (VII). Diseño final del anillo de la base	P.1085
A4.C2.4.8. Diseño mecánico (VIII). Cálculo de las tubuladuras y refuerzos	P.1086
A4.C2.4.9. Diseño mecánico (IX). Comprobaciones	P.1094
A4.C2.4.10. Cálculo de orejas de izado y pintado del casco y cabezales	P.1096
<b>ANEXO 5 (A5)</b>	
Capítulo A5.C1. Red de tuberías y bombeo	P.1103
A5.C1.1. Planteamiento general	P.1103
A5.C1.2. Descripción teórica	P.1104
A5.C1.2.1. Longitud de las conducciones	P.1104
A5.C1.2.2. Pérdida de carga por fricción	P.1106
A5.C1.2.3. Carga de altura	P.1108
A5.C1.2.4. Carga de presión	P.1109
A5.C1.2.5. Pérdida total de carga	P.1109
A5.C1.2.6. Potencia de bombeo estimada	P.1110
A5.C1.3. Tablas de resultados	P.1112

---

Capítulo A5.C2. Diseño de acumuladores de reflujo	P.1131
A5.C2.1. Introducción	P.1131
A5.C2.2. Dimensionado hidráulico	P.1131
A5.C2.3. Diseño mecánico	P.1135
A5.C2.3.1. Diseño mecánico (I). Determinación de la presión de diseño	P.1135
A5.C2.3.2. Diseño mecánico (II). Determinación de espesores para el casco y los cabezales sometidos a presión interna	P.1136
A5.C2.3.3. Diseño mecánico (III). Determinación del espesor del aislamiento y de la chapa envolvente	P.1136
A5.C2.3.4. Diseño mecánico (IV). Determinación del peso del aparato en operación	P.1137
A5.C2.3.5. Diseño mecánico (V). Diseño del soporte	P.1137
A5.C2.3.6. Diseño mecánico (VI). Cálculo de las tubuladuras y refuerzos	P.1139
A5.C6.3.7. Cálculo de orejas de izado y pintado del casco y cabezales	P.1140
Capítulo A5.C3. Estimación de cambiadores de calor	P.1143
A5.C3.1. Introducción	P.1143
A5.C3.2. Fundamento teórico	P.1143
A5.C3.2.1. Cálculo de calderines	P.1144
A5.C3.2.2. Cálculo de condensadores	P.1147
A5.C3.2.3. Cálculo de calentadores y refrigerantes	P.1149
A5.C3.3. Calores y áreas de intercambio	P.1150
Capítulo A5.C4. Dimensionado de tanques	P.1153
A5.C4.1. Diseño de los tanques cilíndricos	P.1153

# Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

## Índice general

---

A5.C4.2. Diseño del tanque esférico P.1160

### **PLANOS**

P1 Ubicación del proceso

P2 Distribución en terreno

P3 Diagrama de flujo del proceso

P4 Alzado de los recipientes de "SIMPLE"

P5 Planta de los recipientes de "SIMPLE"

P6 Alzado de los recipientes de "EXTRACTIVA 1"

P7 Alzado de los recipientes de "EXTRACTIVA 2"

P8 Alzado de los recipientes de "MÚLTIPLE"

P9 Alzado de los recipientes de "BINARIA"

P10 Recipiente de "RECUPERACIÓN"

P11 Acumuladores de proceso

P12 Tanques de proceso

P13 Esfera de almacenamiento

### **PLIEGO DE CONDICIONES**

PC.C1. Generalidades P.1169

PC.C1.1. Objeto P.1169

PC.C1.2. Documentos que definen las obras P.1169

PC.C1.3. Obras accesorias no especificadas en el proyecto P.1170

PC.C1.4. Contradicciones, omisiones o errores P.1170

PC.C2. Condiciones generales de índole facultativa P.1171

PC.C2.1. Obligaciones y derechos del contratista P.1171

PC.C2.2. Trabajo, materiales y medios auxiliares P.1173

# Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Índice general

---

PC.C2.2.1. Libro de órdenes	P.1173
PC.C2.2.2. Comienzo de los trabajos y plazo de ejecución	P.1173
PC.C2.2.3. Condiciones generales de ejecución de los trabajos	P.1173
PC.C2.2.4. Personal técnico	P.1174
PC.C2.2.5. Trabajos nocturnos	P.1175
PC.C2.2.6. Accidentes de trabajo	P.1175
PC.C2.2.7. Trabajos defectuosos	P.1176
PC.C2.2.8. Equipos de maquinaria	P.1176
PC.C2.2.9. Materiales no utilizables o defectuosos	P.1176
PC.C2.2.10. Medios auxiliares	P.1177
PC.C2.2.11. Precauciones especiales	P.1177
PC.C2.2.12. Señalización de las obras	P.1178
PC.C2.3. Recepción y liquidación	P.1178
PC.C2.3.1. Recepción provisional de las obras	P.1178
PC.C2.3.2. Período de garantías	P.1179
PC.C2.3.3. Recepción definitiva	P.1180
PC.C2.3.4. Documentación final de la obra	P.1181
PC.C2.4. Facultades de la dirección de obra	P.1181
PC.C3. Condiciones generales de índole económica	P.1182
PC.C3.1. Percepción económica del contratista	P.1182
PC.C3.2. Precios unitarios	P.1182
PC.C3.4. Fijación de precios unitarios no contratados	P.1183

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

### Índice general

---

PC.C3.5. Variaciones en los precios unitarios	P.1184
PC.C3.6. Obras complementarias. Cambios de materiales	P.1184
PC.C3.7. Valoración y abono de los trabajos	P.1185
PC.C3.7.1. Forma de abono de las obras	P.1185
PC.C3.7.2. Abono de unidades de obra ejecutadas	P.1185
PC.C3.7.3. Relaciones valoradas y certificaciones	P.1185
PC.C3.7.4. Liquidaciones parciales	P.1185
PC.C3.7.5. Documentación final de la obra	P.1185
PC.C3.7.6. Pagos	P.1186
PC.C3.7.7. Suspensión o retraso en el ritmo de los trabajos	P.1186
PC.C4. Condiciones generales de índole legal	P.1186
PC.C4.1. El contrato	P.1187
PC.C4.2. Arbitraje obligatorio	P.1187
PC.C4.3. Jurisdicción competente	P.1187
PC.C4.4. Responsabilidad del contratista	P.1188
PC.C4.5. Causas de rescisión del contrato	P.1188
PC.C5. Condiciones generales técnicas de los materiales y equipos	P.1190
PC.C5.1. Referencias y normativas	P.1190
PC.C5.2. Condiciones para los materiales	P.1192
PC.C5.2.1. Condiciones generales para los materiales	P.1192
PC.C5.2.2. Acopios	P.1193
PC.C5.2.3. Condiciones para las tuberías	P.1194

---

PC.C5.2.4. Condiciones para las bridas	P.1195
PC.C5.2.5. Condiciones para los accesorios soldables	P.1195
PC.C5.2.6. Cond. de las placas de fabricación de los equipos	P.1195
PC.C5.3. Condiciones para los equipos	P.1196
PC.C5.3.1. Cond. para los cambiadores de calor y tanques	P.1196
PC.C5.3.2. Cond. para las bombas	P.1196
PC.C5.3.4. Condiciones para los equipos reutilizados	P.1197
PC.C5.4. Condiciones para los equipos	P.1197
PC.C5.4.1. Condiciones sobre pintura y preparación de superficies	P.1197
PC.C5.4.2. Condiciones para los aislamientos	P.1198
PC.C6. Condiciones generales de los equipos a presión	P.1198
PC.C6.1. Definiciones generales	P.1198
PC.C6.1.1. Aparatos sometidos a presión	P.1199
PC.C6.1.2. Tuberías	P.1199
PC.C6.1.3. Sistemas	P.1199
PC.C6.1.4. Diseño mecánico	P.1199
PC.C6.1.5. Ingeniería	P.1199
PC.C6.1.6. Fabricante	P.1200
PC.C6.1.7. Reparador	P.1200
PC.C6.1.8. Instalador	P.1200
PC.C6.1.9. Usuario	P.1201

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

### Índice general

---

PC.C6.1.10. Inspecciones y pruebas periódicas	P.1201
PC.C6.1.11. Inspector propio	P.1201
PC.C6.1.12. Inspecciones y pruebas previas	P.1201
PC.C6.1.13. Control de calidad	P.1201
PC.C6.2. Definiciones de ámbito técnico	P.1201
PC.C6.2.1. Presión de diseño ( $P_d$ )	P.1201
PC.C6.2.2. Presión máxima de servicio ( $P_{ms}$ )	P.1202
PC.C6.2.3. Presión de precinto	P.1202
PC.C6.2.4. Presión de servicio ( $P_s$ )	P.1202
PC.C6.2.5. Presión de prueba ( $P_p$ )	P.1202
PC.C6.2.6. Temperatura máxima de servicio ( $T_s$ )	P.1202
PC.C6.2.7. Temperatura de servicio ( $T_s$ )	P.1202
PC.C6.3. Condiciones generales para todos los aparatos	P.1203
PC.C6.3.1. Manual de diseño	P.1203
PC.C6.3.2. Certificados	P.1204
PC.C6.3.3. Proceso de fabricación	P.1204
PC.C6.3.4. Legalización de aparatos a presión	P.1204
PC.C6.3.5. Instalación	P.1205
PC.C6.3.6. Inspecciones y pruebas	P.1206
PC.C6.3.7. Placas	P.1209
PC.C6.3.8. Elementos de seguridad	P.1209
PC.C6.4. Prueba para las tuberías	P.1210

# Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Índice general

---

PC.C6.5. Prueba de los sistemas antes de la puesta en marcha	P.1210
PC.C6.5.1. Prueba hidrostática	P.1210
PC.C6.5.2. Lavado del equipo	P.1211
PC.C6.5.3. Comprobación de servicios auxiliares	P.1212
PC.C7. Ejecución de las obras	P.1213
PC.C7.1. Ejecución en general	P.1213
PC.C7.2. Replanteo	P.1213
PC.C7.3. Comprobación del replanteo	P.1213
PC.C7.4. Fijación de los puntos de replanteo	P.1214
PC.C7.5. Programación de los trabajos	P.1214
PC.C7.6. Ensayos	P.1215
PC.C7.7. Orden de los trabajos	P.1216
PC.C7.8. Ejecución en general	P.1216
	<b><u>PRESUPUESTO</u></b>
Capítulo C.C1. Introducción	P.1219
Capítulo C.C2. Estado de mediciones y presupuestos	P.1220
C.C2.1. Cálculo de precio de recipientes a presión	P.1221
C.C2.2. Cálculo de precio de tanques	P.1225
C.C2.3. Cálculo del precio de cambiadores de calor	P.1226
C.C2.4. Cálculo del precio de bombas	P.1228
C.C2.5. Presupuesto de ejecución material	P.1230
C.C2.6. Presupuesto de ejecución por contrata	P.1231

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

### Índice general

---

Capítulo C.C3. Estudio de costes e ingresos P.1231

Capítulo C.C4. Presupuesto general P.1236

# Documento 1. Memoria

---

## Memoria descriptiva

- 1. Introducción**
- 2. Descripción de las corrientes**
- 3. Viabilidad del proyecto**
- 4. Ubicación del proceso**
- 5. Ubicación en terreno**
- 6. Criterios de ingeniería**
- 7. Hojas de datos de equipos**
- 8. Control de procesos**
- 9. Estudio de seguridad e higiene**
- 10. Evaluación de impacto ambiental**





**UCA**

Universidad  
de Cádiz

Facultad de Ciencias  
Decanato

Enología  
Ingeniería Química  
Matemáticas  
Química  
www.uca.es/ciencias  
Campus de Puerto Real



Anexo II (Anverso)

**SOLICITUD DE ASIGNACIÓN DE PROYECTO FIN DE CARRERA**

D. José Javier Relinque Madroñal, con DNI 76089387-M y residencia en C.P.: 11010 C/ Goya nº 4 - 4º C Cádiz (Cádiz) Tfno: 956076722 / 647032039, e-mail josejavier.relinquema@alum.uca.es alumno del Título de Ingeniero Químico de la Universidad de Cádiz,

EXPONE: que cumple los requisitos necesarios para que se le asigne el Proyecto Fin de Carrera.

SOLICITA: Se le asigne el trabajo correspondiente al PFC de tipo específico cuyos detalles adjunta.

Puerto Real, 13 de octubre de AD 2010

Fdo.: José Javier Relinque Madroñal

Fecha 15-10-2010 N.º 1615  
Dpto. de Ingeniería Química  
y Tecnología de Alimentos

Anexo II (Reverso)

**PROPUESTA DE PROYECTO FIN DE CARRERA**

**DEPARTAMENTO:** INGENIERÍA QUÍMICA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

**TÍTULO:** DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA PURIFICACIÓN DEL 1,3-BUTADIENO CONTENIDO EN UNA FRACCIÓN DE BUTANOS, PROCEDENTE DEL CRAQUEO TÉRMICO DE NAFTAS

**TUTOR(ES):** ANDRÉS MOLERO GÓMEZ

**DESCRIPCIÓN (Breve información sobre el objetivo del PFC)**

Las fracciones de hidrocarburos C<sub>4</sub> de refinería se componen fundamentalmente por mezclas de 1,3-butadieno, isobuteno, 1-buteno, n-butano, isobutano y cis-2-buteno. Las cantidades y composiciones dependen del alimento y el tipo de craqueo. Los componentes más interesantes, con miras a su posterior aprovechamiento, son los tres primeros; centrándose el objetivo del presente Proyecto Fin de Carrera en la separación del 1,3-butadieno.

Este compuesto encuentra su principal aplicación en la síntesis de cauchos sintéticos: Butadieno-Estireno (extensamente aplicado en la producción de neumáticos) y Butadieno-Acrilonitrilo. De la misma forma, es asimismo precursor de otras sustancias de interés industrial como el ácido adípico o la hexametildiamina.

**REQUISITOS (Capacidad, producción, energía, normativa, legislación....)**

El objetivo del presente Proyecto Fin de Carrera estriba en obtener una producción anual del componente de interés, el 1,3-butadieno, de 200 kt con una pureza mínima del 99,9%. El PFC prevé además del diseño del tren de separación, los equipamientos para el transporte de fluidos (bombeo y red de tuberías) y su almacenamiento (depósitos), así como los equipos precisos para el intercambio de calor.

Se contemplará la observancia de las siguientes normativas:

- ASME Sección VIII División I y II.
- Reglamento Español de Recipientes a Presión, Capítulo IV.
- Normas ANSI, ASTM y UNE; para el diseño de las tuberías, válvulas y accesorios, respectivamente.

Puerto Real, 13 de octubre de AD2010

  
VºBº del Director del Departamento  
Fdo.:  
Fecha 15-10-2010 N.º 1615  
Dpto. de Ingeniería Química  
y Tecnología de Alimentos

  
VºBº del Tutor  
Fdo.: Andrés Molero Gómez

  
EL DECANO,  
VºBº del Decano  
Fdo.: Manuel García Basallote



---

**MEMORIA DESCRIPTIVA (MD)**

Capítulo MD.C1. Introducción	P.11
MD.C1.1. Presentación de la edición	P.11
MD.C1.2. Introducción al proceso	P.16
MD.C1.2.1. La industria petroquímica	P.16
MD.C1.2.2. La producción de la fracción de butanos	P.21
MD.C1.2.3. El butadieno y algunos derivados	P.29
MD.C1.2.4. Vías de producción de butadieno comercial	P.36
MD.C1.2.5. El proceso seleccionado	P.43
MD.C1.2.6. Ubicación	P.50
MD.C1.2.7. Objeto	P.53
MD.C1.2.8. Justificación	P.56
Capítulo MD.C2. Descripción de las corrientes	P.59
MD.C2.1. Capacidad y funcionamiento de la planta	P.59
MD.C2.2. Descripción de las corrientes principales	P.61
MD.C2.2.1. Alimentación de butadieno crudo	P.62
MD.C2.2.2. Alimentación vaporizada	P.63
MD.C2.2.3. Líquido separado de la alimentación	P.64
MD.C2.2.4. Mezcla de la alimentación vaporizada y el extractante	P.65
MD.C2.2.5. Destilado de "EXTRACTIVA 1"	P.65
MD.C2.2.6. Residuo de "EXTRACTIVA 1"	P.66
MD.C2.2.7. Destilado de "EXTRACTIVA 2"	P.67
MD.C2.2.8. Residuo de "EXTRACTIVA 2"	P.67
MD.C2.2.9. Destilado de "MÚLTIPLE"	P.68
MD.C2.2.10. Residuo de "MÚLTIPLE"	P.68

# Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

## Índice general

---

MD.C2.2.11. Destilado de “BINARIA”	P.69
MD.C2.2.12. Residuo de “BINARIA”	P.69
MD.C2.2.13. Extractante recuperado	P.70
MD.C2.2.14. Vapor residual de “RECUPERACIÓN”	P.71
MD.C2.2.15. Extractante de make-up	P.71
MD.C2.2.16. Estrategia de recirculación	P.72
Capítulo MD.C3. Viabilidad del proyecto	P.75
MD.C3.1. Viabilidad técnica	P.75
MD.C3.2. Viabilidad económica	P.76
MD.C3.3. Viabilidad legal	P.77
MD.C3.3.1. Marco jurídico	P.78
MD.C3.3.2. Marco normativo	P.81
Capítulo MD.C4. Ubicación del proceso	P.83
MD.C4.1. Selección de la ubicación	P.83
MD.C4.2. Suministros a la planta	P.85
MD.C4.3. Consideraciones ambientales	P.85
Capítulo MD.C5. Ubicación en terreno	P.91
MD.C5.1. Generalidades	P.91
MD.C5.2. Disposición seleccionada	P.92
Capítulo MD.C6. Criterios de ingeniería	P.95
MD.C6.1. Criterios de diseño de recipientes a presión	P.95
MD.C6.1.1. Separadores gas-líquido	P.96

---

MD.C6.1.2. Torres de destilación	P.99
MD.C6.1.3. Acumuladores	P.103
MD.C6.2. Criterios de diseño de tanques	P.104
MD.C6.3. Criterios de diseño de cambiadores de calor	P.106
MD.C6.4. Criterios de selección de bombas	P.113
MD.C6.5. Criterios de selección de materiales	P.115
Capítulo MD.C7. Hojas de datos de equipos	P.117
MD.C7.1. Generalidades sobre recipientes a presión	P.117
MD.C7.1.1. Separadores gas-líquido	P.118
MD.C7.1.2. Torres de destilación	P.126
MD.C7.2. Hojas de datos de recipientes a presión	P.127
MD.C7.2.1. Separadores gas-líquido	P.127
MD.C7.2.2. Torres de destilación	P.129
MD.C7.2.3. Acumuladores	P.136
MD.C7.3. Generalidades sobre tanques	P.138
MD.C7.4. Hojas de datos de tanques	P.141
MD.C7.5. Generalidades sobre tuberías y bombas	P.144
MD.C7.6. Hojas de datos de tuberías y bombas	P.145
Capítulo MD.C8. Control de procesos	P.159
MD.C8.1. Sistemas de control	P.159
MD.C8.1.1. Nomenclatura de los instrumentos	P.160
MD.C8.1.2. Instrumentación	P.161
MD.C8.1.3. Medidores de temperatura	P.162
MD.C8.1.4. Medidores de presión	P.163

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

### Índice general

---

MD.C8.1.5. Medidores de caudal	P.163
MD.C8.1.6. Medidores de nivel	P.164
MD.C8.1.7. Elementos finales de control	P.164
MD.C8.2. Sistemas de control distribuido (SCD)	P.164
Capítulo MD.C9. Estudio de seguridad e higiene	P.169
MD.C9.1. Introducción	P.169
MD.C9.2. Objeto del estudio	P.170
MD.C9.3. Marco legal de la seguridad e higiene en el trabajo	P.170
MD.C9.4. Evaluación de riesgos en el presente proyecto	P.174
MD.C9.4.1. Riesgo químico	P.174
MD.C9.4.2. Riesgo de explosión e incendio	P.180
MD.C9.4.3. Riesgo físico	P.185
MD.C9.4.4. Riesgo eléctrico	P.195
MD.C9.4.5. Riesgo en la manipulación de máquinas y herramientas	P.199
MD.C9.4.6. Riesgo en el almacenamiento de sustancias químicas	P.199
MD.C9.5. Medidas preventivas	P.200
MD.C9.5.1. Medidas preventivas para riesgo químico	P.200
MD.C9.5.2. Medidas prev. para minimizar el riesgo de explosión e incendio	P.202
MD.C9.5.3. Medidas preventivas para minimizar riesgos físicos	P.203
MD.C9.5.4. Medidas preventivas para minimizar el riesgo eléctrico	P.204
MD.C9.5.5. Medidas preventivas para minimizar el riesgo en la manipulación de máquinas y herramientas	P.204
MD.C9.5.6. Medidas preventivas para minimizar el riesgo	P.205

---

en el almacenamiento de sustancias químicas

Capítulo MD.C10. Evaluación de impacto ambiental	P.225
MD.C10.1. Introducción	P.225
MD.C10.1.1. Metodología en la elaboración del EsIA	P.225
MD.C10.2. Estudio del proyecto y su entorno	P.227
MD.C10.2.1. Definición de la planta	P.227
MD.C10.2.2. Localización	P.227
MD.C10.2.3. Descrp. de trabajos durante la construcción de la planta	P.228
MD.C10.2.4. Descripción de maquinaria que se empleará durante la construcción de la planta	P.228
MD.C10.2.5. Descripción de materias primas y productos	P.230
MD.C10.2.6. Descripción del proceso	P.230
MD.C10.2.7. Vertido de residuos	P.230
MD.C10.2.8. Usos del agua	P.230
MD.C10.2.9. Características de los residuos	P.230
MD.C10.2.10. Definición del entorno	P.231
MD.C10.2.11. Descripción general del entorno	P.231
MD.C10.3. Identificación de los efectos generados por el PFC sobre el medio	P.232
MD.C10.4. Comentario y establecimiento de medidas correctoras y prev.	P.236
MD.C10.4.1. Medidas para corregir la emisión de polvo	P.236
MD.C10.4.2. Medidas para corregir la erosión del suelo	P.236
MD.C10.4.3. Medidas para controlar los efluentes líquidos	P.236
MD.C10.4.4. Medidas para controlar los ruidos	P.237
MD.C10.4.5. Medidas para controlar incendios y explosiones	P.237
MD.C10.4.6. Medidas para preservar la fauna aviaria	P.238

# Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

## Índice general

---

MD.C10.5. Programa de vigilancia ambiental	P.238
MD.Bibliografía	P.240

---

## **Capítulo MD.C1. Introducción**

### **MD.C1.1. Presentación de la edición**

El Proyecto Fin de Carrera, (en adelante PFC), intitulado “Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas”, se efectúa como ejercicio académico conducente a la obtención del título de Ingeniero Químico por parte del alumno José Javier Relinque Madroñal, (en adelante el proyectista), quien, superadas en su totalidad la carga de asignaturas de la carrera universitaria correspondiente, opta mediante el presente PFC al objeto indicado.

Según norma UNE 157001-2002 de criterios para la elaboración de proyectos, la prelación de documentos de un proyecto, de forma general, es la siguiente:

1. Planos.
2. Pliego de condiciones.
3. Presupuesto.
4. Memoria descriptiva.

Los planos consisten en la concreción gráfica del objeto del proyecto, expresado y justificado en la memoria descriptiva. Deben ser suficientes en número para describir cada uno de los elementos del proyecto en su forma, dimensiones y características esenciales. Asimismo deberán ordenarse desde el plano más general al más particular de detalle.

El pliego de condiciones es el documento que especifica los requisitos técnicos, económicos, administrativos y legales que se establecen a fin de que el proyecto pueda materializarse en la práctica, fijándose como objetivo evitar las posibles ambigüedades interpretativas que pudieran derivarse de la lectura del proyecto.

El presupuesto determina el coste económico del proyecto, incluyendo la inversión inicial requerida por los equipos proyectados y

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Memoria descriptiva

---

cuantos elementos auxiliares conlleven los mismos, (red de tuberías, instrumentación, cuadros eléctricos, obra civil, mano de obra, etc.); así como la evaluación de costes de operación, beneficios, financiación y amortización del proyecto.

Por último, la memoria descriptiva\* recoge, con toda la concisión posible, tanto aspectos ligados a la justificación del proyecto, como todos aquéllos referentes a la descripción de capacidad de producción, las unidades de proceso, corrientes principales y auxiliares, etc. Se trata del documento de mayor extensión, vertebrador del proyecto, puesto que además de incluir los capítulos descriptivos correspondientes a lo mencionado, también proporciona los anexos de cálculo que justifican técnicamente las decisiones de diseño adoptadas.

Son éstos los documentos principales que se ordenarán, de acuerdo con la normativa de PFC de la Universidad de Cádiz, anteponiendo la memoria descriptiva y sus anexos, el primer documento, a los planos, pliego de condiciones y presupuestos, cada uno de estos tres constituyendo sendos documentos.

En esta primera sección del capítulo introductorio, se pretende dar cumplida explicación de la organización y estructura del PFC, como elemento facilitador de su lectura.

Como se ha podido observar, siguiendo a la primera página, se presenta el orden de los documentos del proyecto, de acuerdo con la normativa de PFC en su anexo I. Debido a la extensión de la documentación, será preciso dividir el contenido en dos tomos. En cada uno de los mismos se indicará convenientemente los documentos que contiene y, caso de continuar uno en curso del tomo anterior, se hará constar igualmente.

---

\* La definición de memoria descriptiva que se proporciona corresponde, genéricamente, con un proyecto de proceso químico industrial.

El primer tomo incluirá índice general del PFC así como parcial del tomo; el segundo tomo sólo incorpora la parte correspondiente del índice general. El objeto de redundar la información, (puesto que las páginas se numerarán correlativamente, salvo indicación expresa en contrario, desde la primera a la última desconsiderando documento o tomo), es facilitar la lectura en todo momento. En todo caso, las páginas de índice no computarán mediante la numeración normal, (se utilizará i, ii, iii, iv, etc.).

Cada documento irá precedido de una portada que incluirá un sumario de los capítulos que lo componen. Así, la memoria descriptiva y cada uno de los anexos se entenderán como documentos independientes que forman parte del primer documento del PFC. Se ha procurado la parte del índice general correspondiente a la memoria descriptiva y los anexos. Seguidamente al índice, como es prescriptivo según el artículo 26 de la normativa de PFC, se ha procurado copia de la propuesta de PFC, (anexo II reverso y anverso de la citada normativa), cursada el día 13 de octubre de AD 2010, recibida en el Departamento de Ingeniería Química y Tecnología de Alimentos el día 15 de octubre de AD 2010 y remitida aprobada al proyectista, con fecha de 11 de mayo de AD 2011, por la Secretaria de la Facultad de Ciencias y de la Comisión de PFC, a la sazón D<sup>a</sup> María de Valme García Moreno.

Los planos constituyen el segundo documento. Irán provistos de un índice en su portada y ninguno de los planos contará como página, continuando la numeración en la portada del siguiente documento.

Tal documento, el tercero, es el pliego de condiciones que también incluye la parte correspondiente del índice general. Finalmente, el presupuesto es el cuarto y último documento del PFC, provisto de índice en las mismas condiciones que los documentos descritos.

Las divisiones de cada documento, a excepción de los planos, son las siguientes: Capítulos, secciones y apartados.

Cada capítulo se identifica por dos grupos de caracteres, separados por puntos, y el título del mismo. El primer grupo indica el documento a que corresponde el capítulo y el segundo grupo, el número de capítulo. Así, “MD.C1. Introducción”, (el capítulo presente), indica que se trata del capítulo primero (C1), del documento memoria descriptiva (MD), cuya denominación corresponde a “Introducción”.

De similar forma, cada sección de capítulo se identifica por tres grupos de caracteres, separados por puntos, y el título del mismo. Los dos primeros grupos coinciden con los de la identificación de capítulo, mientras que el tercero indica el número de sección. Por ejemplo “MD.C1.1. Presentación de la edición”, (la sección actual), indica que se trata de la sección primera (1), del capítulo primero (C1), del documento memoria descriptiva (MD), cuya denominación es “Presentación de la edición”. Finalmente, los apartados añaden un cuarto grupo de caracteres indicando su posición dentro de la sección en que se encuadran.

Los documentos se notarán según:

- MD: Memoria descriptiva.
- Ax: Anexo x. (Sustitúyase la x por el número correspondiente).
- P: Planos.
- PC: Pliego de condiciones.
- C: Presupuesto.

Las páginas incluyen encabezado y pie de página donde, en el primero se recoge el título del PFC y el documento en curso, mientras que en el segundo, se reitera tal información junto con el número de página y el capítulo correspondiente, de modo que cualquier página informará rápidamente del contenido a que corresponde.

Los documentos incluyen información en forma tabular, figuras y ecuaciones. Estos elementos se numeran desde la unidad en cada documento. La notación de cada uno de ellos es unívoca:

- Tablas: Se notan indicando el documento en cuestión, (según las siglas anteriores) y el número de orden en cada uno de los mismos, en números romanos. Esta notación sucede a la palabra “Tabla” y siempre se sitúa bajo las mismas.
- Figuras: La notación sucede a la palabra “Figura” e incluye el documento a que pertenece, y el número de orden en números arábigos.
- Ecuaciones: Se presentan en dos formatos, uno en el que sólo se tiene una expresión y otro en el que una llave recoge varias expresiones relacionadas. En el primer caso la notación figura a la derecha de las expresiones, mientras que en el segundo aparece a la izquierda de la llave. En todo caso, la notación se escribe entre paréntesis e incluye el documento a que corresponde, así como el número de orden en arábigos.

A lo largo de los capítulos se efectúan sistemáticamente referencias a tablas, figuras y ecuaciones que han venido siendo de aplicación. Siempre se respeta la notación señalada a fin de garantizar el carácter unívoco de la misma. Las tablas y ecuaciones recogerán las unidades de las magnitudes siempre que no sean triviales. En todo caso, si por motivos de edición no pueden incluirse las unidades en una tabla o ecuación, se indicarán convenientemente en el texto. Las referencias a ecuaciones incluirán el documento y número de orden en el mismo, como se indica más arriba, así como, si procediera, el número de expresión.

Finalmente, debe exponerse el formato escogido de notas al pie. Normalmente, las referencias bibliográficas, (aunque se citan por extenso en uno de los capítulos de la memoria), se efectúan en notas al pie cuando conviene. Además, toda aclaración pertinente a los desarrollos matemáticos o distintos razonamientos se practica mediante este recurso. Las notas al pie se identifican mediante los símbolos \*, †, ‡ y §, por el orden indicado. Caso de precisarse más de cuatro notas al pie, se utilizarán dobles signos: \*\*, ††, ‡‡, §§ y así

sucesivamente. Las notas al pie se reinician cada página, esto es, cada símbolo corresponde a la página en que se halla exclusivamente.

Con lo indicado en esta primera sección concluye la presentación de la edición del PFC y se da paso al resto de secciones de la introducción, tocantes al proceso desde una perspectiva general a otra más particular.

### **MD.C1.2. Introducción al proceso**

#### **MD.C1.2.1. La industria petroquímica**

Del petróleo crudo se obtienen determinados compuestos, que se constituyen como la base de diversas cadenas productivas. Estas cadenas concluyen en una amplia gama de productos químicos que, por su procedencia, se denominan petroquímicos. La aplicación de tales compuestos abarca campos como la industria de fertilizantes, plásticos, alimentos, farmacéutica, química, textil, etc.

La conversión de los hidrocarburos contenidos en el crudo de petróleo en productos químicos derivados, es el fundamento de la industria petroquímica, piedra angular del mundo tecnológico e industrial actual, puesto que supone la base de los productos más habituales y de primera necesidad: componentes electrónicos, tejidos, juguetes, entre otros.

El tradicional uso del crudo de petróleo ha estribado en el refinado de las distintas fracciones del mismo, en la formulación de carburantes y combustibles. Sin embargo su aplicación, junto al gas natural, como fuente de productos petroquímicos ha sido posible gracias al desarrollo de técnicas de transformación, en parte aparecidas en momentos de extremado ingenio por obtener materiales sintéticos que, ante la escasez e imposibilidad de obtención de recursos en la convulsión que supuso la II Guerra Mundial; surgieron para suplir tales carencias.

En la actualidad, la sofisticación de dichas técnicas de transformación, que permiten tanto valorizar fracciones pesadas, como aprovechar al máximo las fracciones tradicionalmente desechadas del crudo, ha corrido paralela a la demanda de materias sintéticas por parte de las industrias de fabricación de bienes de consumo, viéndose desplazadas las materias primas tradicionales, en general, por su mayor coste y dificultad de extracción y servicio.

En las industrias textiles, verbigracia, las fibras sintéticas como el nailon o el poliéster, han desplazado a materias primas animales como la lana, o vegetales como el algodón. Los tintes sintéticos también han sustituido pigmentos naturales conocidos desde antiguo. En la industria del caucho, recientes formulaciones de polibutadieno han logrado igualar, cuando no superar las propiedades del caucho natural. La producción actual de envases no puede entenderse sin la masiva producción de polietileno como alternativa al vidrio. Los anteriores no son más que simples ejemplos de la importancia de la petroquímica como base de una amplia familia de industrias.

Los productos derivados de la petroquímica se pueden clasificar en tres grandes conjuntos. El primero y más básico lo forman los productos petroquímicos básicos o productos de primera generación, que parten del petróleo y el gas natural, que, por operaciones de transformación de los hidrocarburos, proporcionan los dos grupos principales: las olefinas y los compuestos aromáticos.

El segundo conjunto de productos, se basa en la introducción de átomos, (típicamente oxígeno, nitrógeno y azufre), en los, aún, hidrocarburos, productos de base. Estos compuestos conteniendo “heteroátomos”, o átomos distintos del carbono e hidrógeno que forman los hidrocarburos del petróleo crudo, destilado o transformado; vienen en denominarse productos petroquímicos intermedios.

El tercer conjunto supone la combinación de los compuestos de los dos anteriores, a fin de obtener bienes de consumo como los que se han mencionado más arriba. La familia de productos petroquímicos

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Memoria descriptiva

cos de consumo alcanza una diversidad muy compleja abarcando campos de producción como las fibras, cauchos, plásticos, detergentes, pinturas y barnices, abonos, anticongelantes, perfumes, explosivos, aislantes, envases y un largo etcétera.

En resumen, de lo explicado puede observarse el siguiente diagrama de procesos petroquímicos.

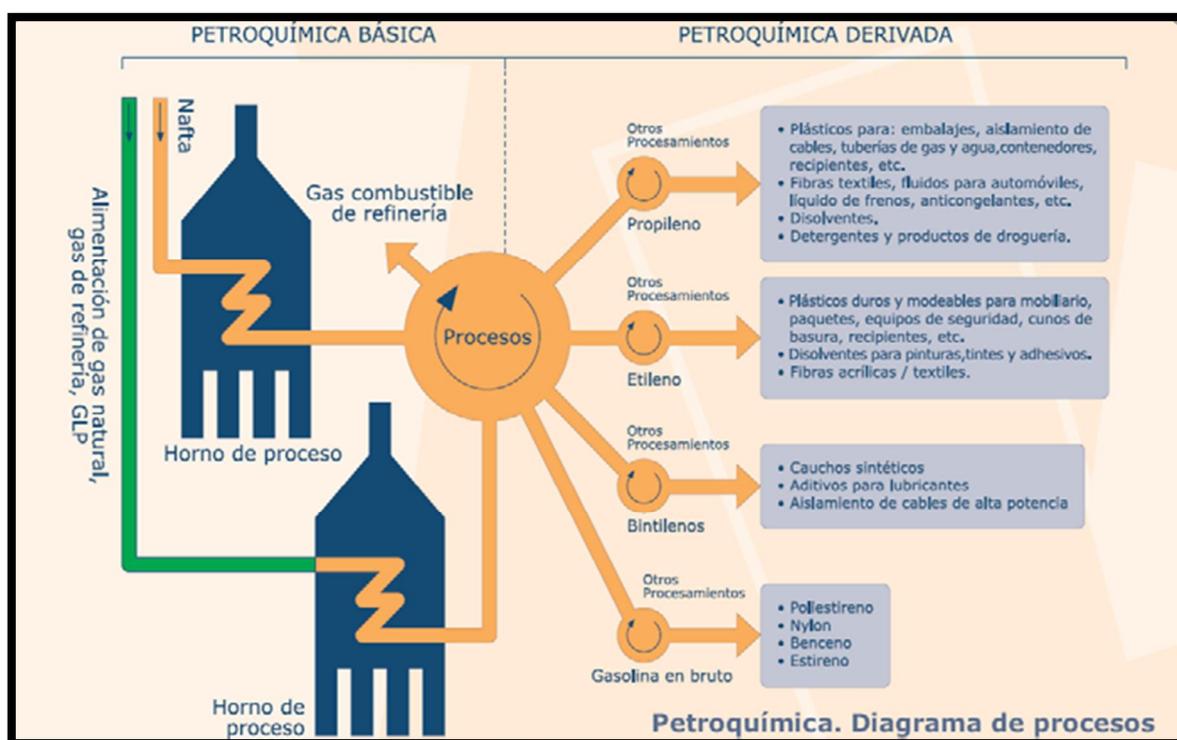


Figura. MD.1. Esquema de procesos petroquímicos. (Universidad de Cádiz, 2008)

Se distinguen dos campos de proceso petroquímico: uno primero básico donde, las cadenas petroquímicas iniciadas por el gas natural o la nafta, (un corte ligero de destilación del crudo), se transforman en corrientes ricas en productos básicos. El segundo campo supone la purificación de tales corrientes para obtener olefinas y aromáticos, como compuestos básicos; el proceso para obtener productos intermedios y la combinación de los anteriores para producir bienes de consumo.

---

Centrando el interés en el campo de los productos petroquímicos básicos, se describirá con mayor detalle la familia de olefinas y aromáticos. La obtención de estas dos familias radica en los procesos de craqueo, o ruptura de moléculas pesadas para obtener otras más ligeras, y el reformado, toda una secuencia de reacciones, que involucran la generación y consumo de hidrógeno, para producir ciclaciones (cierre de cadenas de hidrocarburos para formar anillos) y deshidrogenaciones que permiten la formación de los compuestos aromáticos.

Las olefinas ligeras consisten básicamente en etileno, propileno y butilenos. El etileno es la base de un gran número de derivados como son el polietileno, cloruro de vinilo, óxidos de etileno, monómeros de estireno, etc., que se aplican en la fabricación de plásticos, recubrimientos y moldes, entre otros ejemplos.

El propileno es la base del alcohol isopropílico, el polipropileno o el acrilonitrilo, a su vez materias primas en la industria de disolventes, pinturas o fibras sintéticas.

Los butenos, entre los que se cuentan el 1,3-butadieno\*, los butenos 1 y 2 y el isobuteno, constituyen la materia prima indispensable en la industria de los elastómeros, no sólo para la fabricación de neumáticos, (su uso más popular), sino para un sinnúmero de materiales impermeables y aislantes. Además, en refinería el isobuteno es un compuesto básico para la formación de alquilatos y aditivos como el MTBE y ETBE, que aumentan el octanaje de las gasolinas.

Finalmente, la familia de aromáticos básica de la petroquímica es la integrada los BTX, (benceno, tolueno y xilenos). El benceno inicia distintas cadenas productivas. Valgan como ejemplo la producción del ciclohexano conducente a la obtención del nailon, o, como ejemplo tangible por su cercanía, la fabricación de detergentes que

---

\* En el PFC se utiliza indistintamente la denominación 1,3-butadieno y butadieno. Salvo indicación en contrario, butadieno siempre hará referencia a la diolefina 1,3.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Memoria descriptiva

lleva a cabo la empresa *Cepsa Química* a partir de la sulfonación del alquilbenceno lineal. Es también la base del cumeno y, por ende de la producción de acetona y fenol. El tolueno, por su parte es materia prima en distintas industrias de disolvente y explosivos y los xilenos son conocidos por su participación en la industria de las fibras sintéticas. El siguiente cuadro resume las ramificaciones de los productos petroquímicos desde los básicos hasta los bienes de consumo.

Básicos	Intermedios	Finales
<b>Etileno</b>	Estireno Oxido de etileno/Etilénglicol Cloruro de vinilo Acetato de vinilo	Poliétileno de baja densidad. Poliétileno de alta densidad Poliestireno ABS, SAN Caucho SBR Resinas poliéster Fibras poliéster PET PVC Emulsiones
<b>Propileno</b>	Cumeno/Fenol Isopropanol/Acetona Oxido de propileno Acrlonitrilo Oxalcoholes	Polipropileno Resinas, herbicida Solventes Poliuretanos Fibras acrílicas ABS, SAN Plastificantes
<b>Butilenos</b>	sec Butanol/MEK Oxalcoholes	MTBE Solventes Plastificantes
<b>Butadieno</b>		Caucho SBR Emulsiones SB / ABS
<b>Benceno</b>	Hexametildiamina Estireno Cumeno/Fenol Anilina/ MDI Ciclohexano/Caprolactama Alquilbenceno - ABL	Nylon 66 Poliestireno Resinas, herbicidas Poliuretanos Nylon 6 Detergentes
<b>Tolueno</b>		TDI Poliuretanos Solventes
<b>Paraxileno</b>	Acido tereftálico DMT	Fibra poliéster PET
<b>Ortoxileno</b>	Anhídrido ftálico Amoniaco Acido nítrico Metanol Formaldehido DMT	Plastificantes Resinas poliéster Resinas alquídicas Fertilizantes Explosivos, Fertilizantes MTBE Resinas Fibras poliéster

Figura. MD.2. Cuadro de productos petroquímicos. (*Universidad de Cádiz, 2008*)

Este primer apartado introductorio persigue centrar la atención del lector acerca del marco de acción en que se encuadra el proceso en estudio. El presente PFC se ocupará de diseñar un proceso para la obtención de butadieno, una diolefina obtenida por transformación sencilla del crudo de petróleo. Es por tanto un producto petroquímico básico, de modo que los apartados siguientes se dedicarán a la descripción más detallada de este campo de la industria petroquímica.

### MD.C1.2.2. La producción de la fracción de butanos

Como indica el título del PFC, el componente de interés, 1,3-butadieno, está contenido en una fracción de butanos, a su vez procedente de un craqueo térmico de naftas. Procede explicar, de forma genérica, la obtención de esta corriente que servirá de alimentación al proceso diseñado, a modo de acercamiento al mismo.

La práctica totalidad de la demanda mundial de etileno y butadieno, y la mayor parte del propileno, se obtiene por el proceso denominado de pirólisis con vapor, neologismo tomado del inglés "*steam cracking*". En este método, una alimentación apropiada, sobre la que se debatirá más adelante, se calienta durante un breve lapso de tiempo a temperaturas del orden de 850 °C en presencia de gran cantidad de vapor de agua, (entre 20-50% de la fase orgánica), con lo que las moléculas saturadas se convierte en una mezcla compleja de olefinas ligeras y aromáticos inferiores en menor cuantía. El proceso produce también variables cantidades de hidrógeno, metano y otros hidrocarburos pesados.

En cuanto a la materia prima seleccionada, ésta se encuentra fuertemente condicionada por las características específicas de la misma. Se conoce con bastante precisión el comportamiento de los diferentes hidrocarburos ante la pirólisis con vapor:

- El rendimiento en olefinas ligeras es máximo para las parafinas lineales, (alcanos de cadena lineal) y mínimo en cargas aromáticas.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Memoria descriptiva

---

- El rendimiento en etileno es mayor con las parafinas lineales que con las ramificadas.
- Al aumentar el peso molecular de la alimentación se favorece la tendencia a la pirólisis y la facilidad para la formación de coque\*.

El diseño de las plantas de pirólisis con vapor se optimiza para un relativamente estrecho rango de alimentaciones, puesto que los objetivos de la unidad condicionan su viabilidad económica: una planta de pirólisis con vapor orientada a la maximización de la corriente de butanos, como la requerida por el PFC, cargará como alimentación naftas o gasóleos, ya que, de alimentar gas natural, el rendimiento en butadieno sería insuficiente e incompatible con el desempeño de la planta de purificación de éste.

En países con gran producción de gas natural, (Estados Unidos o Rusia, por ejemplo), el etano o propano obtenido a partir de esta materia prima es la carga preferida, de donde su función estribará en rendir grandes cantidades de etileno o propileno. En el teatro europeo es frecuente cargar los hornos con un amplio espectro de productos que comprende desde la nafta ligera de destilación directa, (LSR, "*Light Straight Run*" por sus siglas en inglés) al gasóleo ligero, pasando por nafta reformada rica en aromáticos, gas de FCC similar al fuel-gas rico en  $C_1$  y  $C_2$ , butenos residuales de alquilación, residuos de las unidades de hidrocraqueo, etc. Todas las corrientes y procesos enumerados requerirían una explicación por extenso, si bien, dado que escaparía al objetivo introductorio del apartado se omitirá por razones de brevedad. En todo caso queda claro que el proceso de pirólisis con vapor, con no ser estrictamente un proceso de refino, se integra en Refinería precisamente por la alta disponibilidad de las corrientes mencionadas, que ésta brinda.

---

\* Entiéndase por coque el producto de descomposición térmica del propio crudo o sus fracciones. Cuanto más pesadas son tales fracciones, mayor es la incidencia del fenómeno que lo produce. Sus depósitos afectan gravemente al flujo de fluidos y la transmisión de calor en los equipos.

Las distintas cargas candidatas a la alimentación del proceso de pirólisis con vapor son, como queda dicho, procedentes de distintos procesos destinados a la formulación de gasolinas y gasóleos en Refinería. Algunas de ellas, como el gas de FCC, residuos de hidro-craqueo o butenos de alquilación carecen de gran valor, por lo que el proceso no sólo brinda la alimentación de aquél que es objeto del presente PFC, sino que adicionalmente, sirve a la valorización de corrientes de refinería que, de otro modo se “desperdiciarían” como combustible interno en hornos y calderas, favoreciendo estrategias de integración de corrientes en Refinería.

La siguiente figura ofrece las producciones representativas, obtenidas por diferentes materias primas al paso por el horno de pirólisis.

<i>Alimentación a hornos de pirólisis; producciones en un solo paso (% en peso)</i>					
Producto	Alimentación				
	Etano	Propano	Butano	Nafta	Gasóleo
Hidrógeno	4,3	1,3	1,2	0,8	0,5
Metano	4,2	25,2	20,1	13,5	10,9
Acetileno	0,4	0,5	0,8	0,7	0,2
Etileno	56,0	40,9	40,4	28,4	20,6
Etano	30,0	3,6	3,5	3,9	4,8
Propadieno	0,1	0,5	1,2	0,4	0,5
Propileno	1,0	11,5	14,4	16,5	14,0
Propano	0,2	5,0	0,1	0,5	0,8
Butadieno	1,6	4,5	4,3	4,9	4,9
Butenos	0,2	1,0	1,3	5,2	3,9
Butano	0,2	0,1	2,0	1,0	0,1
C <sub>5</sub> /C <sub>6</sub>	1,8	5,9	10,7	3,9	1,9
C <sub>7</sub> + no aromáticos	0,0	0,0	0,0	1,2	2,1
Aromáticos	0,0	0,0	0,0	10,5	12,5
< 430 °C	0,0	0,0	0,0	5,2	2,6
> 430 °C	0,0	0,0	0,0	3,4	19,7
<b>Total</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>

Figura. MD.3. Alimentación a hornos de pirólisis.  
(Guía MTD del sector refino. MMA)

Como puede observarse, las alimentaciones de etano, propano y butano, correspondientes a distintas formulaciones de gas licuado del petróleo, (GLP), y gas natural, proporciona un rendimiento mayor

\* Se cita entrecomillado porque el asunto merecería discusión aparte.

en los compuestos más ligeros, mientras que las alimentaciones de nafta y gasóleo rinden mayores cantidades tanto de butenos e hidrocarburos de mayor número de carbonos como de aromáticos.

Puesto que el objeto del PFC es la purificación del butadieno contenido en una corriente de  $C_4$ , interesa maximizar el rendimiento de la pirólisis con vapor en butadieno, lo que se logra alimentando nafta o gasóleo. A la sazón se ha escogido la alimentación de naftas por dos razones. La primera es la disponibilidad de datos de corrientes típicas de butanos de carga a la unidad proyectada. La segunda es el rendimiento típico que refleja la Figura MD.3: los gasóleos procuran corrientes más ricas en aromáticos y productos de descomposición, (coque a  $> 430^{\circ} C$ ), lo que convierte la operación en más costosa de mantener y dificulta la separación de la fracción de interés.

No obstante, puesto que no es objeto del presente PFC el diseño de la unidad de pirólisis con vapor, se emplaza al eventual proyectista a evaluar las posibilidades de emplear gasóleo, en aras de obtener claramente la solución óptima.

Sobre los datos de la Figura MD.3, cabe añadir que éstos corresponden a un solo paso de la alimentación por el horno. Tras dicho paso, el etano producido o no convertido se recicla a hornos especiales, mientras que el propadieno y casi siempre el acetileno, previa hidrogenación, se suman a la alimentación, por lo que el rendimiento final del proceso puede variar ligeramente del mostrado para pirólisis directa.

En lo que al proceso se refiere, la tecnología de las plantas de pirólisis está concentrada en un pequeño número de ingenierías. Aunque los principios generales son sobradamente conocidos, los distintos diseños varían en detalles menores, (especialmente los hornos), que se adaptan mejor a las especiales condiciones locales de las unidades: integración energética, disponibilidad de materias primas y espectro de productos deseados.

Según lo expuesto todos los diseños presentan varios caracteres comunes que se representan en forma de diagrama de bloques en la siguiente figura:

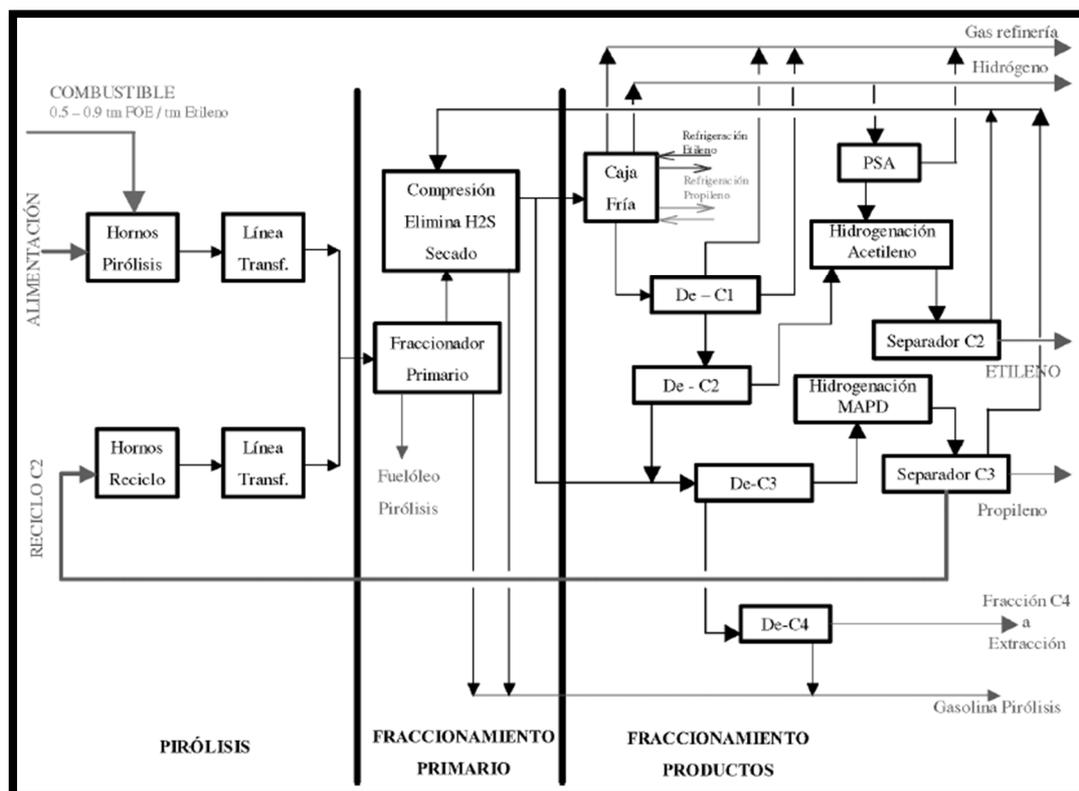


Figura. MD.4. Esquema del proceso de pirólisis con vapor.  
(Guía MTD del sector refino. MMA)

Esta figura se reproduce en el primer capítulo del anexo segundo, donde, adicionalmente, se continúa el debate sobre el estado del arte involucrado en la separación del corte que alimenta al proceso proyectado en el presente PFC. Se omite en el presente apartado la reiteración de tal discusión y se completa aquel capítulo con la descripción del proceso que se dejó pendiente. En la Figura MD.4 se aprecian tres zonas principales:

1. Sección de pirólisis (hornos) y calderas complementarias.
2. Compresión del gas de pirólisis y fraccionamiento primario.
3. Separación de productos.

Se realizará en las siguientes líneas una sucinta descripción de las características más relevantes.

- Sección de pirólisis (hornos) y calderas complementarias

La alimentación de hidrocarburos se precalienta en intercambiadores de proceso. En la sección convectiva del horno se mezcla con vapor recalentado, vaporizando totalmente antes de pasar a la radiante, donde ocurren las reacciones de pirólisis fuertemente endotérmicas.

Los hornos son de diseño particular, en especial la cámara radiante, (que es a la sazón un reactor). El serpentín consta de una sola hilera de tubos, largos (entre 50 y 200 m) y relativamente angostos (entre 25 y 125 mm de diámetro), construidos en aleación Cr/Ni y situados en el centro de la zona radiante. En dicha zona se calienta la alimentación lo más uniformemente posible, mediante un gran número de quemadores que emplean gas combustible. De esta manera, la mezcla hidrocarburos/vapor alcanza temperaturas de 850 °C en un tiempo extremadamente breve (inferior al segundo) y se lleva a cabo la descomposición térmica, cuyos resultados dependen de una forma muy compleja de la clase de alimentación, (según queda discutido), presión parcial de los hidrocarburos, (presión total y proporción de vapor de agua), temperatura, tiempo de residencia y perfil de temperaturas.

El gas que abandona la sección radiante a una temperatura comprendida entre 850 y 900 °C es muy inestable. A fin de evitar reacciones de polimerización, se tiene que enfriar rápidamente, por lo común en dos etapas:

- Una primera desde 875 hasta 500 °C en intercambiadores tubulares, donde generan vapor de agua saturado a 100 bar, (que puede recalentarse en el mismo horno y enviarse para accionamiento de las turbinas de los compresores).

- Una segunda entre 500 y 200 °C mediante inyección de una corriente de hidrocarburos pesados que actúa como fluido térmico recirculante.

La mezcla del gas de pirólisis y los hidrocarburos pesados, ya enfriada, pasa al fraccionamiento primario. Durante toda la operación de pirólisis, es inevitable la formación de coque en el interior de los hornos, así como un pronunciado ensuciamiento de las superficies de intercambio térmico, por lo que regularmente deben ser retirados de servicio y decoquizados mediante aire o vapor de agua.

- Compresión del gas y fraccionamiento primario

En esta sección se acondiciona el gas para ulteriormente separar sus componentes mediante fraccionamiento criogénico. Comprende las siguientes operaciones.

- Fraccionamiento primario: Se realiza en una columna de destilación. Se enfría el gas a la temperatura ambiente y se separan groseramente todos los líquidos formados, (fracción de C<sub>5</sub> y superiores y agua procedente del vapor de dilución). El fondo de la columna se recircula para recuperar calor y finalmente se inyecta en el gas de pirólisis a la salida de los hornos.
- Compresión del gas: El gas se comprime hasta 40 bar en máquinas centrífugas accionadas por turbinas. Para evitar temperaturas excesivas, la compresión se realiza en 4 ó 5 etapas, con refrigeración intermedia. Todos los líquidos separados se recirculan al fraccionador primario.
- Acondicionamiento del gas: En alguna etapa intermedia, el gas se lava con aminas y sosa cáustica para eliminar totalmente los gases ácidos, (sulfhídrico y dióxido de carbono) formados en el horno. Finalmente es secado mediante tamices moleculares por absorción en contracorriente con trietilenglicol.

- Separación de productos

Como indica la Figura MD.3, el gas comprimido y seco es una compleja mezcla de hidrógeno e hidrocarburos desde  $C_1$  hasta  $C_5$ , con cantidades variables de monóxido de carbono formados en el horno. Aunque cada ingeniería posee su propio diseño, todas obedecen a los siguientes principios generales:

- Enfriar el gas hasta temperaturas de  $-160\text{ }^\circ\text{C}$ .
- Separar hidrógeno y metano por destilación.
- Separados los anteriores, establecer una secuencia de fraccionamiento de procure fracciones de etano y etileno, de propanos, ( $C_3$ ), de butanos, ( $C_4$ ) y gasolina de pirólisis que contiene el residuo más pesado.

El proceso se completa con hidrogenaciones selectivas de componentes indeseables, (monóxido de carbono y alquinos) y el aislamiento, dentro de cada fracción principal, de los compuestos comerciales: etileno, propileno, butenos, butadieno, (de que se ocupa el PFC); acondicionando los coproductos, (etano, que se recicla a los hornos de pirólisis especiales, propano y butano enviado a GLP, etc.).

Volviendo la atención a la Figura MD.4, el resumen práctico referido al PFC es el que sigue: Se alimenta una carga de nafta, cuya composición deberá optimizarse, a un horno de pirólisis en presencia de vapor de agua, que homogeniza la temperatura y reduce la presión parcial de los hidrocarburos. El resultado es un gas rico en hidrógeno, etano y etileno, propano y propileno, butenos y butadieno y, en menor medida acetileno, aromáticos y compuestos de mayor número de carbonos. Este gas se somete a un fraccionamiento primario que lo acondiciona para su corte en distintas fracciones entre las que debe destacarse la “Fracción  $C_4$  a extracción”, tal como se muestra en la figura.

Es esta la corriente de alimentación del proyecto, cuya composición es la que sigue:

Componente	Craqueo térmico
1,3-Butadieno	37,0 – 48,0
Isobuteno	22,0 – 27,0
1-Buteno	14,0 – 16,0
Cis-2-Buteno	11,0 – 12,0
Isobutano	2,0 – 5,0
n-Butano	0,5 – 1,5

Tabla. MD.I. Composición (% en peso) de la fracción C<sub>4</sub>

Donde las horquillas de composición se han tomado de la bibliografía\*. Concluido el apartado de descripción del proceso previo al proyectado, se sigue la reseña sobre el componente de interés.

### MD.C1.2.3. El butadieno y algunos derivados

El 1,3-butadieno es un gas a temperatura ambiente. Es incoloro y presenta un característico olor que recuerda a la gasolina, toda vez que este combustible puede presentar en su formulación pequeñas cantidades de butadieno. Se trata de un compuesto químico peligroso debido a su inflamabilidad, reactividad y toxicidad. Sobre su manipulación segura se hará especial hincapié en el capítulo de Seguridad e Higiene. En este apartado se tratarán sus aplicaciones en el campo industrial.

Como queda referido anteriormente, el 1,3-butadieno es un producto fundamental en la industria petroquímica. La simplicidad de su estructura química combinada con su bajo peso molecular y alta reactividad, lo convierten en un elemento muy útil en la síntesis de otros materiales.

\* Conversión de n-butano en hidrocarburos aromáticos con catalizadores de zeolita ZSM-5. J. C. Ramírez Camacho. Tesis doctoral, Madrid 1995.

La utilidad principal del butadieno consiste en servir de monómero en la producción de una amplia gama de polímeros y copolímeros. Encuentra también aplicación como producto intermedio en la obtención de distintos productos finales. Se describen seguidamente sus usos más extendidos:

- Caucho estireno-butadieno, (*Styrene-Butadiene Rubber*, SBR):

Producido por la polimerización de estireno y butadieno, el principal uso de este caucho radica en la fabricación de neumáticos y productos derivados, así como en adhesivos y sellantes, aislantes para cables y otros artículos de caucho como suelas de zapato. También puede ser usado como base para gomas de mascar.

La mayor parte de la demanda global de butadieno, 28%, se invierte en satisfacer la demanda de este tipo de caucho.

- Polibutadieno (PB):

El polibutadieno es un homopolímero, (material formado por la polimerización de un solo monómero), del butadieno. En concreto supone una demanda mundial del 26%, la segunda más importante de butadieno. Las reacciones de polimerización del butadieno requerirían una explicación detallada, si bien, al interés de la descripción sólo se diferenciará entre dos tipos de reactividad: la polimerización en posición 1-2 y en 1-4.

En el primer tipo sólo uno de los dobles enlaces participa en la reacción mientras que los otros dos carbonos doblemente enlazados quedan como ramificación. En el segundo tipo, los dos dobles enlaces participan en la polimerización, de modo que se deshacen los enlaces en los carbonos 1 y 3 y se forma uno espontáneamente en la posición 2-3, (véase la Figura MD.5). En todo caso se aprecia que el polímero en su unidad básica, (la que queda delimitada por paréntese-

sis y se repite hasta formar largas cadenas indefinidas), siempre contiene un doble enlace, esto es, una posición activa para reaccionar.

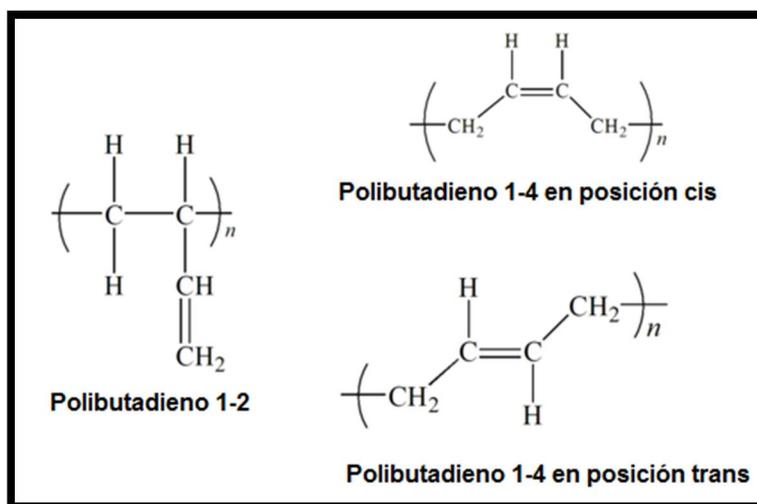


Figura. MD.5. Unidades básicas de polibutadieno. (Elaboración propia)

La anterior es una de las particularidades del polibutadieno, que lo distinguen de otras estructuras similares como el polietileno. Mientras que en este último la polimerización forma largas cadenas poco cohesionadas, lo que supone un comportamiento plástico poco resistente al esfuerzo; en el polibutadieno los enlaces dobles tienden a formar puentes entre sí o con sustancias añadidas *ex profeso*. Estos puentes permiten recuperar la geometría molecular cuando cesa un esfuerzo aplicado o, expresado de otra forma, dotan al material de su carácter elástico característico.

Sin embargo, la formación de puentes debe controlarse, (lo que se practica incidiendo sobre las condiciones de polimerización), puesto que un exceso de estos rigidiza el material y lo vuelve frágil. Asimismo, los dobles enlaces del polibutadieno de fábrica se encuentran prácticamente intactos, careciendo de consistencia, por lo que debe vulcanizarse, esto es, someterse a un tratamiento de curado que establezca los puentes y garantice el comportamiento elástico.

Conocida la idiosincrasia del polibutadieno, pueden referirse sus aplicaciones. De la misma forma que el caucho SBR, la mayor parte de la producción de este segundo consumidor mundial de butadieno, se destina a la fabricación de neumáticos, a lo que deben efectuarse las siguientes precisiones.

El polibutadieno aplicado en neumáticos requiere una polimerización de alto-cis, esto es, una alta proporción de unidades cis. Su fabricación emplea catalizadores de *Ziegler-Natta* basados en metales de transición. Esto se debe a la elevada temperatura de transición vítrea\* del polibutadieno de bajo-cis, (conteniendo unidades trans y en posición 1-2 ó vinilos), que disminuye la resistencia a la abrasión y al rodamiento de los neumáticos.

En segundo lugar, el polibutadieno se prefiere al SBR por presentar una temperatura de transición vítrea inferior, por lo que los neumáticos son más resistentes, lo que conlleva una mayor duración y ahorro de combustible. Ahora bien, la baja temperatura de transición vítrea implica una baja tracción en mojado, lo que obliga a utilizar el polibutadieno en combinación sinérgica con el caucho SBR y el caucho natural.

El polibutadieno también se utiliza como intermedio en la producción de resinas de acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS), mejorando la capacidad del polímero sin butadieno de soportar tensiones o golpes repentinos sin fractura.

En suma, los dos polímeros anteriores suponen una demanda conjunta de más de la mitad del butadieno producido en el mundo y hallan aplicación, por combinación y por separado, en la fabricación de neumáticos, un mercado sin el que no se comprende la industria automovilística y de transportes. De ahí la importancia de la producción del caucho sintético y, por ende, de la producción de butadieno.

---

\* Aquella temperatura que supone un punto intermedio entre el estado fundido y rígido de algunos materiales metaestables como el vidrio.

- Látex estireno-butadieno, (*Styrene-Butadiene Latex*, SBL):

El látex de estireno-butadieno supone la tercera mayor demanda en el mercado del butadieno con un 12% de la tarta global. El látex se puede definir como una dispersión acuosa estable, que contiene partículas discretas de polímero con una granulometría aproximada de 0,05 a 5 micras de diámetro. Sus aplicaciones fundamentales incluyen la gomaespuma, (en rellenos de cojines y almohadas, alfombras, esponjas, etc.), adhesivos, (para suelos, azulejos, carreteras y tejados), sellantes y recubrimientos para papel.

- Resinas de acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS):

Las resinas ABS son termoplásticos muy resistentes al impacto. Su procesamiento es más complejo que el de los plásticos comunes puesto que los copolímeros se injertan unos en otros en una operación controlada. Está compuesto por bloques de acrilonitrilo, que aportan resistencia y estabilidad química a alta temperatura, así como resistencia; butadieno que mejora la tenacidad evitando el carácter quebradizo a baja temperatura y estireno que proporciona buena resistencia mecánica. El ABS es un ejemplo de diseño de materiales en Ingeniería Química, que pretende aprovechar el comportamiento sinérgico de materiales existentes.

Se trata de resinas ampliamente usadas en automoción y otros campos tanto industriales como domésticos, por ejemplo, en fabricación de partes de teléfonos u ordenadores. Incide en cuarto lugar en la demanda mundial de butadieno con un 12%, al igual que el látex SBL.

- Adiponitrilo, hexametildiamina y nailon:

El adiponitrilo y la hexametildiamina son los mejores ejemplos de uso industrial del butadieno como producto intermedio, no en vano se encuentran en quinto lugar en lo tocante a demanda global de butadieno con un 6% y en primero, en lo que se refiere a uso para

producción de intermedios derivados del producto de interés del presente PFC. El adiponitrilo se obtiene por reacción del butadieno con cianuro de hidrógeno y es precursor de la hexametildiamina, que, a su vez, se obtiene por hidrogenación del anterior. La hexametildiamina es usada fundamentalmente como reactivo en la producción del nailon, (obtenido por condensación con ácido adípico). También participa en la formación de distintas resinas y fibras sintéticas.

- Caucho nitrilo, (*Nitrile Rubber*, NBR):

El caucho nitrilo se obtiene por copolimerización del acrilonitrilo y el butadieno. Es también conocido como caucho de nitrilo-butadieno y supone un 4% de la demanda global de 1,3-butadieno. Sus usos incluyen un variado abanico de productos como mangueras, partes de automoción, juntas de bridas, adhesivos estructurales, guantes de laboratorio, etc.

- Cloropreno:

La cloración del butadieno produce 2-cloro-1,3-butadieno o cloropreno, el precursor del policloropreno comercializado bajo el nombre de neopreno. El neopreno, un polímero muy familiar, es un material muy versátil que demanda un 2% de la producción global de butadieno, siendo, en este caso, un precursor de producto intermedio. Sus aplicaciones incluyen las conocidas ropas impermeables y aislantes térmicas, además de adhesivos, aislantes eléctricos, cinturones, juntas para fontanería, partes de neumáticos, etc.

- Metil metacrilato-butadieno-estireno, (*Methyl Methacrylate-Butadiene-Styrene*, MMBS):

Una resina usada también en partes de automoción y envases es el MMBS, más conocido por utilizarse como modificador de impacto en polímeros rígidos como el PVC. La inclusión de MMBS en la matriz del cloruro de polivinilo introduce puntos de absorción de impacto, mejorando la resistencia mecánica del frágil PVC.

- Otros usos como producto intermedio:

El butadieno también es utilizado en la producción de 1,4-hexadieno, (monómero del termopolímero etileno-propileno-dieno, aislante eléctrico y de cubiertas en construcción), sulfolane, (un solvente usado precisamente en la *Refinería Gibraltar-San Roque* para extraer BTX de la “platformada” o corriente saliente del proceso de reformado catalítico) y 1,5,9-ciclododecatrieno, (aplicado en la producción de fibras de nailon y distintas resinas). La demanda para producción de estos intermedios se sitúa en torno al 10% del total.

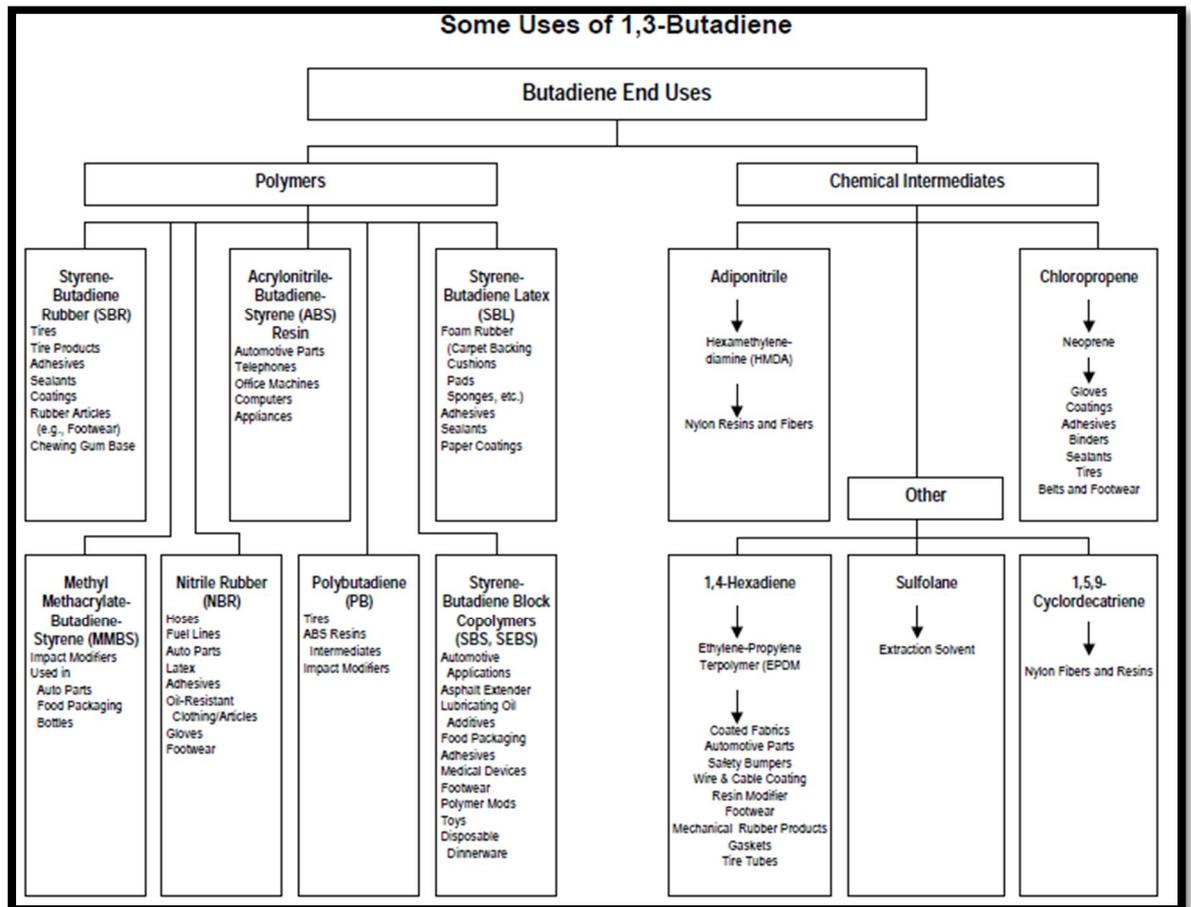


Figura. MD.6. Usos finales e intermedios del butadieno. (*American Chemistry Council. Butadiene Stewardship Guidance Manual, 2001*)

En definitiva, un paseo por la enumeración de los principales polímeros y productos intermedios derivados del butadieno, junto con

la importancia que conlleva sus aplicaciones, de las que penden ramas industriales completas, permite comprobar el privilegiado puesto que el butadieno ocupa en el teatro de la industria química.

Sólo se han mostrado las aplicaciones más significativas, si bien, una glosa más amplia del mercado del butadieno requeriría un completo estudio que no hace al objeto del PFC. Téngase pues por justificado el valor comercial mundial del producto de interés. En la Figura MD.6 se presenta un cuadro resumen de lo mostrado en el presente apartado.

#### MD.C1.2.4. Vías de producción de butadieno comercial

En el apartado MD.C1.2.2, se apuntaron las generalidades del proceso suministrador de la alimentación del proceso proyectado, que se ha dado en denominar fracción de butanos. En el presente apartado, se pretende mostrar las posibilidades existentes para la purificación del butadieno de tales fracciones de butanos o corrientes de butadieno crudo, como también pueden ser conocidas.

El butadieno crudo se obtiene, fundamentalmente, mediante los siguientes procesos:

- Pirólisis con vapor de cargas parafínicas, (gas natural, GLP, nafta o gasóleo): Donde el butadieno queda contenido en una fracción de butanos, separada de otros cortes entre los que destaca el etileno.
- Deshidrogenación catalítica de n-butano y butenos lineales: El conocido como proceso *Houdry*.
- Deshidrogenación oxidativa de butenos lineales: El proceso *Oxo-D* u *O-X-D*.

Los rudimentos del proceso de pirólisis con vapor fueron expuestos dos apartados atrás e, incluso, se decidió cuál era la carga más oportuna. No en vano, antes de proceder a detallar las alternati-

vas de purificación del butadieno, es conveniente descartar el resto de vías.

El procedimiento de obtención de butadieno crudo a partir de la pirólisis con vapor es el método ampliamente predominante, (un 91% de tal fracción se obtiene en todo el mundo mediante este procedimiento), de los tres mostrados. Ello se debe fundamentalmente a las características de las dos alternativas, que se describen sucintamente.

- Producción de butadieno vía deshidrogenación catalítica

La deshidrogenación catalítica consiste en dos etapas de reacción por la que el butano lineal, en primera instancia, forma un primer doble enlace, (es decir, pasa a buteno lineal), y en una segunda etapa incorpora el segundo doble enlace del 1,3-butadieno.

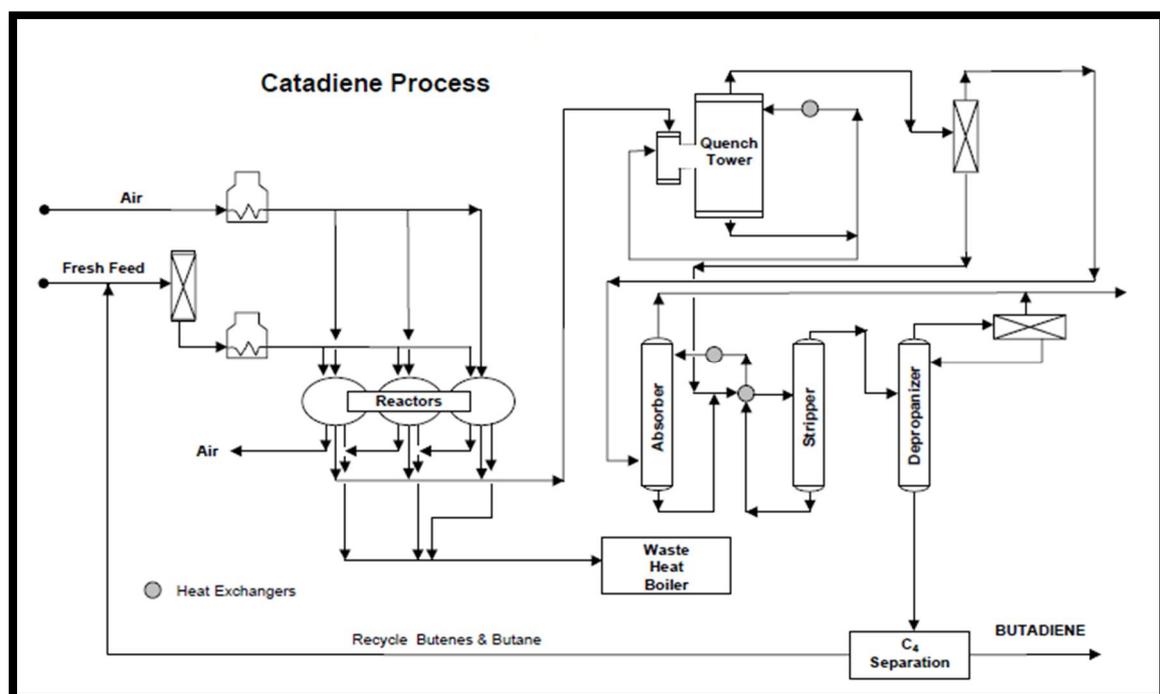


Figura. MD.7. Proceso Houdry para obtención de butadieno crudo. (American Chemistry Council. Butadiene Stewardship Guidance Manual, 2001 )

Ambas etapas son endotérmicas y obligan a trabajar en condiciones de alto vacío, en operación semicontinua, (un reactor trabajando, otro regenerando y un tercero en purga) a una temperatura comprendida entre 600 y 680 °C. La regeneración se practica quemando el coque depositado en el catalizador haciendo pasar aire precalentado. Tras esta fase de reacción química, se sigue una sección de absorción que dirige el butadieno crudo, lo más concentrado posible en butadieno, a una planta como la proyectada, representada por el cuadro "C<sub>4</sub> Separation" en la Figura MD.7.

- Producción de butadieno vía deshidrogenación oxidativa

La deshidrogenación oxidativa, en este caso de butenos lineales, es un procedimiento menos severo en cuanto a condiciones que el anterior por lo que no es de extrañar que dicho proceso *Houdry* se encuentre en franca decadencia entre las compañías que optan por la vía de la deshidrogenación. En general, el proceso consiste en mezclar una alimentación de butenos lineales, aire y vapor sobre un lecho catalítico a baja presión, y una temperatura similar algo inferior a la del proceso anterior, (500-600 °C). En este caso, las reacciones son extremadamente exotérmicas y el calor de reacción debe retirarse mediante un circuito de sales fundidas. A su salida del reactor, el efluente se hace trasegar por un circuito de operaciones de separación que producen un butadieno crudo algo más concentrado en el producto de interés que las otras dos vías: 70-90%. Un diagrama de flujo de esta operación se muestra en la Figura MD.8.

Como se mostró, el proceso de pirólisis con vapor obtenía un rendimiento en butadieno en torno al 45% típicamente. El proceso *Houdry* no rinde un butadieno crudo más concentrado, (aunque existen plantas que pueden obtener hasta un 75% de concentración).

En definitiva, los tres procesos de generación de butadieno crudo requieren del diseño de una planta como la que proyecta el presente PFC, si bien, el proceso de pirólisis con vapor emplea cargas relativamente asequibles económicamente, mientras que los

procesos de deshidrogenación poseen virtudes contrapuestas que los desaconsejan frente al mayoritario. Si la deshidrogenación oxidativa supera por sus condiciones de operación al proceso *Houdry*, éste la aventaja en la carga más económica: alimentar butenos lineales supondría bien cualquiera de las otras dos previa deshidrogenación de los butenos, lo que lo convierte en una opción poco práctica económicamente, frente a las otras dos.

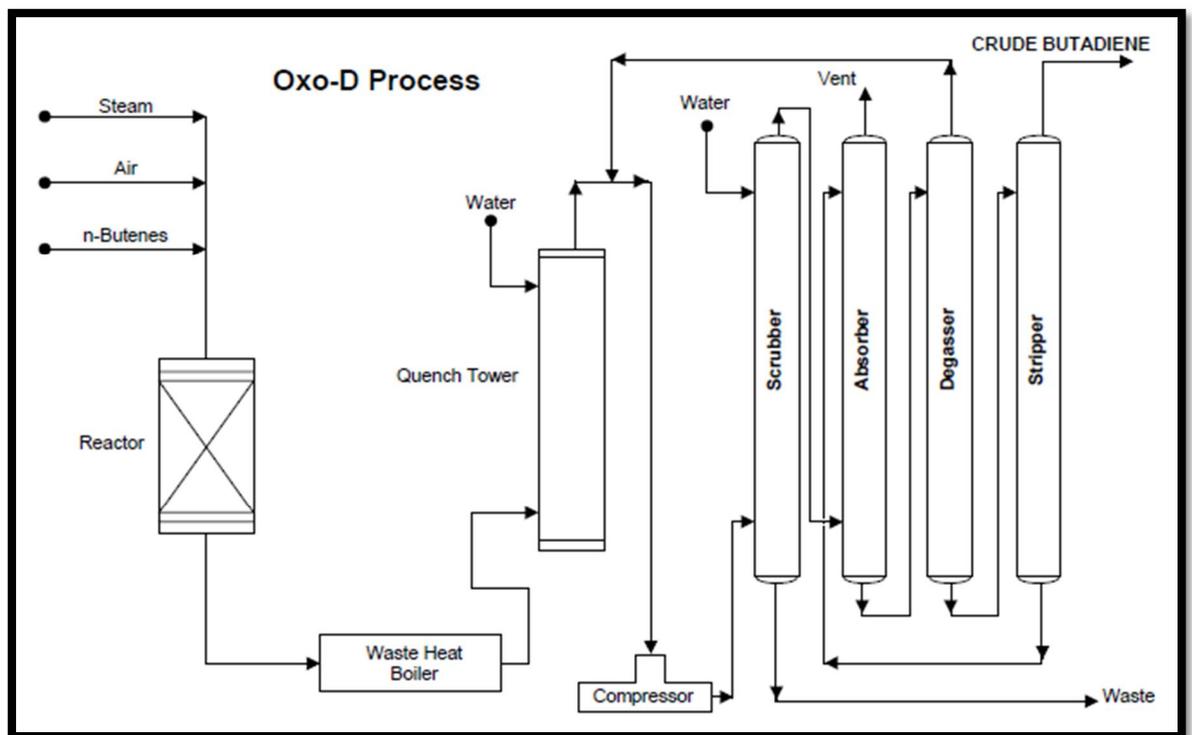


Figura. MD.8. Proceso *Oxo-D* para obtención de butadieno crudo. (American Chemistry Council. *Butadiene Stewardship Guidance Manual*, 2001 )

En todo caso, el proceso de pirólisis con vapor involucra menor número de operaciones de acondicionamiento del butadieno crudo que sus alternativas y, adicionalmente, permite trabajar en continuo con cargas masivas. Queda por tanto plenamente justificada la elección de la pirólisis con vapor como operación previa a la proyectada por el PFC, para el suministro de la alimentación de éste.

En lo tocante a las alternativas para el proceso de butadieno crudo se cuentan las siguientes:

- Recirculación a los hornos de pirólisis, con o sin hidrogenación previa.
- Hidrogenación selectiva del butadieno.
- Extracción del butadieno.

Evidentemente la opción escogida es la extracción, pues la pre-tensión fundamental del PFC, como se consignará en el objeto y justificación, es la purificación del butadieno. Ahora bien, dependiendo de la carga alimentada a la operación que proporcione el butadieno crudo, las alternativas de proceso del mismo son variantes. La recirculación a los hornos de pirólisis, suele efectuarse a fin de aumentar el rendimiento en etileno o propileno, más aún cuanto menor haya sido la severidad del craqueo, (y por tanto se requiera una hidrogenación previa). Por su parte, la hidrogenación selectiva del butadieno permite obtener una mezcla rica en isobuteno y 1-buteno, que puede cargarse a plantas de MTBE o ETBE, (aditivos de gasolina) o plantas de alquilación, (que producen alquilatos, o alcanos ramificados que aumentan el octano de las gasolinas).

Son los anteriores simples ejemplos de los usos del butadieno crudo, del que pende toda una familia de procedimientos. Prestando atención estrictamente a la extracción del butadieno, esta tiene lugar mediante la operación conocida como destilación extractiva.

Dado que los puntos de ebullición de los componentes del butadieno crudo son muy próximos entre sí, la destilación simple es ineficaz al objetivo de aislar el butadieno. Una destilación extractiva consiste en la mezcla de la alimentación que pretende destilarse con un agente extractante que aumente la volatilidad relativa de los componentes, de tal suerte que, mediante sucesivas operaciones la alimentación se corte en corrientes cada vez más concentradas en el componente de interés.

Debe prestarse especial atención a la selección del extractante, que deberá ser de una volatilidad muy inferior a la de cualquiera de los componentes con que se mezcla, de modo que su recuperación

sea sencilla, de lo contrario se crearía un nuevo problema, en lugar de prestar solución al de la proximidad de los puntos de ebullición en el butadieno crudo. Las alternativas de purificación son las siguientes:

- Hidrogenación de los acetilenos y destilación extractiva usando disolvente metoxi-propio-nitrilo (MOPN) y furfural en solución acuosa.
- Destilación extractiva y convencional usando n-metil-2-pirrolidona (NMP) en solución acuosa.
- Extracción usando dimetilformamida (DMF) no acuosa.
- Separación acuosa y extracción con acetonitrilo (ACN).

Se procede a describir, siquiera de soslayo, cada uno de ellos.

- Proceso con MOPN/furfural

Se trata de un proceso dividido en cuatro secciones: hidrogenación del acetileno, destilación extractiva, purificación del butadieno y del solvente.

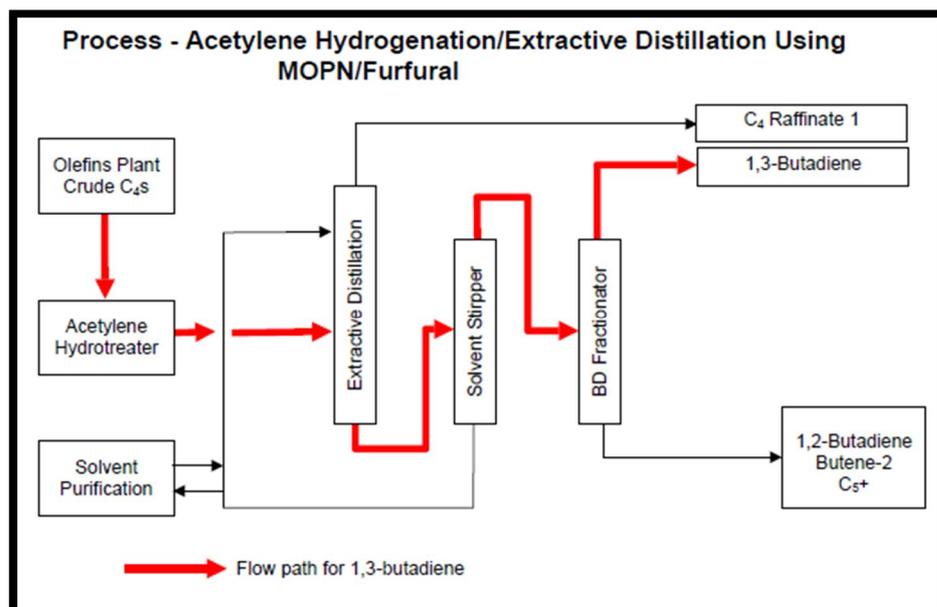


Figura. MD.9. Proceso con MOPN/furfural para purificación de butadieno. (American Chemistry Council. *Butadiene Stewardship Guidance Manual*, 2001 )

Se presenta en la Figura MD.9 el proceso donde las flechas gruesas indican el camino seguido por el componente de interés, 1,3-butadieno. La función de la hidrogenación del acetileno es eliminar tales componentes, que podrían, de otra manera contaminar el producto final. En la columna de destilación extractiva, se vaporizan todos aquellos componentes ligeros que no solubilizan en el agente extractante y forman el refinado C<sub>4</sub>, (traducido directamente de “C<sub>4</sub> Raffinate 1”), conteniendo butano, isobuteno y algunos butenos. El producto de colas contiene el agente extractante en el que se ha solubilizado el 1,3-butadieno y el cis-2-buteno, principalmente.

Se sigue la purificación del butadieno, lo que tiene lugar en las dos siguientes unidades. En primera instancia se separa el solvente por colas y se purifica en una unidad aparte, previa recirculación; del butadieno que contiene trazas de cis-2-buteno y algunos otros butenos. En la operación subsiguiente se obtiene un butadieno purificado de tales trazas.

- Destilación convencional y extractiva con NMP

Este proceso, patentado por la compañía *Badische Anilin und Soda Fabrik (BASF)*, combina las operaciones de destilación extractiva y convencional. La primera emplea disolvente NMP, siendo la presión máxima del proceso unos 7 bar y la temperatura más elevada 150 °C. En la destilación extractiva, (torres de lavado principal, rectificación y lavado posterior en la Figura MD.10), los butanos y butenos son separados del butadieno, acetilenos y otros hidrocarburos pesados, solubles en el extractante. Dicho extractante, conteniendo el componente de interés, se desgasifica en una torre calentada por vapor donde los acetilenos son retirados como corriente lateral, recuperándose el solvente que se recircula.

El butadieno abandona por cabeza la última torre de destilación extractiva y se dirige a un tren de destiladores extractivos que separan los últimos componentes, de una volatilidad relativa mayor que los separados. La Figura MD.10 muestra el proceso:

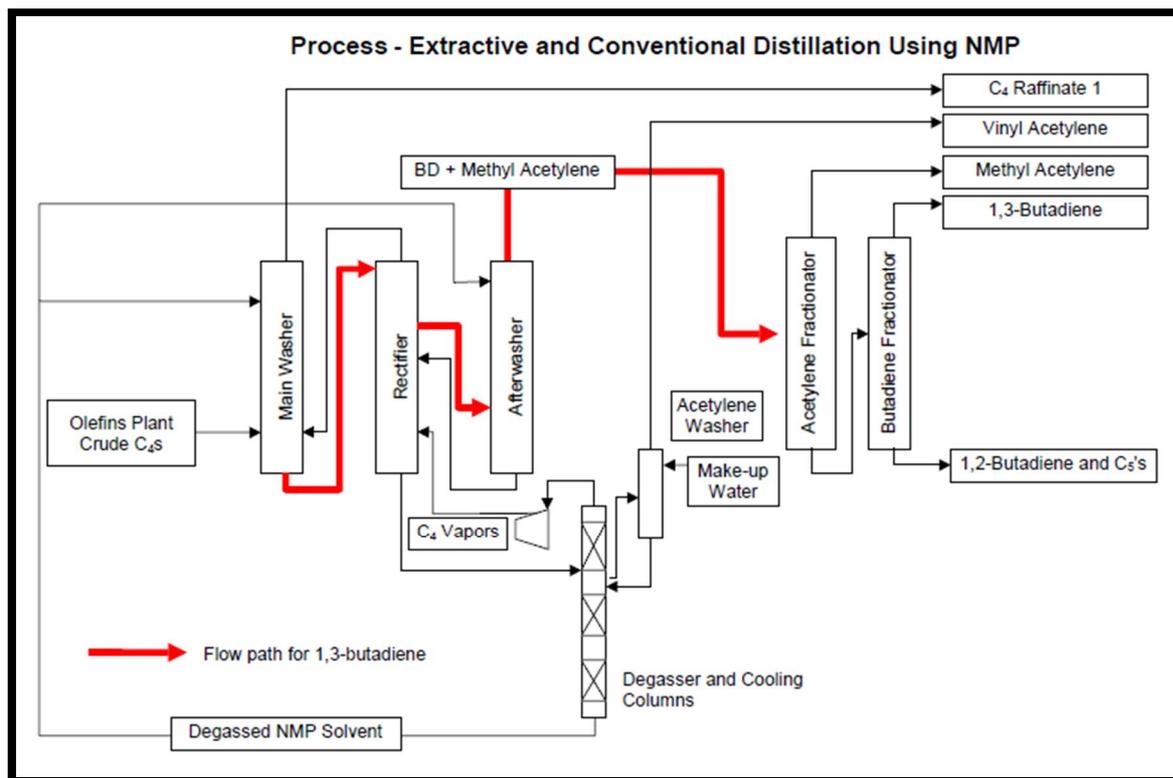


Figura. MD.10. Proceso *BASF* para purificación de butadieno.

(*American Chemistry Council. Butadiene Stewardship Guidance Manual, 2001*)

- Extracción con DMF

Este procedimiento, patentado por *Nippon Zeon*, consta de cuatro secciones: primera y segunda destilaciones extractivas, purificación del butadieno y del extractante.

En la primera extractiva se alimentan el extractante y el butadieno crudo, obteniéndose dos fracciones: el refinado C<sub>4</sub> de butanos y butenos por cabeza y el producto de cola conteniendo el solvente rico en producto de interés y acetilenos. La segunda extractiva corta la cola de la operación anterior en una corriente de cabeza rica en butadieno y metilacetileno y una de cola conteniendo nuevamente el solvente rico en vinilacetileno, más soluble en el extractante que los dos anteriores. Dos columnas de destilación adicionales son necesarias para separar de la cabeza de la segunda extractiva el butadieno. Las colas de las extractivas se separan en una operación adicional

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Memoria descriptiva

para recuperar y purificar el solvente que queda así en constante circulación. La siguiente figura ilustra lo descrito:

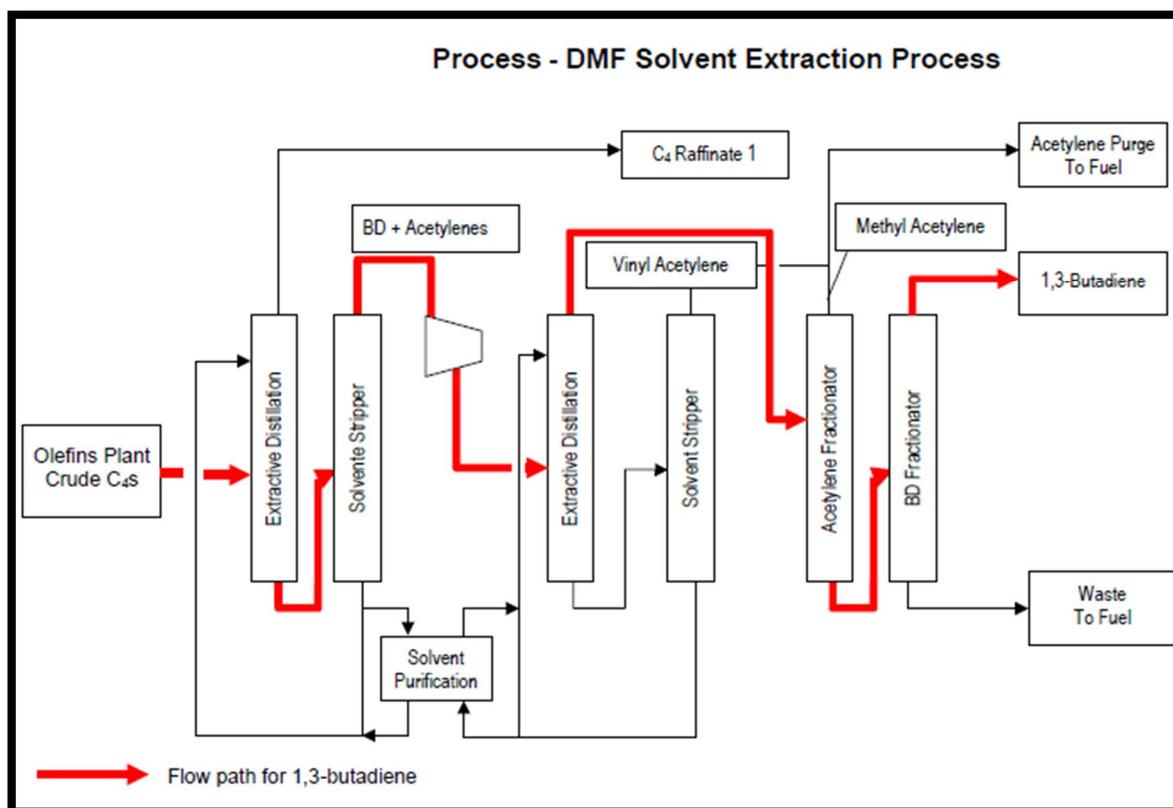


Figura. MD.11. Proceso con DMF para purificación de butadieno. (*American Chemistry Council. Butadiene Stewardship Guidance Manual, 2001* )

- Separación acuosa y extracción con ACN.

Este proceso, patentado por *Shell* y *LyondellBasell Industries*, implica nuevamente una destilación extractiva: la separación se logra en un solución acuosa del solvente ACN, cortando el butadieno crudo alimentado en una corriente de cabeza que contiene el refinado C<sub>4</sub> y otra de cola conteniendo el butadieno y los acetilenos disueltos en el solvente. El procedimiento de separación posterior es bastante similar a lo mostrado en las anteriores alternativas, con leves diferencias que encuentran mejor explicación gráfica que escrita en la figura que sigue:

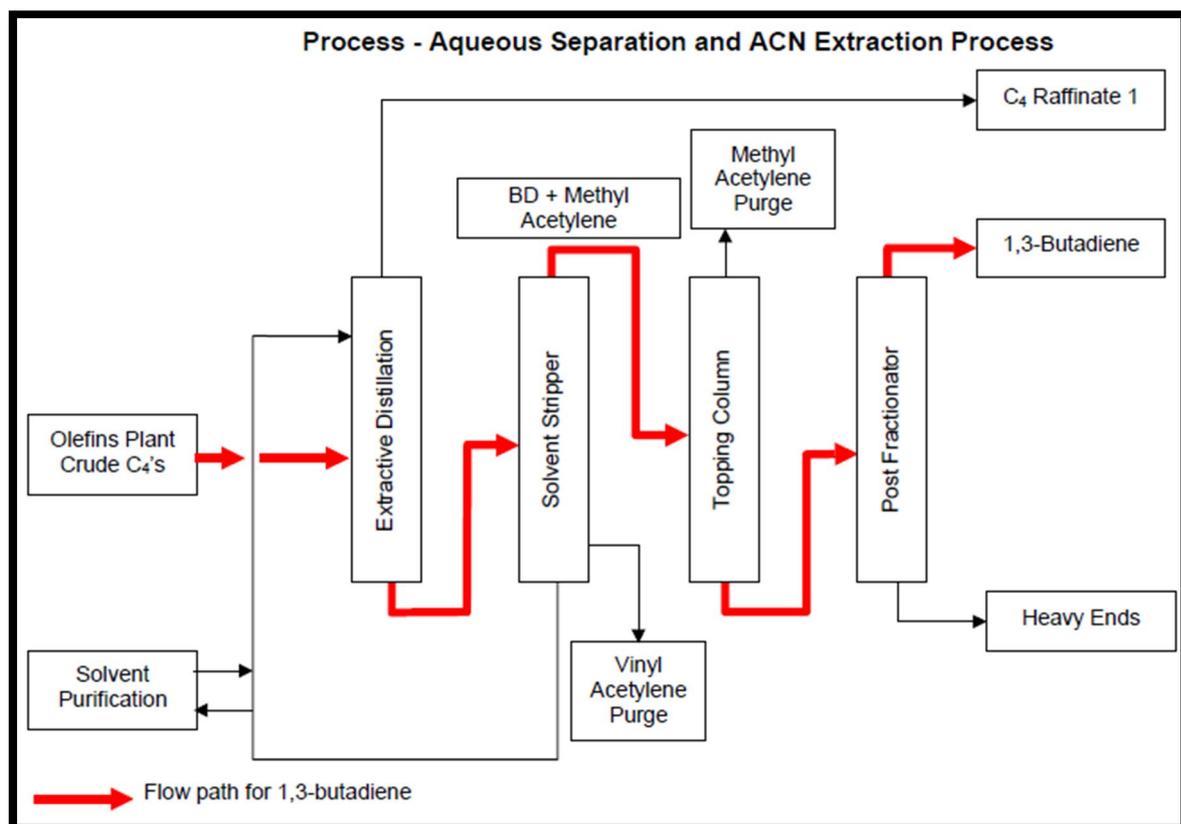


Figura. MD.12. Proceso con ACN para purificación de butadieno. (American Chemistry Council. Butadiene Stewardship Guidance Manual, 2001 )

En el caso proyectado, la selección del proceso se ha basado en la inclusión de la hidrogenación de los acetilenos en la pirólisis con vapor, conducente a la obtención del butadieno crudo. Por ello, el procedimiento más afín es el primero, con extractante en fase acuosa MOPN/furfural. En el apartado que sigue se presenta el fundamento del proceso seleccionado.

#### MD.C1.2.5. El proceso seleccionado

Conocidas las estrategias, tanto de producción de la corriente de butadieno crudo como de purificación del butadieno comercial, se hace preciso decidir la más idónea para las condiciones de contorno supuestas.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Memoria descriptiva

La alimentación al proceso consistirá en una fracción de butenos generada mediante un proceso de pirólisis con vapor, cuya composición y condiciones se listan en la siguiente tabla:

Composición del butadieno crudo (% en peso)					
1,3-Butadieno	i-Buteno	1-Buteno	cis-2-Buteno	i-Butano	n-Butano
43	26	16	10	4	1
	P (atm)	2,5	T (°C)	20,4	

Tabla. MD.II. Composición y condiciones de la alimentación

El proceso propuesto se muestra en la siguiente figura:

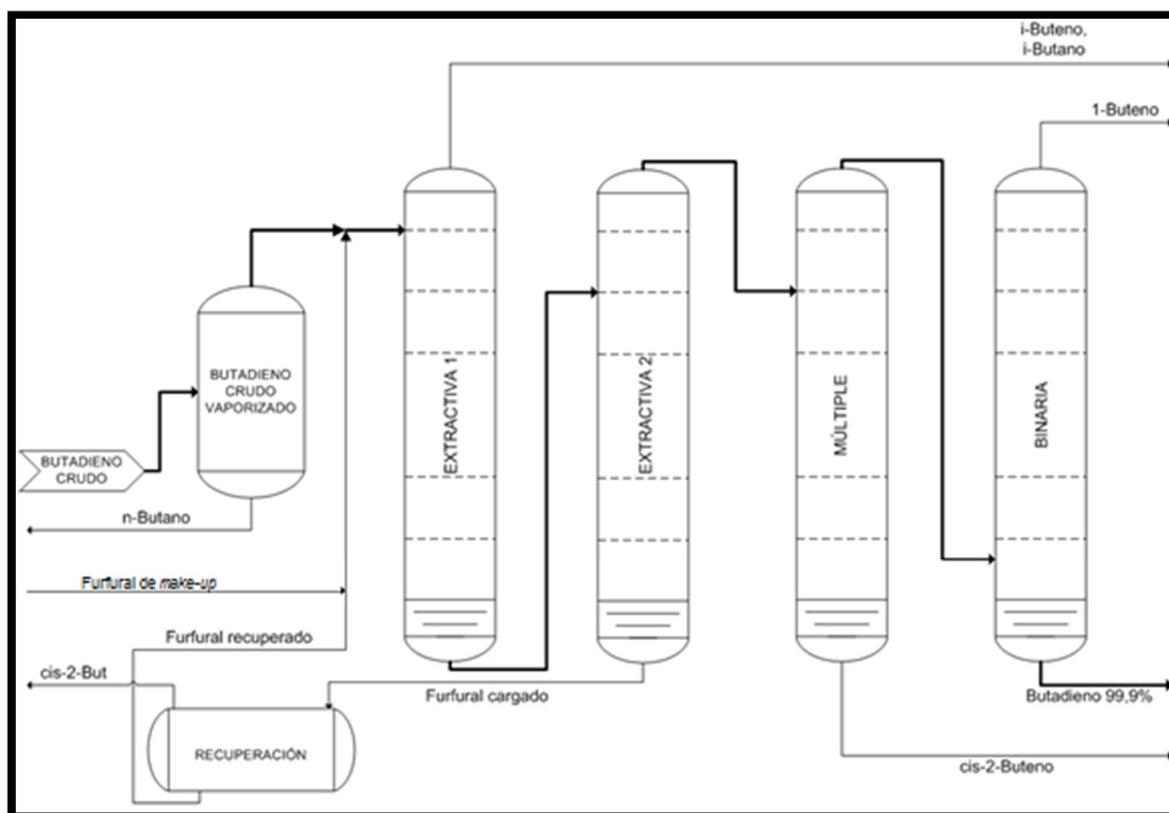


Figura. MD.13. Diagrama simplificado del proceso propuesto para purificación de butadieno. (Elaboración propia)

Donde el butadieno crudo, conteniendo una baja composición en butano lineal, se vaporiza, en una primera operación denominada "SIMPLE", con la intención de generar un vapor libre de dicho componente. El líquido obtenido contiene el suficiente butano como para

---

considerar despreciable su participación en la corriente principal. No en vano, el líquido de esta primera operación presenta una composición bastante similar a la alimentación.

El vapor, en combinación con el agente extractante se alimenta la operación de destilación extractiva, denominada “EXTRACTIVA 1”. Ésta corta la corriente de entrada en un destilado rico en los componentes ramificados y un residuo que contiene el solvente que ha solubilizado los componentes más pesados: cis-2-buteno y 1-buteno además del componente de interés.

Seguidamente procede la separación del extractante, lo que sucede en la operación “EXTRACTIVA 2”. En ésta, el destilado contiene la mayor parte del butadieno mezclado con 1-buteno y alguna cantidad de cis-2-buteno, mientras que el residuo contiene fundamentalmente el extractante que debe purificarse en la operación “RECUPERACIÓN”, previa recirculación a “EXTRACTIVA 1”. No puede evitarse la pérdida de parte del extractante, por lo que se añade una corriente fresca o de *make-up* a la recuperada, lo que requerirá la instalación de un tanque de extractante fresco en el área de procesos.

El destilado de “EXTRACTIVA 2” debe minimizar su contenido tanto en cis-2-buteno como en 1-buteno. El primero se elimina en la unidad subsecuente, “MÚLTIPLE”, una operación de destilación convencional multicomponente. El residuo es prácticamente puro en cis-2-buteno, mientras que el destilado ha eliminado la casi totalidad de este compuesto y consiste en una mezcla binaria de 1-buteno y butadieno.

Finalmente, la mezcla anterior se rectifica en una última destilación convencional, “BINARIA”, que procura una corriente de destilado rica en 1-buteno y rinde el producto de interés purísimo, como residuo de la misma, al 99,9% en peso. Su almacenamiento requerirá un tanque esférico apartado del área de procesos.

Sobre la Figura MD.13, se ha indicado el camino recorrido por el componente de interés mediante líneas gruesas de flujo. El extractante elegido, es el compuesto furfural, debido a las mejores condiciones de separación que ofrece, en comparación con NMP, y que serán debidamente justificadas en los anexos de cálculo.

En resumen, el proceso propuesto, basado en la recopilación de datos sobre el estado del arte, involucra una destilación extractiva y dos convencionales, además de dos procesos de destilación de etapa simple, uno para la vaporización del butadieno crudo y otro para la recuperación del extractante. Aunque se han denominado dos operaciones por la designación “EXTRACTIVA”, *sensu stricto* sólo la “EXTRACTIVA 1” es una operación de destilación extractiva, entendiéndose ésta por aquel proceso en el que la alimentación, (mezclada previa a su entrada o durante su trasiego por la unidad), toma contacto con un tercer agente que aumenta las volatilidades relativas de los componentes. Por su parte, la “EXTRACTIVA 2” es una operación de separación de la corriente rica en el extractante, no una destilación extractiva propiamente dicha, (lo que en argot de refinería se conoce como *stripping*).

El diagrama que presenta la Figura MD.13 es simplificado en el sentido de que muestra las operaciones haciendo alegoría al aparato que las desempeña, (recipientes separadores gas-líquido y torres de platos), si bien no incluye el número de aparatos implicados ni las interconexiones requeridas. Se emplaza al lector a una primera observación al plano que presenta el diagrama de flujo del proceso, siquiera con la intención de tomar contacto con la descripción de los procesos y unidades que los llevan a la práctica, que se irán desgranando a lo largo de la presente memoria descriptiva y se justificarán convenientemente en los anexos de cálculo.

Sin perjuicio de lo antedicho: el diagrama presentado es una aproximación grosera del proceso proyectado, se puede formar una idea del potencial de la planta, no sólo por la obtención de una corriente de butadieno purísimo al 99,9%, de una calidad superior al

butadieno comercial, (las mejores plantas, que siguen el proceso *BASF*, proporcionan un rendimiento del 99,5%); sino también por la obtención paralela de corrientes de interés para distintos procesos de refinería:

- El líquido de la operación de vaporización puede reciclarse al proceso de pirólisis con vapor, lo que disminuiría la carga de nafta alimentada, reduciendo el consumo de dicho proceso.
- Otra opción de aprovechamiento del mismo líquido podría consistir en la mezcla con la alimentación, modificando las condiciones de operación del proceso de pirólisis con vapor, de modo que se garantice una alimentación de butadieno crudo homogénea. Esta actuación reduciría el consumo de alimentación fresca del proceso.
- La corriente mayoritaria de *i*-buteno e *i*-butano, podría utilizarse de carga a la unidad de alquilación de refinería, al objeto de convertir ambos componentes en *i*-octano, un compuesto que mejora el poder antidetonante de la gasolina. Se trata ésta de una de las posibles reacciones que mejoran el octanaje, aunque no la única. (Véase la Figura MD.14).
- Otra opción de aprovechamiento de la anterior corriente sería cargarla a la unidad de ETBE, conducente a la obtención del etil-terc-butiléter, un aditivo antidetonante de las gasolinas, que requiere la reacción entre *i*-buteno y etanol.
- Las corrientes ricas en *cis*-2-buteno podrían tratar de comercializarse como precursoras de polímeros, si bien, por su escasa cantidad, la opción más viable será la mezcla con el líquido de vaporización, a fin de ahorrar alimentación a la pirólisis con vapor o a la purificación del butadieno.
- La corriente rica en 1-buteno podría mezclarse con las anteriores con idéntico propósito, o evaluarse la posibilidad de carga a la unidad de alquilación: el 1-buteno puede formar alquilatos, lo que no se verá entorpecido por el butadieno, poco reactivo por la resonancia de sus enlaces. En todo ca-

so, el butadieno también aumenta el poder antidetonante de las gasolinas, aunque, por especificaciones legales deberá limitarse.

Como puede comprobarse, el abanico de posibilidades que abren los efluentes del proceso es de una complejidad suficiente como para plantear distintos proyectos. Valga este apartado para centrar la atención, siquiera someramente, en la importancia relativa de las unidades y corrientes implicadas, tanto las requeridas como las entregadas. Se sigue la decisión sobre la ubicación de la planta, el objeto del proyecto y su justificación, para concluir el capítulo introductorio.

#### MD.C1.2.6. Ubicación

El proceso de purificación del butadieno supone una compleja interrelación de operaciones de separación gruesa y química fina. Se trata de un proceso fuertemente dependiente de la homogeneidad de la alimentación, dado que la obtención de la corriente purísima requiere una estabilidad que garantice la composición.

Contrasta con el proceso de destilación del crudo, más abierto a la variabilidad de la carga alimentada, ya que los cortes de crudo deben estar comprendidos entre ciertos puntos de ebullición: es imposible mantener una composición homogénea y, por ello, las especificaciones comerciales, y legales en que se basan, establecen intervalos de composición de determinados componentes en los carburantes y combustibles. En este caso, no se establece un intervalo de composición sino que se requiere una composición concreta y estable, por mor del cumplimiento de los contratos comerciales contraídos una vez el producto compita en el mercado.

Este razonamiento justifica la decisión de situar la planta en las proximidades de una refinería. En concreto, las siguientes razones recomendarían el emplazamiento en los terrenos de la *Refinería Gibraltar-San Roque*, propiedad de la *Compañía Española de Petró-*

---

leos, *CEPSA*, sita en el término municipal de San Roque en la provincia de Cádiz:

- El proceso de purificación requiere el diseño de una planta de pirólisis con vapor, (inexistente en tal Refinería), que a su vez se alimenta de corrientes propias de una refinería.
- Los coproductos pueden utilizarse como recirculación a la alimentación de cualquiera de las plantas, (pirólisis con vapor y purificación), si bien también pueden cargarse a distintos procesos ya presentados propios de una refinería (y, a la sazón disponibles en la planta seleccionada), obteniendo réditos económicos.
- Más específicamente, la situación privilegiada de la *Refinería Gibraltar-San Roque*, (disponibilidad de puerto propio e infraestructura terrestre de transporte solvente), facilita el flujo de entrada y salida de productos.

Las implicaciones que deben considerarse por la erección de una planta de las características descritas incluyen:

- Estimulación del mercado laboral de la zona.
- Posibilidad de encontrar o motivar clientes en la zona.
- Posibilidad de percepción de ventajas económicas y fiscales que pudieran otorgar las autoridades locales y nacionales competentes.
- Renuencia de los vecinos de las poblaciones cercanas a la ampliación del polo químico por los riesgos vinculados a la seguridad y el medioambiente que conllevaría la misma.

El mercado laboral se ve estimulado tanto directa como indirectamente, ya que se requiere mano de obra cualificada, (operarios de campo, panelistas, ingenieros de proceso y de proyectos, oficiales de mantenimiento, etc.) y de diversa índole: transportistas, empleados de restauración, limpieza, lavado de ropa de trabajo, etc., puestos indirectos generados por la actividad principal.

La simbiosis entre el personal propio de Refinería y el contratado externamente garantiza la satisfacción de las cargas de trabajo mínimas, habituales y de pico que conllevaría el desempeño de la nueva planta. Las empresas contratistas presentes en el sector son suficientes, por más que la actual crisis económica asegura la voluntad de desempeñar un oficio de operarios cualificados, actualmente en situación de desempleo.

La producción de butadieno purísimo puede dedicarse íntegramente a la exportación tanto nacional como internacional si bien, podría plantearse la viabilidad de desarrollo de una planta de proceso que involucre alguna de las ramas productivas derivadas del butadieno, descritas en el apartado MD.C1.2.3. En todo caso, por cercanía de suministro y por la calidad del producto, no es descartable la posibilidad de inversión externa en la zona en este sentido.

Será preciso realizar una labor de acercamiento a la sociedad de las bondades de la nueva planta y el escaso riesgo derivado de una operación segura. La concienciación colectiva es fundamental en aras de la recuperación económica incidiendo en su aspecto crítico: la generación de empleo.

Efectuadas todas las consideraciones mencionadas y, considerando la disponibilidad de terrenos, (véase plano de hipotética ubicación), se decide la implantación de la planta en el recinto de la *Refinería Gibraltar-San Roque*, debido a las siguientes razones que satisfacen y concretan las motivaciones descritas:

- Polo industrial importante: La Refinería es uno de los corazones del polo industrial de Algeciras.
- Proximidad entre los puntos de servicio de la alimentación, (butadieno crudo) y descarga de corrientes de coproductos a la misma refinería. Ello supone un ahorro logístico importante frente a una situación de instalación aislada.
- Infraestructura de comunicaciones y transportes solvente: las autovías A-7 y A-381 conectan con las capitales más

cercanas, Málaga y Jerez y Sevilla respectivamente; la línea férrea comunica el puerto de Algeciras, (el más productivo de España), con la capital Madrid y está pendiente de mejora. Adicionalmente, la Refinería dispone de puntos de atraque en su propio puerto para la carga y descarga de mercancías.

- Disponibilidad de servicios: La Refinería proveería de la red de vapor, condensados, eléctrica, de aire para instrumentos, aceite para bombas, saneamiento y tratamiento de aguas residuales, (TAR), etc.
- Disponibilidad de terrenos: Se ha seleccionado un emplazamiento, con una superficie suficiente para la ubicación en planta estimada, situado entre la planta de Guadarranque y el área de almacenamiento de la Refinería, limitado por las carreteras internas de la misma y apartado de las ruinas romanas de Carteya, emplazadas al sur.
- Disponibilidad de mano de obra: La tradición industrial de la zona asegura la existencia de mano de obra cualificada suficiente.

#### MD.C1.2.7. Objeto

El presente PFC describirá la **pre-ingeniería básica** de una planta de purificación de 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas. Por pre-ingeniería básica se entiende aquél diseño que involucra de forma sucinta las unidades, (sin precisar sus detalles), que componen un proceso, presentando los balances de materia y un estudio de viabilidad económica, que a la sazón, será cubierto por el presupuesto del presente PFC. Su intención es proporcionar a un hipotético departamento de proyectos una solución grosera a un problema multidisciplinar.

En este caso, el problema consistiría no sólo en garantizar la pureza exigida al butadieno, sino decidir la estrategia de utilización de las corrientes de coproductos, proporcionar unas directrices con-

cretas de control de procesos, estudios someros de medio ambiente y seguridad e higiene laboral, entre otras responsabilidades. En ningún caso este PFC abordará tales tareas hasta completar los requisitos exigidos por una ingeniería básica, (lo que para una sola persona con medios técnicos limitados supone una tarea de tintes épicos por la complejidad y tiempo necesario), y, por tal razón, la importancia de este apartado es vital en lo tocante a definir el grado de descripción que alcanzará el proyecto. En los siguientes párrafos se clarificará este particular.

Se entenderá que se dispone de una planta de pirólisis con vapor previa a la proyectada. En todo caso se dispondrá de una corriente de butadieno crudo de las características especificadas en la Tabla MD.II, y en una cuantía de **1170 kt/año (21151 Mmol/año)**, que hará las veces de alimentación del proceso. No será responsabilidad del PFC en absoluto el acondicionamiento de la misma, su impulsión o eventual almacenamiento, recayendo tal en el proyecto que precedería al actual PFC.

Por mor de su vocación como pre-ingeniería básica, la estrategia de inversión de las corrientes de coproductos escapa a los objetivos del PFC. Para su justificación económica, se supondrá que todas las corrientes se mezclarán y devolverán a la planta previa a la proyectada, de modo que las cuentas económicas de la proyectada arrojen un balance positivo, al margen de posibles optimizaciones.

En ningún caso será objeto del presente PFC el acondicionamiento de las corrientes de coproductos ni su almacenamiento, únicamente su bombeo a la distancia estipulada en la ubicación en planta estimada.

No será objeto del PFC, asimismo, el diseño en profundidad de los cambiadores de calor, toda vez que, esta tarea es susceptible de un proyecto separado en aras de optimizar la gestión energética de la futurible planta. En contraste, será objeto del PFC proporcionar los criterios básicos de selección de cambiadores y calcular los calores y

---

áreas de intercambio requeridos, al objeto de la estimación de su coste.

Será objeto del proyecto la resolución de balances de materia de todas las unidades de separación, así como su dimensionamiento y diseño mecánico. No así la red de intercambiadores de calor que, por su complejidad podría constituir proyecto aparte.

Se proporcionará, la composición y condiciones de temperatura y presión de cada línea de operación y, en función de éstas se decidirán aspectos tales como: calores involucrados en los cambiadores, (lo que llevará a la estimación del área de transferencia con miras al establecimiento de una partida presupuestaria), potencia de bombeo requerida, (que permitirá seleccionar las bombas pertinentes), dimensiones de los tanques de almacenamiento diseñados para el proceso, producto terminado y extractante fresco, entre otros.

El nivel de descripción de cada uno de los conceptos anteriores, se ampliará convenientemente en los anexos correspondientes.

Será objeto del PFC la resolución de recirculaciones internas que garanticen la homogeneidad de la composición de las corrientes críticas, esto es, se planteará una estrategia de recirculación de corrientes de coproductos que permita, en primer lugar reducir el consumo de alimentación y, en segundo la reducción del aporte de extractante fresco a la mínima expresión. Ello se logrará mezclando todas las corrientes, como se indicará y justificará a lo largo de la memoria descriptiva y anexos, en un tanque diseñado al efecto.

En definitiva, el objeto del proyecto es garantizar un aporte de **200 kt/año (aproximadamente 3713 Mmol/año) de butadieno al 99,9% en peso**, de modo tal que se obtenga el mayor beneficio comercial, garantizando una amortización a la mayor brevedad posible.

En este apartado se han indicado de forma genérica los alcances de lo diseñado. Sin perjuicio de lo aquí descrito, en adelante y

siempre que sea necesario, se efectuarán las pertinentes acotaciones o ampliaciones al objeto del PFC que correspondan.

### MD.C1.2.8. Justificación

El butadieno, componente de interés de la planta proyectada, es un producto químico del que penden distintas familias de intermedios y bienes de consumo en la industria petroquímica. Se ha pretendido hacer notar la importancia del mismo por presentación de la variedad de productos que dependen de éste, y por la actividad industrial que, por ende, genera.

En España sólo una planta, perteneciente a la empresa petroquímica *REPSOL*, oferta butadieno a la demanda interna, produciendo exactamente la misma cantidad que la proyectada por el PFC.

En un contexto más amplio, la oferta mundial de butadieno, unos 9 millones de toneladas anuales, fluye desde los países eminentemente exportadores, Canadá, Europa del Este, Arabia Saudí y Corea, a los importadores México, Estados Unidos y China. En la próxima década es de esperar un aumento del 3% de la demanda mundial, por lo que el volumen de negocio en torno al butadieno se espera que incremente en el corto a medio plazo. La situación europea es de escasez de suministro y, por ende, fuerte demanda.

Este hecho justifica, no sólo por el beneficio comercial, sino también social, por la estimulación de la economía de la región donde se ubicaría la planta proyectada. El precio del butadieno es bastante estable, así como el del butadieno crudo, lo que garantiza unos márgenes seguros de ganancia, lo que junto a una cartera de clientes, tanto industriales como laboratorios por la calidad purísima del butadieno producido, en España y el resto de una Europa deficitaria en este producto; son argumentos suficientes para acometer una inversión inicial que, como se podrá comprobar en el presupuesto, es relativamente gravosa.

Una vez definidos los alcances y justificadas las motivaciones que llevan al diseño de la planta objeto del PFC, se da por concluido este primer capítulo introductorio y se da paso a los propiamente descriptivos.



---

## **Capítulo MD.C2. Descripción de las corrientes**

### **MD.C2.1. Capacidad y funcionamiento de la planta**

La planta para purificación de butadieno está concebida para alcanzar una producción nominal de 200 miles de toneladas anuales al 99,9%.

Para un funcionamiento continuado de 24 horas diarias a lo largo de 365 días, (8760 horas), se logra, en efecto, una cantidad algo superior a la proyectada: 200,8 miles de toneladas anuales al 99,9%, (22,9 t/h), lo que supone un consumo de butadieno crudo, tal como se apuntó en el objeto del PFC, de 1170 kt/año.

Ahora bien, en previsión a posibles paradas y tareas rutinarias de limpieza y mantenimiento, la capacidad útil de la planta se reducirá a la correspondiente a 350 días de funcionamiento, (8400 h a ritmo de 24 horas diarias), ocupándose los 15 días restantes a tareas de mantenimiento.

Los equipos presentan una capacidad de funcionamiento variable en el tiempo, por lo que se requerirá la implantación de un plan de inspecciones que coordine las tareas de mantenimiento, que nunca se centrarán en solventar grandes reparaciones que involucren la planta completa, sino aquéllas secciones más tendentes al fallo.

Debe justificarse la previsión de 15 días anuales para estas tareas como suficiente, debido al benigno carácter de los componentes químicos involucrados no corrosivos, por lo que deberá prestarse especial atención al control de fugas en tuberías y accesorios, lo que puede llevarse a término sin necesidad de detener el normal funcionamiento de la planta.

Para su capacidad de producción útil, el caudal alimentado disminuye a 1122 kt/año, mientras que la producción de butadieno al 99,9% cae a 192,5 kt/año, (22,0 t/h).

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Memoria descriptiva

Las estrategias en el marco de Refinería consisten en reducir al máximo las paradas de emergencia, por implantación de un plan estratégico de mantenimiento e inspección que retrasen al máximo la necesidad de una parada, lo que aumenta la competitividad productiva. En este sentido, los cálculos realizados han supuesto funcionamiento nominal, puesto que de no ser estrictamente indispensable, se evitarán las paradas de las unidades, adquiriendo éstas un carácter excepcional más que regular.

Por último, debe señalarse la posibilidad de forzar la planta hasta su límite de diseño, establecido en 1186 kt/año de alimentación, lo que rendiría 203,6 kt/año de butadieno al 99,9%, a 8760 horas de funcionamiento y 195,2 kt/año a 8400 horas, previendo parada de 15 días. (23,2 y 22,3 t/h respectivamente). Como puede observarse, el proceso está bastante ajustado, (sólo puede aumentarse la alimentación un 1,36%), por lo que su funcionamiento típico será el nominal en años en que no se precisen paradas y útil, en tales años. Excepcionalmente, por requerimientos comerciales podrá aumentarse la producción hasta los valores indicados. Se resume lo antedicho en la siguiente tabla, donde también se indica el consumo de extractante en cada uno de los escenarios de operación.

	Nominal	Útil	Forzado	Forzado
	8760 h	8400 h	8760 h	8400 h
Alimentación (kt/año)	1170	1122	1186	1153
Butadieno 99,9% (kt/año)	200,8	192,5	203,6	195,2
Furfural en arranque (kt/3 día)	2,7	2,6	2,8	2,6
Furfural de <i>make-up</i> (kt/año)	6,9	6,6	7,0	6,7
<b>Resumen de capacidad de la planta en distintos escenarios</b>				

Tabla. MD.III. Regímenes de funcionamiento: consumos y producción

Donde el consumo de extractante furfural difiere en arranque de la planta, (cuando debe aportarse íntegramente) y situación de reposición: cuando la planta funciona en estacionario recupera la mayor parte del extractante, siendo minimizado el aporte de furfural fresco requerido, o *make-up*.

Aclaración aparte merece la unidad en que se expresa el consumo de furfural en arranque. Según consejo técnico de profesionales del sector petroquímico\*, la transición del estado de arranque, o transitorio, al estacionario, esto es, el tiempo que media entre el inicio de una operación hasta la estabilización de las variables de proceso, en la horquilla próxima a sus pertinentes valores de consigna; se puede fijar en 3 días como regla empírica. Por tal razón, se ha proporcionado el consumo de extractante a 3 días, que, sumado al consumo fijo de *make-up*, resultan el total requerido anual cuando proceda parada de planta, (en año de funcionamiento ininterrumpido, no procederá el consumo en arranque).

### **MD.C2.2. Descripción de las corrientes principales**

En la presente sección se efectuará la descripción de las consideradas corrientes principales del proceso que, atendiendo a la Figura MD.13 son las que siguen:

- Alimentación de butadieno crudo, L<sub>0</sub>.
- Alimentación vaporizada, V.
- Líquido separado de la alimentación, L.
- Mezcla de la alimentación vaporizada y el extractante, U.
- Destilado de "EXTRACTIVA 1", D.
- Residuo de "EXTRACTIVA 1", W.
- Destilado de "EXTRACTIVA 2", E.
- Residuo de "EXTRACTIVA 2", X.
- Destilado de "MÚLTIPLE", G.
- Residuo de "MÚLTIPLE", Y.
- Destilado de "BINARIA", H.
- Residuo de "BINARIA", Z.
- Extractante recuperado, L'.
- Vapor residual de "RECUPERACIÓN", V'.
- Extractante de *make-up*, M.

---

\* El proyectista cursó, paralelamente a la elaboración del PFC, un Curso de Experto en el refino del petróleo y disfrutó de acceso a información sobre operación real en el sector.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Memoria descriptiva

La denominación por letras corresponde a la que se aplicará en la solución de balances de materia en los anexos de cálculo. Seguidamente se muestra el diagrama de la Figura MD.13 actualizado.

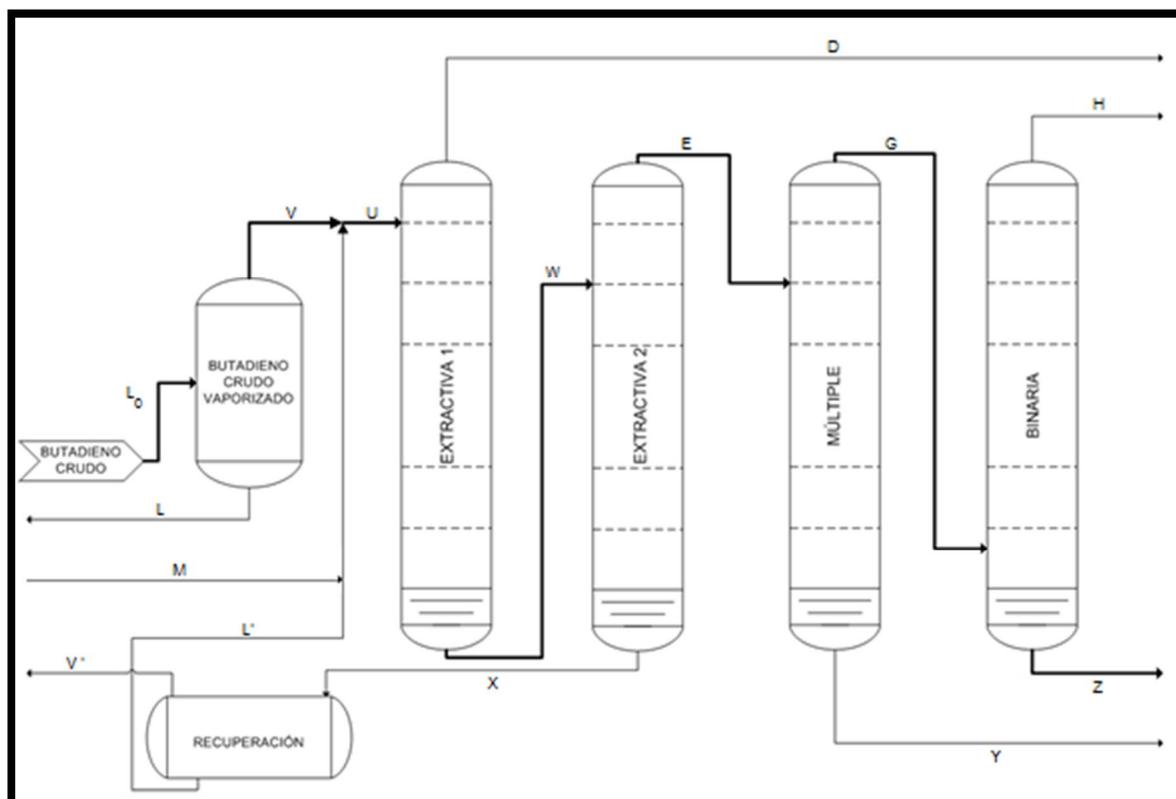


Figura. MD.14. Diagrama simplificado del proceso propuesto para purificación de butadieno. Identificación de corrientes principales (*Elaboración propia*)

Se prosigue con el resumen de las características principales de las corrientes: caudal, composición y condiciones de temperatura y presión.

### MD.C2.2.1. Alimentación de butadieno crudo

La alimentación al proceso de purificación del 1,3-butadieno consiste en una corriente de butadieno crudo de características semejantes a las indicadas en el capítulo previo. Será proporcionada por una planta de pirólisis con vapor de naftas y presentará las siguientes características:

Corriente de alimentación ( $L_0$ )					
Condiciones		Términos molares		Términos másicos	
T (K)	293,52	$x_1$	0,439	$x_{m1}$	0,43
P (atm)	2,5	$x_2$	0,256	$x_{m2}$	0,26
Fase	Líquido	$x_3$	0,157	$x_{m3}$	0,16
		$x_4$	0,103	$x_{m4}$	0,10
		$x_5$	0,036	$x_{m5}$	0,04
		$x_6$	0,010	$x_{m6}$	0,01
		$Q_1$ (Mmol/año)	9291,249	$Q_{m1}$ (kt/año)	502,582
		$Q_2$ (Mmol/año)	5407,123	$Q_{m2}$ (kt/año)	303,383
$Q_3$ (Mmol/año)	3324,861	$Q_{m3}$ (kt/año)	186,551		
$Q_4$ (Mmol/año)	2173,107	$Q_{m4}$ (kt/año)	121,929		
$Q_5$ (Mmol/año)	752,004	$Q_{m5}$ (kt/año)	43,709		
$Q_6$ (Mmol/año)	202,320	$Q_{m6}$ (kt/año)	11,760		
<b>Caudal (Mmol/año)</b>	<b>21150,663</b>	<b>Caudal (kt/año)</b>	<b>1169,914</b>		

Tabla. MD.IV. Datos de la corriente de alimentación

Donde los subíndices corresponden, por el siguiente orden a: 1,3-butadieno, isobuteno, 1-buteno, cis-2-buteno, isobutano y n-butano del 1 al 6 respectivamente. Se mantendrán hasta próxima indicación. Las composiciones molares se notan por  $x_i$ , las fracciones másicas, o razones entre los caudales másicos individuales y el caudal másico total, por  $x_{mi}$  y los caudales molares y másicos individuales de cada sustancia en la corriente, por  $Q_i$  y  $Q_{mi}$  respectivamente.

#### MD.C2.2.2. Alimentación vaporizada

Se trata ésta corriente del vapor saliente del separador gas líquido que alimenta la primera destilación extractiva del proceso. Su denominación corresponde a V y sus características se presentan análogamente en la tabla que sigue:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Memoria descriptiva

Corriente de alimentación vaporizada (V)					
Condiciones		Términos molares		Términos másicos	
T (K)	293,52	$y_1$	0,440	$y_{m1}$	0,43
P (atm)	2,5	$y_2$	0,262	$y_{m2}$	0,27
Fase	Vapor	$y_3$	0,159	$y_{m3}$	0,16
		$y_4$	0,091	$y_{m4}$	0,09
		$y_5$	0,039	$y_{m5}$	0,04
		$y_6$	0,009	$y_{m6}$	0,01
		$Q_1$ (Mmol/año)	5823,637	$Q_{m1}$ (kt/año)	315,012
		$Q_2$ (Mmol/año)	3467,477	$Q_{m2}$ (kt/año)	194,553
		$Q_3$ (Mmol/año)	2097,738	$Q_{m3}$ (kt/año)	117,700
		$Q_4$ (Mmol/año)	1206,451	$Q_{m4}$ (kt/año)	67,692
		$Q_5$ (Mmol/año)	515,288	$Q_{m5}$ (kt/año)	29,950
		$Q_6$ (Mmol/año)	123,151	$Q_{m6}$ (kt/año)	7,158
<b>Caudal (Mmol/año)</b>	<b>13233,741</b>	<b>Caudal (kt/año)</b>	<b>732,065</b>		

Tabla. MD.V. Datos de la corriente de alimentación vaporizada

En este caso sólo se ha reemplazado la letra y por la x para indicar que la corriente es un vapor. Los componentes mantienen el orden indicado en el apartado anterior.

### MD.C2.2.3. Líquido separado de la alimentación

Corriente de líquido separado de la alimentación (L)					
Condiciones		Términos molares		Términos másicos	
T (K)	293,52	$x_1$	0,438	$x_{m1}$	0,43
P (atm)	2,5	$x_2$	0,245	$x_{m2}$	0,25
Fase	Líquido	$x_3$	0,155	$x_{m3}$	0,16
		$x_4$	0,122	$x_{m4}$	0,12
		$x_5$	0,030	$x_{m5}$	0,03
		$x_6$	0,010	$x_{m6}$	0,011
		$Q_1$ (Mmol/año)	3467,612	$Q_{m1}$ (kt/año)	158,570
		$Q_2$ (Mmol/año)	1939,646	$Q_{m2}$ (kt/año)	108,830
		$Q_3$ (Mmol/año)	1227,123	$Q_{m3}$ (kt/año)	68,851
		$Q_4$ (Mmol/año)	966,656	$Q_{m4}$ (kt/año)	54,237
		$Q_5$ (Mmol/año)	236,716	$Q_{m5}$ (kt/año)	13,759
		$Q_6$ (Mmol/año)	79,169	$Q_{m6}$ (kt/año)	4,602
<b>Caudal (Mmol/año)</b>	<b>7916,922</b>	<b>Caudal (kt/año)</b>	<b>437,848</b>		

Tabla. MD.VI. Datos de la corriente de líquido separado de la alimentación

Se trata del líquido que abandona la operación de vaporización de la corriente de alimentación. Su denominación corresponde a L y sus características se presentan análogamente en la Tabla MD.VI.

**MD.C2.2.4. Mezcla de la alimentación vaporizada y el extractante**

Se trata ésta corriente de la combinación del vapor saliente del separador gas líquido y el extractante, que alimenta la primera destilación extractiva del proceso. Su denominación corresponde a U y sus características se presentan análogamente en la tabla que sigue:

<b>Corriente de mezcla de la alimentación vaporizada y el extractante (U)</b>					
<b>Condiciones</b>		<b>Términos molares</b>		<b>Términos másicos</b>	
<b>T (K)</b>	301,39	<b>x<sub>1</sub></b>	0,349	<b>x<sub>m1</sub></b>	0,30
<b>P (atm)</b>	3	<b>x<sub>2</sub></b>	0,210	<b>x<sub>m2</sub></b>	0,18
<b>Fase</b>	Líquido	<b>x<sub>3</sub></b>	0,128	<b>x<sub>m3</sub></b>	0,11
		<b>x<sub>4</sub></b>	0,074	<b>x<sub>m4</sub></b>	0,07
		<b>x<sub>5</sub></b>	0,033	<b>x<sub>m5</sub></b>	0,03
		<b>x<sub>6</sub></b>	0,206	<b>x<sub>m6</sub></b>	0,31
		<b>Q<sub>1</sub> (Mmol/año)</b>	5823,637	<b>Q<sub>m1</sub> (kt/año)</b>	315,012
		<b>Q<sub>2</sub> (Mmol/año)</b>	3498,264	<b>Q<sub>m2</sub> (kt/año)</b>	196,281
		<b>Q<sub>3</sub> (Mmol/año)</b>	2128,526	<b>Q<sub>m3</sub> (kt/año)</b>	119,427
		<b>Q<sub>4</sub> (Mmol/año)</b>	1237,238	<b>Q<sub>m4</sub> (kt/año)</b>	69,419
		<b>Q<sub>5</sub> (Mmol/año)</b>	546,075	<b>Q<sub>m5</sub> (kt/año)</b>	31,740
		<b>Q<sub>6</sub> (Mmol/año)</b>	3440,773	<b>Q<sub>m6</sub> (kt/año)</b>	330,658
		<b>Caudal (Mmol/año)</b>	<b>16674,514</b>	<b>Caudal (kt/año)</b>	<b>1062,537</b>

Tabla. MD.VII. Datos de la mezcla de la alimentación vaporizada y el extractante

Donde los subíndices corresponden, por el siguiente orden a: 1,3-butadieno, isobuteno, 1-buteno, cis-2-buteno, isobutano y furfural del 1 al 6 respectivamente. Se mantendrán hasta próxima indicación.

**MD.C2.2.5. Destilado de “EXTRACTIVA 1”**

Se trata de la corriente de destilado de la primera operación de destilación, “EXTRACTIVA 1”. Su denominación corresponde a D y sus características se presentan análogamente en la tabla que sigue:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Memoria descriptiva

Corriente de destilado de "EXTRACTIVA 1" (D)					
Condiciones		Términos molares		Términos másicos	
T (K)	297,69	$x_1$	0,011	$x_{m1}$	0,01
P (atm)	3	$x_2$	0,677	$x_{m2}$	0,67
Fase	Líquido	$x_3$	0,206	$x_{m3}$	0,21
		$x_4$	0	$x_{m4}$	0
		$x_5$	0,106	$x_{m5}$	0,11
		$x_6$	0	$x_{m6}$	0
		$Q_1$ (Mmol/año)	58,236	$Q_{m1}$ (kt/año)	3,150
		$Q_2$ (Mmol/año)	3498,264	$Q_{m2}$ (kt/año)	196,281
$Q_3$ (Mmol/año)	1064,263	$Q_{m3}$ (kt/año)	59,714		
$Q_4$ (Mmol/año)	0	$Q_{m4}$ (kt/año)	0		
$Q_5$ (Mmol/año)	546,075	$Q_{m5}$ (kt/año)	31,740		
$Q_6$ (Mmol/año)	0	$Q_{m6}$ (kt/año)	0		
<b>Caudal (Mmol/año)</b>		<b>5166,839</b>		<b>Caudal (kt/año)</b>	<b>290,884</b>

Tabla. MD.VIII. Datos de la corriente de destilado de "EXTRACTIVA 1"

### MD.C2.2.6. Residuo de "EXTRACTIVA 1"

Se trata de la corriente de residuo de la primera operación de destilación, "EXTRACTIVA 1". Su denominación corresponde a W y sus características se presentan análogamente en la tabla que sigue:

Corriente de residuo de "EXTRACTIVA 1" (W)					
Condiciones		Términos molares		Términos másicos	
T (K)	303,92	$x_1$	0,501	$x_{m1}$	0,40
P (atm)	3	$x_2$	0	$x_{m2}$	0
Fase	Líquido	$x_3$	0,092	$x_{m3}$	0,08
		$x_4$	0,108	$x_{m4}$	0,09
		$x_5$	0	$x_{m5}$	0
		$x_6$	0,299	$x_{m6}$	0,43
		$Q_1$ (Mmol/año)	5765,401	$Q_{m1}$ (kt/año)	311,862
		$Q_2$ (Mmol/año)	0	$Q_{m2}$ (kt/año)	0
$Q_3$ (Mmol/año)	1064,263	$Q_{m3}$ (kt/año)	59,714		
$Q_4$ (Mmol/año)	1237,238	$Q_{m4}$ (kt/año)	69,419		
$Q_5$ (Mmol/año)	0	$Q_{m5}$ (kt/año)	0		
$Q_6$ (Mmol/año)	3440,773	$Q_{m6}$ (kt/año)	330,658		
<b>Caudal (Mmol/año)</b>		<b>11507,675</b>		<b>Caudal (kt/año)</b>	<b>771,653</b>

Tabla. MD.IX. Datos de la corriente de residuo de "EXTRACTIVA 1"

### MD.C2.2.7. Destilado de “EXTRACTIVA 2”

Se trata de la corriente de destilado de la segunda operación de destilación, “EXTRACTIVA 2”. Su denominación corresponde a E y sus características se presentan análogamente en la tabla que sigue:

Corriente de destilado de “EXTRACTIVA 2” (E)					
Condiciones		Términos molares		Términos másicos	
T (K)	287,31	$x_1$	0,167	$x_{m1}$	0,17
P (atm)	2	$x_2$	0,814	$x_{m2}$	0,81
Fase	Líquido	$x_3$	0,019	$x_{m3}$	0,02
		$x_4$	0	$x_{m4}$	0
		$Q_1$ (Mmol/año)	1064,263	$Q_{m1}$ (kt/año)	59,714
		$Q_2$ (Mmol/año)	5188,861	$Q_{m2}$ (kt/año)	280,676
		$Q_3$ (Mmol/año)	123,724	$Q_{m3}$ (kt/año)	6,942
		$Q_4$ (Mmol/año)	0	$Q_{m4}$ (kt/año)	0
		<b>Caudal (Mmol/año)</b>	<b>6376,847</b>	<b>Caudal (kt/año)</b>	<b>347,331</b>

Tabla. MD. X. Datos de la corriente de destilado de “EXTRACTIVA 2”

Donde los subíndices corresponden, por el siguiente orden a: 1-buteno, 1,3-butadieno, cis-2-buteno y furfural del 1 al 4 respectivamente. Se mantendrán hasta próxima indicación.

### MD.C2.2.8. Residuo de “EXTRACTIVA 2”

Corriente de residuo de “EXTRACTIVA 2” (X)					
Condiciones		Términos molares		Términos másicos	
T (K)	304,73	$x_1$	0	$x_{m1}$	0
P (atm)	2	$x_2$	0,112	$x_{m2}$	0,07
Fase	Líquido	$x_3$	0,217	$x_{m3}$	0,15
		$x_4$	0,671	$x_{m4}$	0,78
		$Q_1$ (Mmol/año)	0	$Q_{m1}$ (kt/año)	0
		$Q_2$ (Mmol/año)	576,540	$Q_{m2}$ (kt/año)	31,186
		$Q_3$ (Mmol/año)	113,514	$Q_{m3}$ (kt/año)	62,477
		$Q_4$ (Mmol/año)	3440,773	$Q_{m4}$ (kt/año)	330,658
		<b>Caudal (Mmol/año)</b>	<b>5130,827</b>	<b>Caudal (kt/año)</b>	<b>424,322</b>

Tabla. MD. XI. Datos de la corriente de residuo de “EXTRACTIVA 2”

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Memoria descriptiva

Se trata de la corriente de residuo de la segunda operación de destilación, "EXTRACTIVA 2". Su denominación corresponde a X y sus características se presentan análogamente en la Tabla MD.XI.

### MD.C2.2.9. Destilado de "MÚLTIPLE"

Se trata de la corriente de destilado de la tercera operación de destilación, "MÚLTIPLE". Su denominación corresponde a G y sus características se presentan análogamente en la tabla que sigue:

Corriente de destilado de "MÚLTIPLE" (G)					
Condiciones		Términos molares		Términos máscicos	
T (K)	287,18	$x_1$	0,170	$x_{m1}$	0,18
P (atm)	2	$x_2$	0,830	$x_{m2}$	0,82
Fase	Líquido	$x_3$	0,000	$x_{m3}$	0,00
		$Q_1$ (Mmol/año)	1064,263	$Q_{m1}$ (kt/año)	59,714
		$Q_2$ (Mmol/año)	5186,266	$Q_{m2}$ (kt/año)	280,536
		$Q_3$ (Mmol/año)	0,619	$Q_{m3}$ (kt/año)	0,035
		<b>Caudal (Mmol/año)</b>	<b>6251,148</b>	<b>Caudal (kt/año)</b>	<b>340,284</b>

Tabla. MD. XII. Datos de la corriente de destilado de "MÚLTIPLE"

Donde los subíndices corresponden, por el siguiente orden a: 1-buteno, 1,3-butadieno y cis-2-buteno del 1 al 3 respectivamente. Se mantendrán hasta próxima indicación.

### MD.C2.2.10. Residuo de "MÚLTIPLE"

Corriente de residuo de "MÚLTIPLE" (Y)					
Condiciones		Términos molares		Términos máscicos	
T (K)	296,25	$x_1$	0	$x_{m1}$	0
P (atm)	2	$x_2$	0,021	$x_{m2}$	0,02
Fase	Líquido	$x_3$	0,979	$x_{m3}$	0,98
		$Q_1$ (Mmol/año)	0	$Q_{m1}$ (kt/año)	0
		$Q_2$ (Mmol/año)	2,594	$Q_{m2}$ (kt/año)	0,140
		$Q_3$ (Mmol/año)	123,105	$Q_{m3}$ (kt/año)	6,907
		<b>Caudal (Mmol/año)</b>	<b>125,700</b>	<b>Caudal (kt/año)</b>	<b>7,048</b>

Tabla. MD. XIII. Datos de la corriente de residuo de "MÚLTIPLE"

Se trata de la corriente de residuo de la tercera operación de destilación, "MÚLTIPLE". Su denominación corresponde a Y y sus características se presentan análogamente en la Tabla MD.XIII.

#### MD.C2.2.11. Destilado de "BINARIA"

Se trata de la corriente de destilado de la cuarta y última operación de destilación, "BINARIA". Su denominación corresponde a H y sus características se presentan análogamente en la tabla que sigue:

Corriente de destilado de "BINARIA" (H)					
Condiciones		Términos molares		Términos másicos	
T (K)	298,78	$x_1$	0,752	$x_{m1}$	0,76
P (atm)	3	$x_2$	0,248	$x_{m2}$	0,24
Fase	Líquido	$Q_1$ (Mmol/año)	1060,525	$Q_{m1}$ (kt/año)	59,504
		$Q_2$ (Mmol/año)	349,747	$Q_{m2}$ (kt/año)	18,919
		<b>Caudal (Mmol/año)</b>	<b>1410,272</b>	<b>Caudal (kt/año)</b>	<b>78,422</b>

Tabla. MD. XIV. Datos de la corriente de destilado de "BINARIA"

Donde los subíndices corresponden, por el siguiente orden a: 1-buteno y 1,3-butadieno del 1 al 2 respectivamente. Se mantendrán hasta próxima indicación.

#### MD.C2.2.12. Residuo de "BINARIA"

Se trata de la corriente de residuo de la cuarta y última operación de destilación, "BINARIA". Su denominación corresponde a Z y sus características se presentan análogamente en la tabla que sigue:

Corriente de residuo de "BINARIA" (Z)					
Condiciones		Términos molares		Términos másicos	
T (K)	300,77	$x_1$	0,001	$x_{m1}$	0,001
P (atm)	3	$x_2$	0,999	$x_{m2}$	0,999
Fase	Líquido	$Q_1$ (Mmol/año)	4,357	$Q_{m1}$ (kt/año)	0,244
		$Q_2$ (Mmol/año)	4836,519	$Q_{m2}$ (kt/año)	261,617
		<b>Caudal (Mmol/año)</b>	<b>4840,876</b>	<b>Caudal (kt/año)</b>	<b>261,861</b>

Tabla. MD. XV. Datos de la corriente de residuo de "BINARIA"

La presente corriente contiene el butadieno purísimo. Como se puede observar la cantidad obtenida, (261,617 kt/año) es superior a las 200 kt/año nominales. Se produce cierto exceso en previsión a la recirculación que se practicará de esta corriente a fin de mantener homogénea la alimentación de “EXTRACTIVA 1”. En el anexo segundo se dedicará un capítulo al desarrollo de la estrategia de recirculación; en el actual se mostrará el porcentaje de corriente que se toma de las excedentes a fin de lograr el objeto antedicho.

En todo caso, la planta siempre es capaz de producir anualmente 200 kt, a expensas de reemplazar el extractante íntegramente, lo que podría resultar una estrategia interesante económicamente, siempre que el coste no supere el margen de ganancia por obtener mayor cuantía de producto de interés.

### MD.C2.2.13. Extractante recuperado

Se trata de la corriente de extractante obtenida como líquido de la operación “RECUPERACIÓN”. En tal operación, el residuo de “EXTRACTIVA 2” es vaporizado obteniéndose un líquido rico en el extractante y un vapor prácticamente carente del mismo. La denominación del líquido corresponde a L' y sus características se presentan análogamente en la tabla que sigue:

<b>Corriente de extractante recuperado (L')</b>					
<b>Condiciones</b>		<b>Términos molares</b>		<b>Términos másicos</b>	
<b>T (K)</b>	278,79	<b>x<sub>1</sub></b>	0,071	<b>x<sub>m1</sub></b>	0,04
<b>P (atm)</b>	9	<b>x<sub>2</sub></b>	0,081	<b>x<sub>m2</sub></b>	0,05
<b>Fase</b>	Líquido	<b>x<sub>3</sub></b>	0,848	<b>x<sub>m3</sub></b>	0,91
		<b>Q<sub>1</sub> (Mmol/año)</b>	287,424	<b>Q<sub>m1</sub> (kt/año)</b>	15,547
		<b>Q<sub>2</sub> (Mmol/año)</b>	328,563	<b>Q<sub>m2</sub> (kt/año)</b>	18,435
		<b>Q<sub>3</sub> (Mmol/año)</b>	3440,763	<b>Q<sub>m3</sub> (kt/año)</b>	330,657
		<b>Caudal (Mmol/año)</b>	<b>6251,148</b>	<b>Caudal (kt/año)</b>	<b>364,640</b>

Tabla. MD. XVI. Datos de la corriente de extractante recuperado

Donde los subíndices corresponden, por el siguiente orden a: 1,3- butadieno, cis-2-buteno y furfural del 1 al 3 respectivamente. Se mantendrán hasta próxima indicación.

#### MD.C2.2.14. Vapor residual de “RECUPERACIÓN”

Se trata del vapor excedente de la operación “RECUPERACIÓN”. En tal operación, el residuo de “EXTRACTIVA 2” es vaporizado obteniéndose un líquido rico en el extractante y un vapor prácticamente carente del mismo. La denominación del vapor corresponde a V' y sus características se presentan análogamente en la tabla que sigue:

Corriente de vapor residual de “RECUPERACIÓN” (V')					
Condiciones		Términos molares		Términos máxicos	
T (K)	278,79	y <sub>1</sub>	0,269	y <sub>m1</sub>	0,26
P (atm)	9	y <sub>2</sub>	0,731	y <sub>m2</sub>	0,74
Fase	Vapor	y <sub>3</sub>	0,000	y <sub>m3</sub>	0,00
		Q <sub>1</sub> (Mmol/año)	289,116	Q <sub>m1</sub> (kt/año)	15,639
		Q <sub>2</sub> (Mmol/año)	784,951	Q <sub>m2</sub> (kt/año)	44,042
		Q <sub>3</sub> (Mmol/año)	0,010	Q <sub>m3</sub> (kt/año)	0,001
		Caudal (Mmol/año)	<b>1074,077</b>	Caudal (kt/año)	<b>59,682</b>

Tabla. MD. XVII. Datos de la corriente de vapor residual de “RECUPERACIÓN”

#### MD.C2.2.15. Extractante de *make-up*

Se trata de la extractante fresco que debe aportarse para compensar la pérdida del sistema, tanto en la operación de “RECUPERACIÓN”, como en el grado de recirculación requerido en el líquido de la anterior operación.

Corriente de extractante de <i>make-up</i>					
Condiciones		Términos molares		Términos máxicos	
T (K)	293,15	Caudal (Mmol/año)	<b>72,077</b>	Caudal (kt/año)	<b>6,926</b>
P (atm)	4,5				
Fase	Líquido				

Tabla. MD. XVIII. Datos de la corriente de extractante de *make-up*

La denominación de esta corriente corresponde a M y sus características se presentan análogamente en la tabla precedente.

#### MD.C2.2.16. Estrategia de recirculación

Como se viene apuntando, el diagrama mostrado en la Figura MD.14, no es completo en tanto en cuanto la utilización de las corrientes. Dicho diagrama supone que todas las corrientes excedentes son entregadas por el proceso, si bien, de ser así, dado que la corriente L' de recuperación del extractante no es pura en el mismo, al recircularlo a la primera destilación, "EXTRACTIVA 1", su composición se vería alterada. Por consiguiente, será preciso disponer un tanque de mezcla hacia el que corrientes excedentes, tanto como de proceso, se desviarán procurando una corriente de alimentación a la operación señalada homogénea en el tiempo y cerrando el problema de la recirculación del extractante.

Las corrientes disponibles para el mezclado, o "BLENDING", usando el argot propio de refinería, son las que siguen:

- L, líquido de la operación de vaporización de la alimentación.
- D, destilado de "EXTRACTIVA 1".
- Y, residuo de "MÚLTIPLE".
- H, destilado de "BINARIA".
- L' y V', líquido y vapor, respectivamente de "RECUPERACIÓN".

Adicionalmente, la corriente de butadieno purísimo, Z, es también disponible para la recirculación.

Combinando como se indicará las siguientes corrientes, se obtiene mezcla idéntica en caudal y composición a la de U, alimentación de "EXTRACTIVA 1".

Estrategia de mezclado		
Corriente	Descripción	Porcentaje de utilización (%)
V	Alimentación vaporizada	74,0
D	Destilado de "EXTRACTIVA 1"	26,0
H	Destilado de "BINARIA"	26,0
Z	Residuo de "BINARIA"	23,3
L'	Extractante recuperado	97,9
M	Extractante de <i>make-up</i>	100,0

Tabla. MD. XIX. Aprovechamiento de las corrientes para recirculación

Efectuando las correspondientes proporciones sobre cada uno de los componentes de cada corriente y totalizando, se obtiene, como se demuestra en el anexo segundo una corriente homogénea en composición en el tiempo. Finalmente, las corrientes Y, L y V', no han podido incluirse en la recirculación, por lo que se entregan íntegras del proceso. En cuanto a las corrientes utilizadas sólo se entrega la parte restante, una vez recirculada la indicada en la Tabla MD.XIX.

La estrategia de mezclado se ha basado en un procedimiento de ensayo-error, (a base de probar distintas proporciones de mezcla de corrientes), respetando los siguientes principios:

- Las corrientes excedentes valiosas deberán recircularse en el mínimo porcentaje posible, en particular, la que contiene el producto de interés.
- Las corrientes de proceso deben aprovecharse lo máximo posible, ya que lo contrario obliga a elevar la alimentación.
- La corriente de extractante recuperado debe aprovecharse al máximo, ya que lo contrario obliga elevar el aporte fresco encareciendo el proceso.
- La corriente de *make-up* participa íntegramente, (como es lógico, ya que consiste en la diferencia entre el extractante necesario y el aportado por la suma del resto de corrientes).

Así, puede observarse como el destilado D, carga de interés para las plantas de alquilación o ETBE de Refinería, o H, interesante

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Memoria descriptiva

---

asimismo para la de alquilación, se aprovechan lo mínimo posible. Ídem puede notarse para el consumo de la corriente portadora del butadieno purificado, Z. En contraste, la corriente V, se aprovecha en alto porcentaje, desechando la menor cantidad posible de una corriente de proceso, al igual que L', la corriente rica en extractante, lo que reduce la aportación del *make-up* a un consumo mínimo.

---

### **Capítulo MD.C3. Viabilidad del proyecto**

El presente capítulo se dedica a la justificación de la factibilidad del proceso proyectado. Lo que se demostrará desde las siguientes perspectivas:

- Viabilidad técnica.
- Viabilidad económica.
- Viabilidad legal.

#### **MD.C3.1. Viabilidad técnica**

En el primer capítulo introductorio de la memoria descriptiva, en su apartado MD.C2.2.4, se muestra una breve reseña de los procesos industriales típicos, tanto para la purificación del 1,3-butadieno de una corriente de butadieno puro, como la producción de dicha corriente de alimento a la planta objeto del PFC.

Se discuten las distintas estrategias y se propone una alternativa, la proyectada, basada en el estado del arte en la purificación del compuesto de interés. Asimismo, también se presenta una discusión acerca de las posibilidades de aprovechamiento de las corrientes excedentes.

Junto a lo anteriormente indicado, el capítulo segundo ha presentado las características de las principales corrientes de proceso, lo que ha permitido formar juicio sobre la facilidad de operación: pese a manipular un caudal relativamente elevado de alimento y corrientes intermedias, lo que forzará a un diseño de diversos equipos de dimensiones considerables, las condiciones de operación resultan benignas no sólo en cuanto a sollicitación térmica o de presión a los elementos integrantes de la planta, (recipientes, bombas, tuberías y sus accesorios y cambiadores); sino asimismo químicas, puesto que se ha indicado que ninguno de los productos involucrados en el proceso es corrosivo.

Considerando, adicionalmente, que el diseño de los equipos se ha ajustado a códigos internacionalmente aceptados que normalizan las dimensiones de los elementos constructivos, así como a catálogos comerciales, puede afirmarse que ningún equipo o conducción se encuentra fuera de las especificaciones comerciales, por lo que, por todo lo razonado, queda patente la viabilidad técnica del proceso.

### **MD.C3.2. Viabilidad económica**

El hecho de que una planta sea factible desde el punto de vista técnico es el primer requisito que debe verificarse, a efectos de comprobar lo rentable que ésta resulta.

Si la construcción de una planta, (u objeto de cualquier proyecto), es técnicamente viable, esto es, “puede hacerse”, deberá cuestionarse si es beneficioso, o económicamente viable.

Un ejemplo de lo anterior puede encontrarse en la máquina analítica de *Charles Babbage*, un profesor británico responsable del diseño de uno de los primeros hitos en la historia de la informática: la máquina analítica. Se trataba de un complejo mecanismo alimentado a vapor que, mediante el sistema de tarjetas perforadas era capaz de calcular logaritmos y funciones trigonométricas en pleno siglo XIX. Era una máquina técnicamente viable, si bien nunca obtuvo financiación, por considerarse en exceso costosa en relación a los beneficios aportados, (aunque debe reconocérsele su carácter de predecesora de la computación moderna).

El proceso diseñado supone una serie de costes y beneficios que se recogerán en el documento final del PFC, el presupuesto. Las partidas económicas que se han considerado son, *grosso modo*, las que siguen:

- Coste de operación:
  - o Adquisición de materias primas: alimentación y extractante.

- Servicios auxiliares: fluidos para los equipos de intercambio de calor, consumo eléctrico, aire de instrumentos, entre otros servicios de planta o *utilities*.
- Remuneración de la mano de obra.
- Coste de inmovilizado: El estado de mediciones, esto es, el inventario de unidades y la aplicación de estándares de cálculo para grandes plantas, permite estimar el coste fijo de adquisición de las unidades principales y auxiliares de proceso.
- Otros costes: Honorarios del proyecto, contratación de seguros, entre otros.
- Beneficios:
  - Venta del butadieno purísimo.
  - Aprovechamiento de las corrientes excedentes.

Como criterio de rentabilidad aceptable, suele tomarse una rentabilidad superior al 15%. Como puede comprobarse en el presupuesto, esta frontera se traspasa holgadamente, de donde queda justificada la viabilidad económica del proceso.

### **MD.C3.3. Viabilidad legal**

Finalmente, una vez demostrada la factibilidad técnica y una ganancia económica por el hecho de producir suficiente, debe satisfacerse una última condición necesaria, (las viabilidades anteriores son también por separado condiciones *sine qua non*, para la conjunta del proyecto): el proyecto debe respetar la legislación vigente en el momento de su firma.

A este respecto, el proyecto cumple con las leyes vigentes vinculadas a los aspectos abordados por el mismo, no existiendo jurisprudencia alguna contraria a la ejecución u operación de la planta proyectada. Se presenta el marco, tanto jurídico como normativo, aplicable a la planta del PFC en los dos siguientes apartados:

### MD.C3.3.1. Marco jurídico

- **Ley 31/1995**, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales, modificada por la **Ley 54/2003**, de 12 de diciembre, de reforma del marco normativo de la anterior y sus Reales Decretos de desarrollo: **Real Decreto 39/1997** y **Real Decreto 604/2006** de modificación del anterior.
- **Real Decreto 1299/2006**, de 10 de noviembre, por el que se aprueba el cuadro de enfermedades profesionales en el sistema de la Seguridad Social y se establecen criterios para su notificación y registro.
- **Real Decreto 1244/1979**, de 4 de abril, por el que se aprueba el Reglamento de Aparatos a Presión, su Real Decreto de modificación: **Real Decreto 769/1999** y su complementario, **Real Decreto 2060/2008**.
- **Real Decreto 1942/1993**, de 5 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones de Protección contra Incendios, modificado por **Real Decreto 560/2010**.
- **Real Decreto 2267/2004**, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de Seguridad contra Incendios en Establecimientos industriales, modificado por **Real Decreto 560/2010**.
- **Real Decreto 400/1996**, de 1 de marzo. Aparatos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosivas.
- **Real Decreto 485/1997**, de 14 de abril. Disposiciones mínimas en materia de señalización de seguridad y salud en lugares de trabajo.
- **Real Decreto 773/1997**, de 30 de mayo. Disposiciones mínimas sobre utilización por los trabajadores de equipos de protección individual.
- **Real Decreto 1254/1999**, de 16 de julio, por el que se aprueban las medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes, modificado por **Real Decreto 948/2005** y **Real Decreto 119/2005**.

- **Real Decreto 379/2001**, de 6 de abril, por el que se aprueba el Reglamento de Almacenamiento de productos Químicos y sus instrucciones técnicas complementarias, ampliada por **Real Decreto 105/2010**.
- **Real Decreto 614/2001**, de 8 de junio, sobre disposiciones mínimas para la protección de la seguridad y salud de los trabajadores frente al riesgo eléctrico.
- **Real Decreto 842/2002**, de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento electrotécnico para baja tensión, modificado por **Real Decreto 560/2010**.
- **Real Decreto 223/2008**, de 15 de febrero, por el que se aprueban el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus instrucciones técnicas complementarias.
- **Real Decreto 681/2003**, de 12 de junio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo.
- **Reglamento (CE) 1907/2006** del Parlamento Europeo y el Consejo, de 18 de diciembre, relativo al registro, la evaluación, la autorización y la restricción de las sustancias y preparados químicos.
- **Real Decreto 286/2006**, de 10 de marzo, sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al ruido.
- **Real Decreto 374/2001**, de 6 de abril, sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con los agentes químicos durante el trabajo.
- **Real Decreto 1124/2000**, de 16 de junio, por el que se modifica el **Real Decreto 665/1992**, sobre la protección de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a agentes cancerígenos durante el trabajo.
- **Real Decreto 2085/1994**, de 20 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Petrolíferas, sus modificaciones por **Real Decreto 1562/1998**, **Real Decreto**

- 1523/1999** y **Real Decreto 560/2010**, y ampliaciones por **Real Decreto 2201/1995**, **Real Decreto 1427/1997**, **Real Decreto 365/2005** y **Real Decreto 1416/2006**.
- **Ley 16/2002**, de 1 de julio, de Prevención y Control Integrados de la Contaminación, desarrollada por **Real Decreto 509/2007** y modificada por **Ley 1/2005**, **Ley 27/2006**, **Ley 34/2007**, **Ley 42/2007**, **Ley 40/2010**, **Real Decreto-Ley 5/2004**, **Real Decreto-Ley 8/2011** y **Real Decreto 117/2003**.
  - **Ley 6/2010**, de 24 de marzo, de modificación del texto refundido de la Ley de Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos, aprobado por el **Real Decreto Legislativo 1/2008**.
  - **Ley 26/2007**, de 23 de octubre, de Responsabilidad Medioambiental, desarrollada parcialmente por **Real Decreto 2090/2008** y modificada por **Ley 40/2010** y **Real Decreto-Ley 8/2011**.
  - **Real Decreto 9/2005**, de 14 de enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados.
  - **Ley 22/2011**, de 28 de julio de residuos y suelos contaminados.
  - **Real Decreto 833/1988**, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución de la Ley 20/1986, Básica de Residuos Tóxicos y Peligrosos, derogada parcialmente por **Ley 10/1998**, modificada por **Real decreto 1771/1994**, **Real Decreto 952/1997** y **Real Decreto 367/2010**.
  - **Real Decreto Legislativo 1/2001**, de 20 de julio por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas, derogado parcialmente por **Ley 16/2002**, modificado por **Ley 24/2001**, **Ley 16/2002**, **Ley 53/2002**, **Ley 13/2003**, **Ley 62/2003**, **Ley 11/2005**, **Ley 42/2007**, **Ley 25/2009**, **Real Decreto-Ley 4/2007** y **Real Decreto-Ley 8/2011** y ampliado por **Ley 16/2002**, **Ley 11/2005** y **Real Decreto-Ley 12/2011**.

**MD.C3.3.2. Marco normativo**

- Código ASME: Distintas secciones para el diseño de aparatos a presión.
- Normas API: 650 y 620, para el diseño de tanques de almacenamiento.
- Normas UNE-EN-ISO. Para la normalización del proyecto.
- Normas ASTM. Para la selección de materiales.
- Normas TEMA. Para el diseño de intercambiadores.
- Normas ISA. Para el control automático de procesos.



## **Capítulo MD.C4. Ubicación del proceso**

En el capítulo introductorio ya se apuntaron las características fundamentales del emplazamiento seleccionado para el proceso proyectado. Es preciso dedicar un capítulo aparte a una descripción más detallada del mismo.

### **MD.C4.1. Selección de la ubicación**

La planta de procesos deberá instalarse en los terrenos correspondientes a la *Refinería Gibraltar-San Roque*, situada en el municipio del mismo nombre, (San Roque), en la bahía de Algeciras. La siguiente figura muestra una vista satélite del emplazamiento:



Figura. MD.15. Vista satélite de la *Refinería Gibraltar-San Roque* (Google maps)

Las instalaciones de Refinería ocupan una superficie de 1,5 millones de metros cuadrados, si bien la empresa *CEPSA* es propietaria de, aproximadamente, 2,8 millones de metros cuadrados.

La Refinería se encuentra plenamente integrada con otras instalaciones industriales del entorno del Campo de Gibraltar. Dentro del grupo *CEPSA*, la Refinería produce materia prima para las plantas petroquímicas. La planta de *CEPSA Química* en Puente Mayorga recibe queroseno y benceno para la obtención de parafinas lineales, alquilbenceno lineal y su derivado sulfonado, que constituyen la materia activa de los detergentes biodegradables. La planta de *CEPSA Química* en Guadarranque fabrica la materia base para fibras textiles y PET a partir de paraxileno y metaxileno, producidos en Refinería.

Más allá de las empresas propias de *CEPSA*, la Refinería suministra combustibles, lubricantes y electricidad a otras industrias del entorno y presta sus instalaciones portuarias para la entrada y salida de productos de otras industrias.

Colindante con la Refinería destaca la presencia del yacimiento arqueológico de Carteya, considerado pionero en muchos aspectos de la cultura antigua peninsular. Se trata de un asentamiento de origen púnico establecido en el siglo VII a. de C. y que a finales del siglo III a. de C. se convirtió en la primera colonia latina fuera de Roma.

En el apartado de ubicación, del capítulo introductorio, se señaló el lugar idóneo para el emplazamiento de la planta proyectada. Se remite al lector al plano de ubicación, donde se muestra la imagen cenital de la Figura MD.15 ampliada. Sobre dicho plano se marca convenientemente la posición de la parcela seleccionada. En la Figura MD.15, puede estimarse la superficie de la ubicación en 74800 m<sup>2</sup>, tomando medidas del largo y el ancho del rectángulo y proporcionando mediante la escala, (la medida es de 1,7x1,1 cm: siendo equivalente 1 cm sobre la figura a 200 m según la escala, se tiene un recinto de 340x220 m que suponen el área mencionada).

---

### **MD.C4.2. Suministros a la planta**

Dado que el proceso de purificación del butadieno está concebido para su integración en Refinería, ésta proporcionará los servicios auxiliares precisos, así como será responsable de la recepción y almacenamiento, si procediese, de las corrientes excedentes del proceso.

Por las características propias del proceso, el único suministro energético requerido será eléctrico, puesto que las necesidades térmicas las cubre el proceso y no es preciso aporte de combustible, toda vez que éste no involucra el uso de horno o caldera.

La Refinería será responsable por tanto del suministro del fluido eléctrico. Debe destacarse la capacidad de generación eléctrica de que dispone la Refinería, radicada en sus plantas de generación y ciclo combinado, anexas a las instalaciones de la misma.

El suministro de fluido para cambiadores será el siguiente:

- Condensadores y cambiadores para enfriamiento: Agua de refrigeración de 7°C.
- Unidad refrigerante para la alimentación de "RECUPERACIÓN": Refrigerante propano.
- Rehervidores y cambiadores para calentamiento: Agua procedente de condensados de baja presión de Refinería.

La Refinería los proporcionará en sus caudales requeridos en las condiciones que se mostrarán en el capítulo de intercambiadores de calor.

### **MD.C4.3. Consideraciones ambientales**

Seguidamente se describen los rasgos ambientales que definen el área de ubicación del proyecto.

En la bahía de Algeciras pueden distinguirse tres conjuntos geológicos. Por una parte la zona subbética a la que pertenece el Peñón de Gibraltar, por otra, las unidades alóctonas del Campo de Gibraltar que forman un conjunto independiente; y por último, los terrenos postorogénicos fácilmente distinguibles entre sí por su antigüedad.

En lo relativo a la tectónica del área de estudio, cabe destacar que ésta es activa, debido a que es una zona de unión de placas, concretamente la africana y la euroasiática. La peligrosidad sísmica es moderada y su importancia, en cuanto al diseño mecánico de los equipos verticales, se ha considerado y explicitado más por extenso en los anexos correspondientes.

Con respecto a la geomorfología, en el Campo de Gibraltar se pueden diferenciar varias unidades: una primera zona de Serranía que está constituida por una serie de elevaciones de poca altura (400-800 m) de formas abruptas, escarpadas y surcadas por valles estrechos y profundos, que presentan una importante cubierta vegetal. Al levante de la Serranía se extiende hacia el mar el paisaje más característico del Campo de Gibraltar, con relieves bajos de ondulaciones suaves que se conocen como las "colinas". Otra unidad física, que ocupa una extensión pequeña, pero que reviste gran importancia agrícola, está constituida por las pequeñas llanuras aluviales de los ríos, que aparecen de manera discontinua entre las suaves formas de las colinas.

Desde el punto de vista de la edafología, los dos tipos de suelos más característicos son la tierra parad forestal, en la zona de las Sierras, y el lehm margoso, que ocupa la zona de las colinas. En general, los suelos de la zona presentan un grado de erosión moderado.

La hidrología superficial se caracteriza por la red hidrológica que desemboca en la Bahía de Algeciras, destacando los ríos Gua-

darranque y Palmones. Esta red se completa con los ríos de la Miel y Pícaro.

La hidrología subterránea en el área delimitada por el Campo de Gibraltar se caracteriza por la presencia de cinco subsistemas que son: Pliocuaternario del Guadarranque-Palmones, Plioceno de Sotogrande, Cuaternario de La Línea, Depósitos aluviales del Guadiaro y Hozgarganta y Areniscas del Aljibe.

En cuanto a la hidrología marina: oleaje, corrientes y mareas son los elementos mecánicos fundamentales que configuran las formas costeras. Estos fenómenos ejercen sobre el Atlántico efectos de mayor envergadura que sobre el Mediterráneo.

En el interior de la Bahía de Algeciras, existe una alta capacidad de renovación hídrica, dotándola de una elevada capacidad de autodepuración.

El clima de la Bahía de Algeciras se define como mediterráneo marítimo, caracterizado por la benignidad de las temperaturas, con ausencia casi total de heladas y una distribución de las lluvias poco homogénea, con un mínimo muy acusado en los meses de julio y agosto. Un factor que debe considerarse es la existencia de fuertes vientos, especialmente en el área del Estrecho (Tarifa).

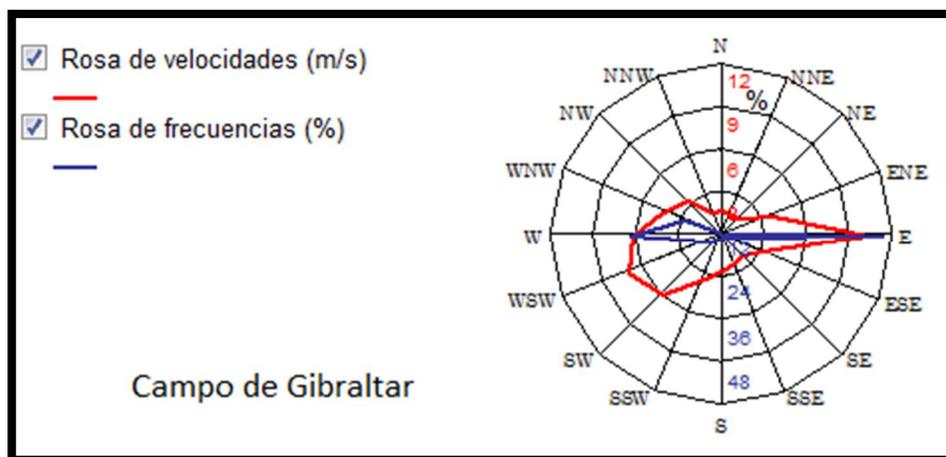


Figura. MD.16. Rosa de los vientos. Campo de Gibraltar (*GlobalWind*)

La Figura MD.16 presenta la rosa de los vientos de la zona. Se aprecia la predominancia de los vientos de levante (componente E) y poniente (componente O). Los vientos de levante copan casi el 50% de la frecuencia, lo que se ha considerado a la hora de situar los equipos en campo. Los datos pertinentes sobre velocidad del viento se procuran en los capítulos de diseño mecánico en los anexos correspondientes.

El área comprendida por las Sierras del Aljibe y el Campo de Gibraltar presenta una gran riqueza vegetal, estimándose la presencia de más de un millar de especies distintas de plantas superiores. Dentro del área de estudio aparece una serie de formaciones cuyos elementos florísticos se superponen entre sí, creándose un complejo mosaico, donde el alcornocal constituye la unidad dominante.

La fauna del área goza de una significativa diversidad, debido a la existencia de una gran variedad de ecosistemas como bosques, dehesas, pastizales, matorrales, roquedos, ríos y embalse. Hay especies que sólo se encuentran en un ecosistema, mientras que otras pueden ocupar zonas diferentes para la búsqueda de alimentos o la reproducción.

Respecto a la biocenosis marina, debe señalarse que la Bahía de Algeciras es un enclave geográfico de una gran riqueza biológica, aunque en su franja litoral se han advertido áreas concretas de extrema pobreza faunística y florística y algunas regresiones o ausencias importantes de especies que antes abundaban.

El cercano parque natural de Los Alcornocales, constituye una Zona Especial de Protección para las Aves, (ZEPA).

El ámbito global del resumen ambiental presentado abarca los siete términos municipales que configuran la comarca del Campo de Gibraltar: Algeciras, Los Barrios, Castellar de la Frontera, Jimena de la Frontera, La Línea de la Concepción, San Roque y Tarifa. En los

últimos 10 años todos los municipios del área han experimentado incremento poblacional.

Existen grandes diferencias a nivel ocupacional entre los municipios de la costa y los del interior. Algeciras, Los Barrios, La Línea de la Concepción, San Roque y Tarifa centran su actividad en los sectores secundario y de servicios, con particular relevancia para el sector de la industria. Los municipios del interior, (Castellar y Jimena de la Frontera) centran, por el contrario su actividad económica en el sector primario.

En cuanto a las infraestructuras del área de estudio, destacan las zonas industriales y comerciales en el entorno a los municipios, las escombreras y vertederos, el tejido urbano y las urbanizaciones residenciales.

En el caso de la red viaria, destaca la carretera N-340 que bordea la costa y muestra una gran intensidad de tráfico. Hacia el interior se encuentra la carretera A-381 que presenta intensidades de tráfico menores a medida que se aleja de la bahía.

La situación geográfica privilegiada, paso obligado de las principales rutas marítimas, las buenas condiciones naturales al abrigo de los temporales y los importantes calados, hacen que el Puerto de Algeciras sea de gran importancia para el tráfico tanto de pasajeros como de mercancías.

El paisaje del entorno cercano es el característico de un Polígono Industrial, por lo que el proyecto objeto del PFC no resultará una alteración trascendente en el paisaje de la zona. Igualmente no es previsible afectar restos de interés arqueológico en la zona de ubicación del mismo.

Se cierra el capítulo con la siguiente figura que presenta una vista de las ruinas de Carteya, anexas al terreno propiedad de la

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Memoria descriptiva

---

compañía *CEPSA*. Como contraste se observa al fondo de la imagen la antorcha de Refinería encendida.



Figura. MD.17. Vista de las ruinas de Carteya

---

## **Capítulo MD.C5. Ubicación en terreno**

Se dedica el presente capítulo a la descripción de los criterios de disposición de equipos en terreno, de acuerdo a la especificación *CEPSA ESP-0200-001*. Las normas aplicadas tienen como objeto garantizar la seguridad y facilitar las tareas de construcción, mantenimiento y operación.

### **MD.C5.1. Generalidades**

Como definiciones fundamentales, debe entenderse por área de procesos aquella zona de la Refinería donde se ubican unidades de proceso, (también se conoce como planta). El área de unidades, por su parte, es la zona que contiene una o más unidades de proceso con un único *rack* principal de tuberías y está rodeada por un límite de batería continuo y sin calles o carreteras entre las unidades. El límite de batería es la linde del área de unidades.

En base a lo anterior, el área de procesos correspondiente al PFC sería la propia planta completa que estaría compuesta por diversas áreas de unidades, (aquellas dónde tienen lugar los distintos procesos de separación).

Para la disposición de las unidades de procesos y los equipos, deberá preverse la dirección predominante del viento, de modo que los anteriores se dispongan de modo que posibles fugas de productos inflamables no se dirijan a posibles fuentes de ignición. Asimismo también se preverá la instalación de escaleras y plataformas en las zonas de sotavento de los equipos.

La forma ideal de un área de procesos es una serie de rectángulos, (correspondientes cada uno a un área de unidades), con un *rack* principal de tuberías centralizado a lo largo de la dirección del lado más largo del rectángulo mayor que forma el área de procesos completa. Los distintos equipos del proceso se situarán a ambos la-

dos del citado *rack*. Eventualmente podrán disponerse *racks* secundarios perpendiculares al principal.

Las unidades de proceso y la posición de sus equipos se dispondrán según el flujo indicado en el plano tercero, o lo más semejante posible. Cuando haya varias unidades de proceso, los equipos de cada una de ellas estarán agrupados por unidad, es decir, no se mezclarán equipos de unidades distintas.

Siempre que sea posible, todas las unidades de proceso de una planta estarán juntas, a un mismo nivel y a una elevación superior a la zona de tanques de almacenamiento y zonas de tratamiento de residuos. Este condicionante se cumple en la ubicación seleccionada, puesto que la planta de tratamiento de aguas residuales, (TAR), se encuentra ubicada cercana al puerto de la Refinería, (la ubicación seleccionada se encuentra a mayor cota sobre el terreno), y los tanques se encuentran a menor nivel, dentro de sus correspondientes cubetos. La red de aguas aceitosas y drenaje recoge todas los residuos generados al cambiar el aceite a los equipos dinámicos, así como aguas pluviales, y vierte directamente en la planta TAR, por ello es preciso que las áreas de procesos se encuentren a superior cota, de modo que la red de aceitosas funcione por gravedad.

El *rack* de tuberías es una plataforma metálica a varios niveles soportada por pórticos a lo largo de su extensión. Su misión es servir de soporte a las líneas de proceso y auxiliares y cables eléctricos y de instrumentos que dan servicio a las distintas unidades. No se podrá ubicar equipo alguno debajo o sobre el *rack*.

### **MD.C5.2. Disposición seleccionada**

La disposición elegida en terreno respeta los principios anteriores. Tal como se muestra en el plano segundo, el área de procesos es aproximadamente rectangular y está formada por dos baterías de parcelas a izquierda y derecha del *rack* principal de tuberías.

La batería de la izquierda aglutina parcelas para las distintas unidades de proceso, mientras que la batería derecha incluye los dos tanques de proceso: “BLENDING de EXTRACTIVA 1” y “FURFURAL FRESCO”. El de almacenamiento de butadieno terminado no puede situarse dentro del área de procesos.

Las áreas de unidades, o parcelas, se han dispuesto correlativamente según indica el diagrama de flujo: En primer lugar la unidad “SIMPLE”, seguida de “EXTRACTIVA 1”, “EXTRACTIVA 2”, “MÚLTIPLE”, “RECUPERACIÓN” y “BINARIA”. Los equipos de cada una de ellas se han dispuesto dentro de cada área de unidades y el espaciado de los mismos respeta las medidas de la tabla que sigue:

Distancias mínimas en metros	Reactores y recipientes		Cambiadores de tubos	Bombas	Tanques en área de procesos
	$\phi$	d			
Reactores y recipientes	<3	2,5			
	3-5	3			
	>5	4			
Cambiadores de tubos	Ídem		1,5		
Bombas	3		3	2	
Tanques en área de procesos	9		9	9	$\phi$ mayor

Tabla. MD. XX. Distancias mínimas entre equipos

Para distancia entre reactores y recipientes, (a esta categoría pertenecen todas las columnas de destilación, separadores gas-líquido y acumuladores), se tiene una relación con el diámetro de los equipos: si es menor que 3 m, se tomará una distancia de 2,5 m, si está comprendida entre 3 y 5 m, de 3 m y si es mayor a 5 se tomarán 4 m. Estas distancias aplican igualmente entre recipientes y cambiadores. Por último se aclara la distancia entre tanques ubicados en un

mismo cubeto que no será inferior al diámetro del mayor de los mismos. Dado que los tanques se han emplazado en cubetos separados, por resultar una disposición más ventajosa en cuanto a dimensiones, esta distancia se respeta sobradamente.

Se establecen las siguientes consideraciones a la hora de situar los equipos:

- Los cambiadores de calor se situarán a nivel del suelo. Pueden disponerse en altura si fuera necesario y a tres alturas uno sobre otros.
- Las bombas se sitúan a nivel del suelo, a pie de *rack* siempre que sea posible y minimizando el tramo de aspiración.
- Los cubetos de los tanques deberán contener todo el volumen de su tanque correspondiente. Sus muros serán de hormigón y no podrá situarse ningún equipo que no sea el propio tanque dentro de los mismos.
- La altura máxima de los cubetos será de 1,8 m y la mínima 0,9 m y su altura será no inferior 150 mm mayor que el nivel de fluido que debería contener. Se preverá la instalación de rampas de acceso.
- La distancia entre pórticos del *rack* de tuberías será de 6 m. La distancia de cualquier equipo, excepto bombas, a los pórticos será de 3 m al menos.
- Los niveles del *rack* se dispondrán perpendicularmente a los ejes de los pilares de los pórticos. Cada piso distará del siguiente no menos de 1,6 m y el nivel inferior distará del suelo cuando menos 4,5 m. Deberán preverse niveles para una posible expansión de la planta.

---

## **Capítulo MD.C6. Criterios de ingeniería**

Se dedica el presente capítulo a la descripción de los criterios de diseño de equipos y selección de materiales, materia que se ha agrupado bajo la denominación “criterios de ingeniería”. Se agrupan en las siguientes categorías:

- Criterios de diseño de recipientes a presión.
  - o Separadores gas-líquido.
  - o Torres de destilación.
  - o Acumuladores.
- Criterios de diseño de tanques.
- Criterios de diseño de cambiadores de calor.
- Criterios de selección de bombas.
- Criterios de selección de materiales.

Se dedicará una sección a cada uno de los criterios, con sus correspondientes apartados para los distintos equipos involucrados, según proceda.

### **MD.C6.1. Criterios de diseño de recipientes a presión**

Son recipientes a presión todos aquéllos cuerpos cerrados capaces de almacenar un fluido a presión interna o a vacío, independientemente de su forma y dimensiones. Típicamente los recipientes presentan forma geométrica de cilindro hueco cerrado por cabezales de distintas geometrías en función de las presiones de operación.

En esta sección se prestará especial atención a los recipientes relacionados con el transporte de materia, esto es, con las operaciones de separación requeridas por el proceso proyectado. Sin perjuicio de lo anterior, debe clarificarse que así los cambiadores de calor, como los acumuladores y los tanques son recipientes a presión si bien, como queda expresado, se les dedicará sección aparte debido a la clasificación por utilidades realizada en el contexto del capítulo actual.

### MD.C6.1.1. Separadores gas-líquido

Un separador de fases gas-líquido es un recipiente a presión, donde un líquido alimentado queda retenido un tiempo de residencia tal, que se permite la separación de un vapor en equilibrio con dicho líquido.

La operación "SIMPLE" lleva a término una vaporización de la carga de butadieno crudo a la planta, por lo que requiere este tipo de separadores, también denominados destiladores simples.

Por su parte, la operación "RECUPERACIÓN" también requiere una vaporización en separador gas-líquido, en este caso de una corriente rica en extractante, a fin de purificarla para su reutilización en el proceso.

Los separadores gas-líquido son cuerpos cilíndricos cerrados por cabezales toriesféricos, para bajas presiones de operación y elípticos para presiones superiores. Normalmente cuentan con dispositivos como un plato para el remanso del líquido de entrada, (lo que facilita la vaporización), un plato adicional sobre el que se dispone una malla metálica con la intención de retener el líquido arrastrado por el vapor, lo que se denomina extractor de neblina, un rompedor de vórtices, o molino de paletas situado en la brida de descarga a fin de evitar turbulencias de cara al buen funcionamiento de las bombas, (debe evitarse la aspiración de gases), entre otros elementos como entradas de hombre y plataformas y escaleras para permitir su acceso.

En la siguiente figura se muestra un esquema para un separador vertical típico, conteniendo los elementos indicados en el párrafo anterior. En el capítulo sexto del anexo segundo se muestra también una figura para ilustrar el separador horizontal.

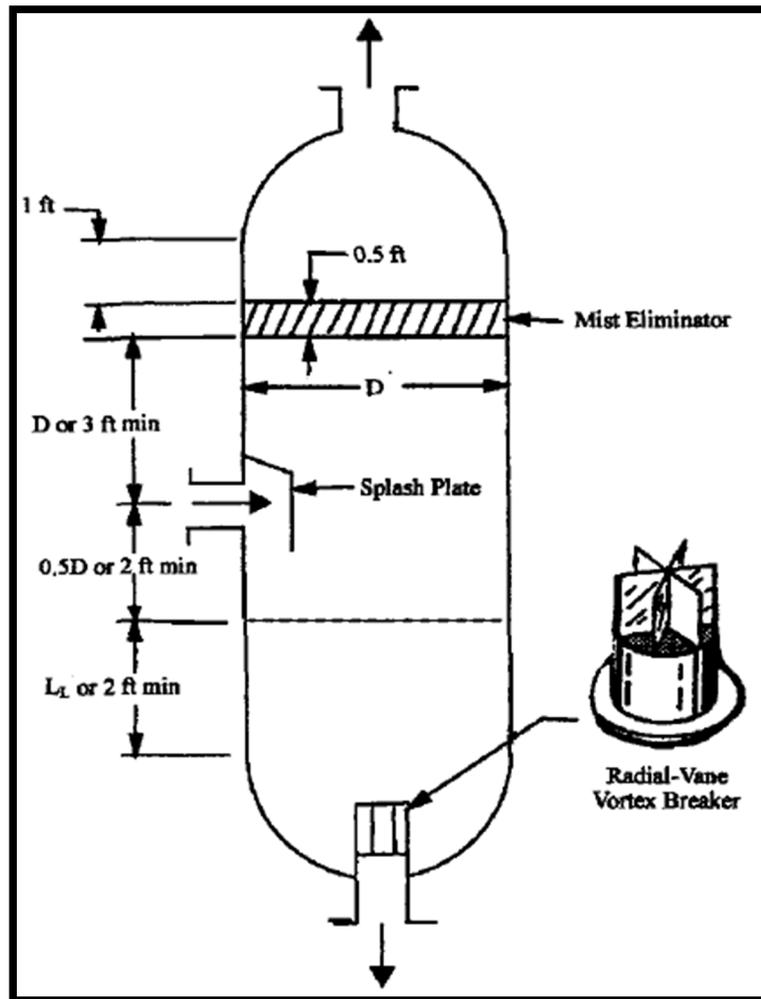


Figura. MD.18. Esquema de un separador vertical. (H. Silla, 2003)

Pueden disponerse en forma vertical u horizontal, presentando las siguientes ventajas y desventajas cada una de las siguientes disposiciones:

- Separador horizontal:
  - o Ventajas:
    - Dirección de caída del líquido perpendicular al flujo perpendicular al flujo en lugar de contracorriente.
    - Mayor capacidad.
    - Mejor control de turbulencia.
    - Mejor uso del volumen de retención.

- Mantenimiento más asequible.
- Mejor para líquidos tendentes a la formación de espumas.
- Desventajas:
  - Mayor espacio requerido para su disposición en planta.
  - No es apropiado si el líquido contiene gran cantidad de sólidos.
  - Los extractores de neblina pueden taponarse y romperse.
- Separadores verticales:
  - Ventajas:
    - Menor superficie ocupada en planta.
    - Limpieza sencilla.
    - Permite manejar sólidos en suspensión.
  - Desventajas:
    - Menor capacidad de líquido.
    - El líquido fluye en contracorriente del vapor, lo que puede causar arrastre.
    - No es apropiado para líquidos espumosos, lo que agrava el problema anterior.
    - Su instalación es tanto más problemática cuanto mayor su altura.

En resumen, como criterio se utilizarán separadores horizontales cuando el volumen de líquido sea elevado, esto es, cuando la vaporización no se produzca en elevado porcentaje.

En el caso de los separadores de “SIMPLE”, se mostrará un porcentaje de vaporización del 63% mientras que en “RECUPERACIÓN” se tiene una vaporización del 20%, ambas respecto de la alimentación. Por las razones indicadas y los métodos de cálculo extensamente desarrollados en el anexo segundo, se decide construir:

- 4 separadores verticales para la operación "SIMPLE". Designados S-1, S-2, S-3 y S-4 en el plano de diagrama de flujo.
- 1 separador horizontal para la operación "RECUPERACIÓN". Designado S-5 en el plano de diagrama de flujo.

### MD.C6.1.2. Torres de destilación

Las torres de destilación suponen la insignia de los ingenieros químicos puesto que se trata de la operación de separación por antonomasia.

El fundamento de la destilación radica en el intercambio de uno o más componentes contenidos en fases distintas por la fuerza impulsora del gradiente de concentración: cuando una mezcla líquida se vaporiza, se altera el estado de equilibrio de forma tal que los componentes de una fase tienden a enriquecer la complementaria donde se encuentran en defecto. Esta migración sucede hasta que se alcanzan condiciones de nuevo equilibrio a la temperatura y presión, los gradientes de concentración se igualan en las fases, ergo la velocidad de transferencia de una fase a la otra se anula y las corrientes parten separadas en nuevas condiciones.

Si el vapor y el líquido de equilibrio, cada uno por separado, vuelven a someterse a unas nuevas condiciones que alteran su estado, el proceso descrito se multiplica en lo que se conoce como etapas de equilibrio, donde cada corriente, procedente de un equilibrio anterior cambia sus características hasta alcanzar un nuevo estado de equilibrio de modo que, cuando se desee, puedan separarse dos fases con las composiciones deseadas.

La definición anterior supone una idea genérica de las operaciones de transferencia, y es tan válida para una destilación, como lo podría ser para otras operaciones.

Más en concreto, la fuerza motriz de la transferencia de materia en las operaciones de destilación es la volatilidad relativa de los componentes implicados: mientras que el líquido se enriquece en componentes poco volátiles, puesto que del seno de éste vaporizan en mayor medida aquéllos que son más ligeros, el vapor se enriquece en dichos compuestos que cambian de fase y se empobrece, a su contacto con el líquido en los más pesados.

La fase vapor cede el calor latente de vaporización de sus componentes a la fase líquida, de modo que, a medida que se obtiene un vapor más rico en volátiles, éste es más frío y el líquido, más caliente.

En otro tipo de destilación, cuando los componentes son muy similares en volatilidad y peso molecular, el gradiente de concentración es tan bajo que las separaciones podrían involucrar un número inadmisibles de etapas, o incluso impedir la separación por la presencia de aceótropos o puntos de inversión de la volatilidad. En estos casos la adición de un tercer componente puede ser capaz de aumentar la volatilidad relativa de unas especies respecto a otras, ya que puede disolver, con mayor o menor selectividad, distintas especies. Esta destilación se denomina extractiva, ya que permite separar mezclas de baja volatilidad relativa, como es el caso para la separación del butadieno de la corriente de butanos alimentada al proceso proyectado, por la inclusión de un agente extractante de relativamente fácil recuperación posterior.

En todo caso, queda manifiesto que la destilación requiere el contacto de fases, de modo que, por existir un gradiente de concentraciones, se fuerce la transferencia de materia hasta el grado deseado. El dispositivo aplicado a tal fin es la torre de destilación: recipientes cilíndricos, de distintas geometrías, cerrados por cabezales de la misma índole descrita para los recipientes para separación gas-líquido simple. A diferencia de estos dispositivos, las torres de destilación no son cilindros huecos puesto que incluyen en su interior algún medio facilitador del contacto de fases.

El contacto en una torre de destilación viene dado por los platos o rellenos. Las torres de platos son los más típicos dispositivos de separación, ya que posibilitan el tratamiento de cargas elevadas con buena flexibilidad de funcionamiento, mientras que las torres de rellenos, aunque proporcionan un mejor contacto y suponen menores pérdidas de carga para los fluidos, (por ello se emplean en aplicaciones a vacío), no son económicamente viables, frente a las de platos, para el tratamiento de alimentaciones elevadas y su mantenimiento es más complejo.

Los platos son discos dispuestos normalmente al eje del casco cilíndrico del recipiente, y soportados por anillos y vigas soldados al mismo. Su utilidad radica en la capacidad de hacer contactar las fases líquido y vapor: mientras el líquido fluye atravesando la superficie habilitada del plato, el vapor atraviesa el plato contactando con el líquido e impidiendo su derrame. El vapor se recoge en la cabeza de la columna, mientras que el líquido sigue camino descendente en zigzag, fluyendo de un plato al inmediatamente inferior a través de vertederos debidamente dispuestos en los platos. Sobre la morfología de platos se discute más extensamente en el anexo de diseño hidráulico. Sigue a continuación la relación de platos más comunes, de cara a decidir el tipo que será de utilidad.

- Platos de orificios o perforados: Son los más económicos, versátiles y disponibles, en lo tocante a formulación de diseño en la literatura y el mercado.
- Platos de válvulas: Se emplean en aplicaciones donde el bloqueo por vapor es un problema de funcionamiento, (a ello contribuye el cierre de las válvulas a bajas velocidades del vapor). Son un 10% más costosos que los anteriores.
- Platos de campana: Con un coste más elevado que los dos anteriores, se utilizan en situaciones de flujo comprometidas por el lloriqueo o derrame de líquido a través de las perforaciones. Soportan mejor que los anteriores las fluctuaciones de caudal de líquido.

La siguiente figura muestra un esquema de las válvulas y campanas y el flujo de vapor a través de las mismas:

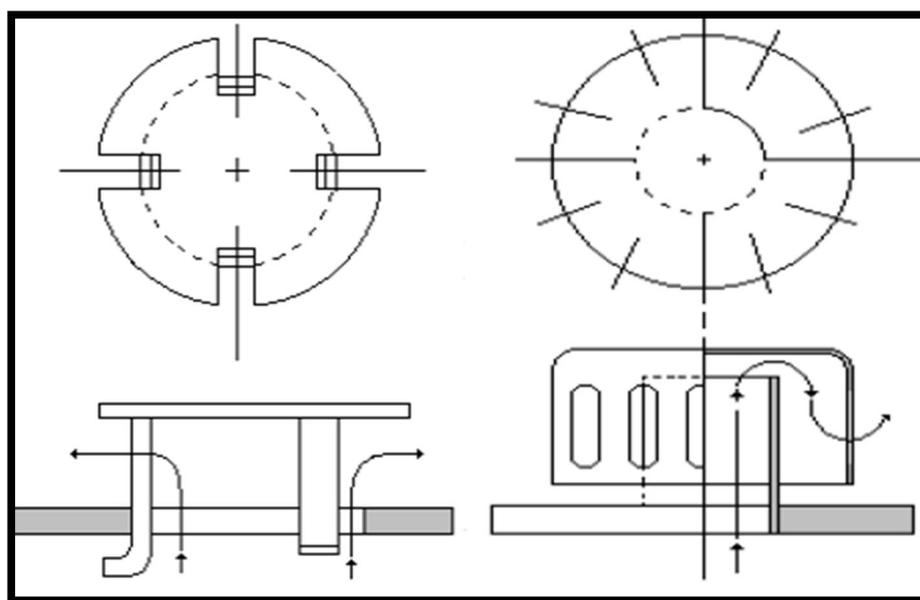


Figura. MD.19. Esquema de válvulas, (izqda.) y campanas, (dcha.).  
(CEPSA, 2011)

Cualquier proceso de diseño de torres de platos debería plantear la viabilidad de emplear platos perforados y recurrir, en caso de condiciones de flujo hostiles, a diseños más sofisticados o incluso plantear una operación diferente llegado el caso.

Un criterio importante de diseño de los platos es su disposición al flujo de líquido. La circulación más habitual es la que se indicó *ut supra*: el líquido circula de plato en plato en zigzag, en flujo cruzado con el vapor ascendente. Este tipo de contacto se denomina en paso único. Sin embargo, aplicaciones industriales con grandes caudales de líquido pueden requerir la instalación de vertederos adicionales en los platos, de modo que la circulación se multiplique. Así se tendrán platos de doble, triple y cuádruple paso donde, platos de disposición alternada fuerzan al líquido a circular en varios pasos. En la siguiente figura se ilustra lo descrito:

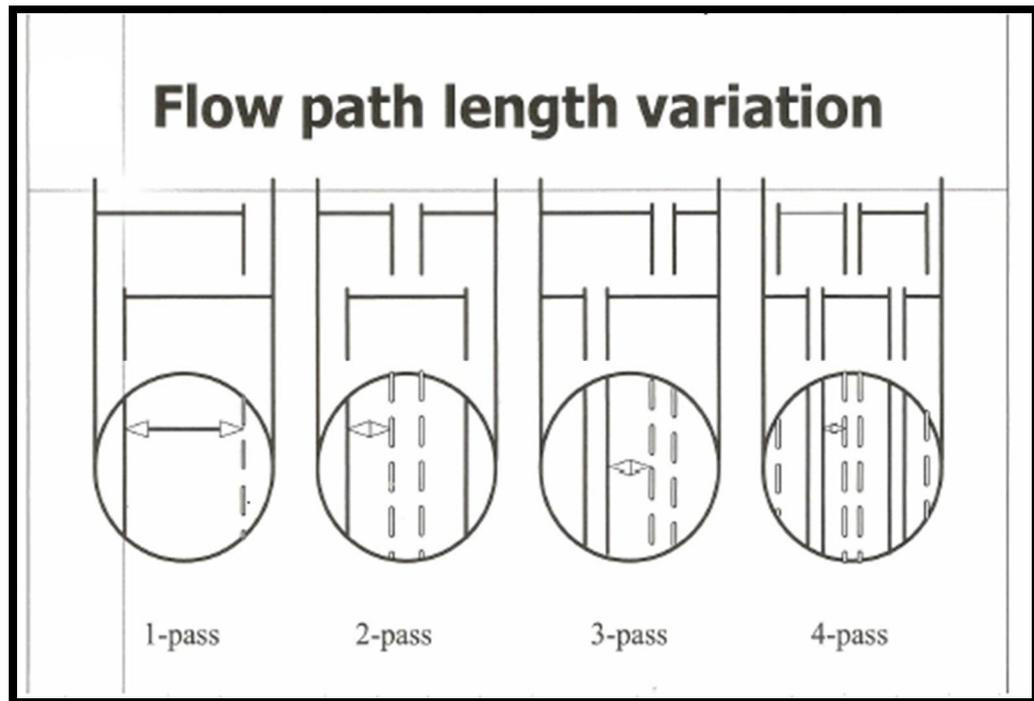


Figura. MD.20. Configuración de platos según pasos. (CEPSA, 2011)

Para las torres requeridas por el PFC, se han seleccionado, una vez verificadas las condiciones de flujo, platos de paso sencillo, doble y triple.

### MD.C6.1.3. Acumuladores

Los acumuladores no son aparatos de separación si bien se han incluido junto a éstos debido a su estrecha relación. La misión de los acumuladores es procurar el reflujo necesario a las torres de destilación.

Dado que en un proceso las condiciones pueden variar, en general no ostensiblemente, se requieren equipos que mantengan un “colchón”, esto es, una reserva del reflujo de modo que la torre siempre disponga de una cantidad de seguridad. Adicionalmente, en caso de aumento descontrolado de la presión, los acumuladores constituyen el primer elemento de seguridad permitiendo relajar la presión en cabeza por liberación de su contenido.

Desde un punto de vista constructivo, dado que almacenan líquidos y no están pensados para la separación de fases, serán recipientes horizontales similares al que se diseña para la operación “RECUPERACIÓN”, aunque carentes de una brida de descarga de vapor como el anterior.

### **MD.C6.2. Criterios de diseño de tanques**

Los tanques son recipientes a presión destinados al almacenamiento previa entrega de productos terminados, (de modo que se garantice un mínimo stock), para mezcla de productos intermedios en la formulación de los anteriores y como elementos intermedios de proceso, y como reservorios de materias primas.

En el caso que atañe al presente PFC, se diseñan tres tanques:

- Tanque de “BLENDING de “EXTRACTIVA 1”.
- Tanque de “FURFURAL FRESCO”.
- Tanque de “BUTADIENO PURIFICADO”.

Los dos primeros son tanques de proceso, como se indicó en el capítulo previo, destinados, el primero, a la mezcla de corrientes terminadas a fin de proporcionar una corriente de alimentación de “EXTRACTIVA 1” que garantice la operación estacionaria; el segundo a la reposición del extractante no recuperable por parte del proceso.

El último tanque, por su parte, queda fuera del área de procesos, ya que su labor no está ligada al mismo, sino al almacenamiento previa disposición comercial del producto terminado principal del proceso.

En cuanto a construcción, existen diversas clases de tanques, entre las que debe destacarse las tres siguientes:

- Tanques de techo fijo.
- Tanques de techo flotante.
- Tanques esféricos y esferoides.

Esta grosera clasificación, se establece en torno a dos parámetros de la sustancia de almacenamiento: su presión de vapor y su punto de inflamabilidad. Obsérvese la siguiente figura:

Clasificación de productos petrolíferos				Producto
CLASE A	PV > 1kg/cm <sup>2</sup>	A1	T < 0°C	Propano Propileno
		A2		Butano
CLASE B	PI < 55°C (PV < 1 kg/cm <sup>2</sup> )	B1	PI < 38°C	Nafta Gasolina Pentano
		B2		Disolventes Keronaftas
CLASE C	PI 55° a 100°C (PV despreciable)			Gasoil Fuel-oil Queroseno
CLASE D	PI > 100°C (PV despreciable)			Asfaltos Parafinas Lubricantes

Figura. MD.21. Clasificación de hidrocarburos. (R.D. 2085/1994)

Se trata de la clasificación de los hidrocarburos según el Reglamento de instalaciones petrolíferas. Para los hidrocarburos clase A, con presión de vapor mayor de 1 kg/cm<sup>2</sup>, se emplearán esferas de almacenamiento; para los de clase B, tanques de techo flotante, capaces de contener las pérdidas por evaporación.

En este caso, el butadieno presenta una presión de vapor de 2,45 kg/cm<sup>2</sup>, según su ficha de seguridad del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, (INSHT), por lo que su almacenamiento se realizará en tanque esférico.

Los otros dos tanques serán de techo flotante, puesto que la presión del furfural es despreciable, si bien su inflamabilidad es cercana al límite superior de la clase B: 60 °C.

### **MD.C6.3. Criterios de diseño de cambiadores de calor**

El presente proyecto prevé la aplicación de cambiadores convencionales de calor, no siendo necesaria la instalación de hornos o calderas.

Un cambiador de calor es un equipo a presión utilizado para refrigerar o calentar fluidos de proceso a partir del contacto con corrientes auxiliares, (agua de refrigeración o vapor típicamente), de modo que su temperatura se adecúa a los requerimientos de la operación correspondiente.

La transferencia de calor tiene lugar a través de una pared metálica o de un tubo que separa ambos fluidos. Las aplicaciones de los intercambiadores de calor son variadas si bien pueden distinguirse las tres siguientes categorías principales:

- Cambiador de calor: Es el nombre genérico por el que se designa el aparato para la refrigeración o calentamiento de corrientes.
- Condensador: Cambiador aplicado para la condensación de un vapor.
- Rehervidor, calderín o *reboiler*, en inglés: Cambiador aplicado para la vaporización de los residuos de columnas de destilación. Es al tiempo un separador de fases, puesto que vaporiza una parte del líquido de fondo de columna, devolviendo su vapor de equilibrio a la misma.

Puesto que no es objeto del PFC la profundización en la red de intercambio de calor, no se incidirá en mayor medida en el catálogo de cambiadores disponibles. Los cambiadores aplicables al PFC serán de carcasa y tubos, los más ampliamente utilizados en la industria química y cuyas consideraciones de diseño están más extensamente definidas.

Su funcionamiento consiste en hacer pasar un fluido calefactor o refrigerador por una carcasa, en la que se inserta una bancada de tubos por los que discurre el fluido cuya temperatura se pretende acondicionar, en términos generales.

Las consideraciones de diseño están estandarizadas por la *Tubular Exchanger Manufacturers Association*, (*TEMA*), cuyos códigos serán la referencia utilizada en el PFC.

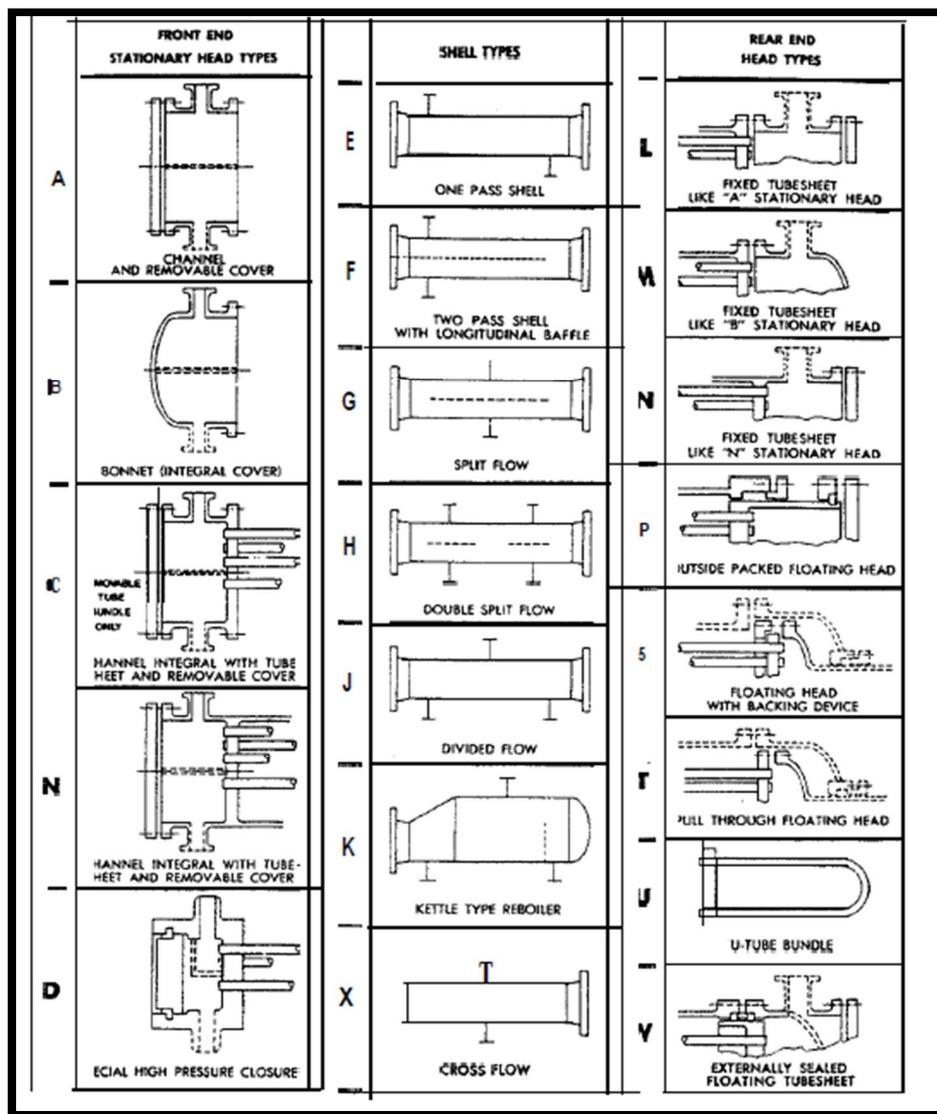


Figura. MD.22. Nomenclatura de cambiadores de calor. (Norma TEMA)

Los cambiadores *TEMA* se identifican mediante tres letras como se muestra en la Figura MD.22 cuyo significado es el que sigue:

- Primera letra: Referida al cabezal de distribución, (el que contiene las bridas de carga y descarga del fluido que circula por la carcasa). Pueden ser de canal y cubierta desmontable o de casquete, (letras A y B respectivamente), entre otros menos comunes.
- Segunda letra: Referida a la carcasa. Las más típicas son las notadas por la letra E, de un solo paso, (las carcasas de dos pasos son de más dificultoso mantenimiento). Las tipo K designan las carcasas típicas de los rehervidores.
- Tercera letra: Referida al cabezal posterior. Los más comunes son de tipo S y T, cabezal flotante con dispositivo de apoyo y cabezal flotante sin contrabrida respectivamente. En el tipo S el diámetro del cabezal es mayor que el del casco y tiene que desmontarse para extraerlo. El tipo T se extrae sin desmontar si bien requiere mayor diámetro de carcasa para la misma superficie de intercambio.

Se repasan seguidamente los tipos más comunes de cambiadores y se justificará la elección efectuada para los equipos del PFC.

- Intercambiador de cabezal flotante interno tipo *AES*

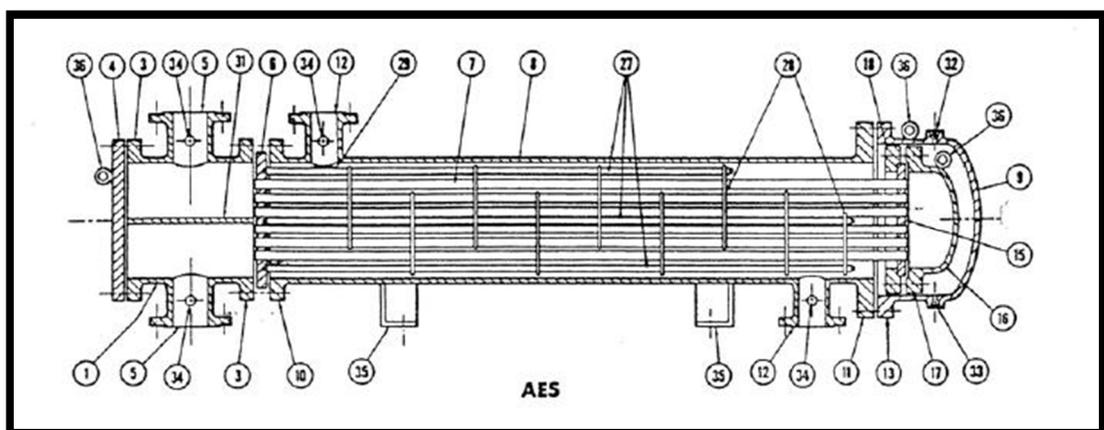


Figura. MD.23. Cambiador *AES*. (Norma *TEMA*)

Es el modelo más común, presenta casco de paso único, doble paso por tubos con canal y cubierta desmontable, y cabezal flotante con dispositivo de apoyo. Presenta desviadores transversales y placas de apoyo.

Sus características son:

- Permite la expansión térmica de los tubos respecto al casco.
- Permite el desmontaje.
- Posibilidad de disponer de 4, 6 u 8 pasos por tubo.
- Los desviadores transversales, con el porcentaje de paso y su separación modifican la velocidad en el casco y su pérdida de carga.
- El flujo es a contracorriente y a favor de corriente en la mitad de los tubos.

- Intercambiador de lámina y tubo fijo tipo *BEM*

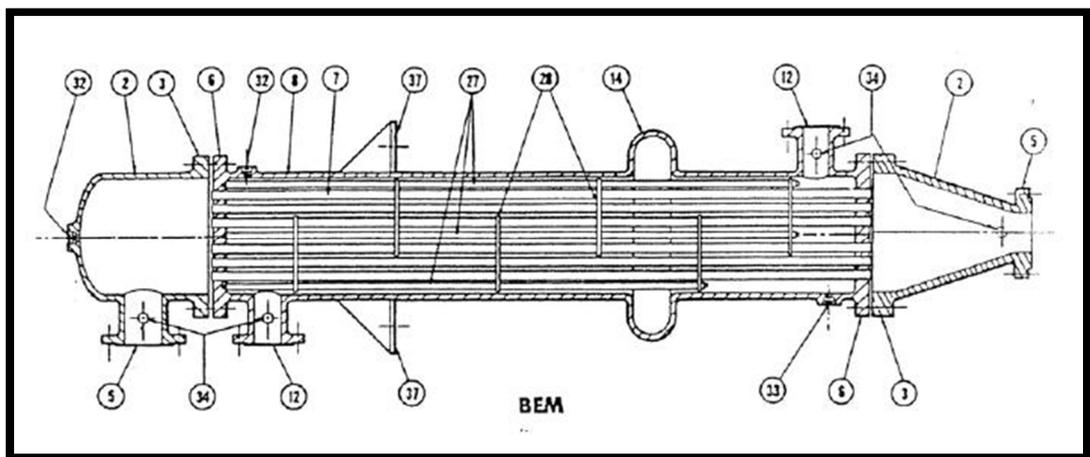


Figura. MD.24. Cambiador *BEM*. (Norma TEMA)

Sus características más importantes son las siguientes:

- No presenta apenas diferencia entre ambos extremos, es de un solo paso en tubo y casco, lo que limita la velocidad dentro de los tubos, reduciendo por consiguiente el coeficiente de transmisión de calor.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Memoria descriptiva

- Tiene junta de expansión en casco.
  - Imposibilidad de apertura para limpieza en lado del casco.
- Intercambiador de cabezal flotante exterior tipo *AEP*

Este modelo permite cierto movimiento del cabezal flotante y puede desmontarse para limpieza. Presenta el inconveniente de precisar un mantenimiento más costoso por necesitar conservar el empaquetado y prevenir las fugas.

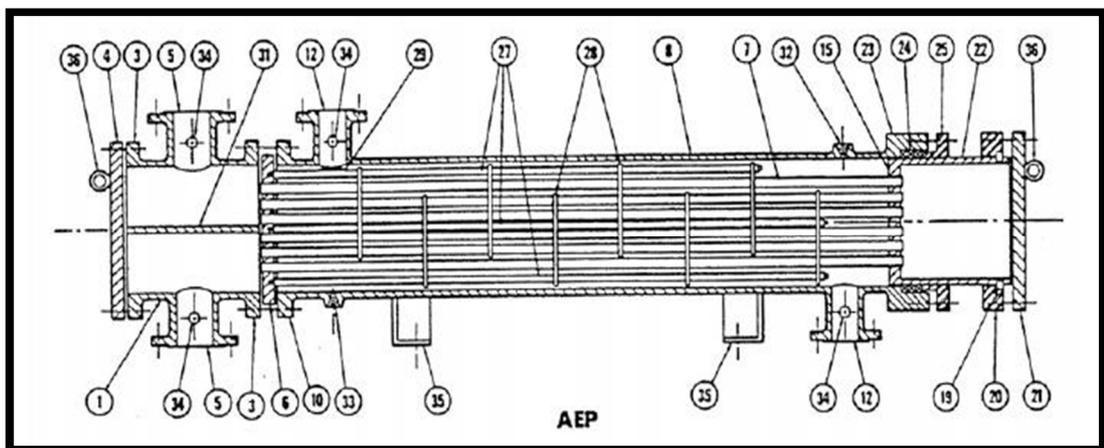


Figura. MD.25. Cambiador *AEP*. (Norma *TEMA*)

- Intercambiador de cabezal y tubos integrados tipo *CFU*

Entre sus características destacan las siguientes:

- Presenta el conjunto de tubos en U, lo que permite un fácil desmontaje de la bancada.
- No obstante lo anterior, la reparación de un tubo dañado es sensiblemente más costosa.
- Presenta el desviador central unido a la placa de tubos.

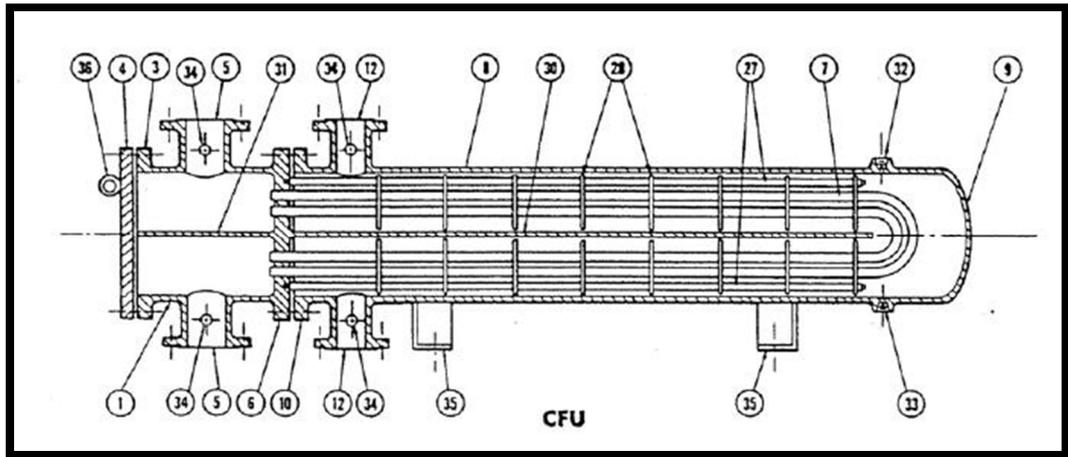


Figura. MD.26. Cambiador *CFU*. (Norma *TEMA*)

- Rehervidor tipo *AKT*

Este cambiador se aplica tanto como calderín en operaciones de destilación o absorción, como para refrigeración de corrientes a muy alta temperatura generando vapor en el proceso.

Su configuración es idónea para favorecer la separación gas-líquido, toda vez que su precio es el más elevado de los cambiadores de carcasa y tubos.

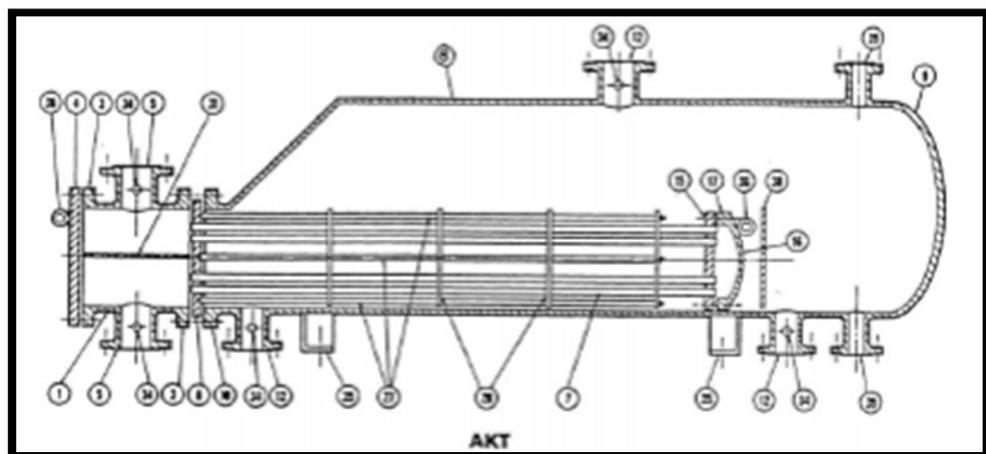


Figura. MD.27. Cambiador *AKT*. (Norma *TEMA*)

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Memoria descriptiva

### - Condensador de flujo dividido AJW

Este cambiador se aplica a la condensación total o parcial de vapores, puesto que disminuye las pérdidas de carga de forma sustancial. La zona de carcasa se destina para el fluido condensante, siendo el paso por tubos destinado al fluido refrigerante. El cambiador presenta un desviador central que divide el flujo en dos corrientes.

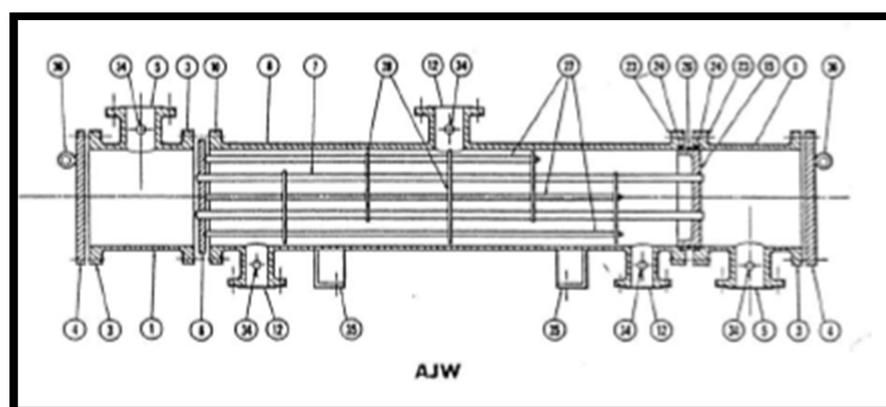


Figura. MD.28. Cambiador AJW. (Norma TEMA)

Vistos los anteriores modelos, procede clasificar los equipos de intercambio de calor del PFC a fin de decidir el tipo de intercambiador que se instalará. Se emplaza al lector al plano de diagrama de flujo donde están ubicados cada uno de los equipos en su contexto de operación:

Inventario de cambiadores de calor				
Operación	Calderín	Condensador	Refrigerador	Calentador
"SIMPLE"	-	E-1, E-2, E-3 y E-4	-	-
"EXTR. 1"	E-6	E-7	-	E-5
"EXTR. 2"	E-8 y E-10	E-9 y E-11	E-24	-
"MÚLTIPLE"	E-12 y E-14	E-13 y E-15	-	-
"BINARIA"	E-16, E-18 y E-20	E-17, E-19 y E-21	-	E-25
"RECUPERACIÓN"	-	E-23	E-22	-

Tabla. MD. XXI. Inventario de cambiadores de calor y sus unidades

La presión de trabajo en todos ellos es de moderada, (9 atm en la operación "RECUPERACIÓN"), a baja, (2-3 atm para el resto de equipos), y las temperaturas de trabajo próximas a la ambiente y de 5 °C en el caso de la última operación. Las unidades E-22, enfriador de la alimentación de "RECUPERACIÓN", y E-23, su condensador, son unidades criogénicas que usarán como fluido refrigerante gas propano.

Los calderines serán cambiadores del tipo *AKT*, el más indicado para la vaporización de líquidos de fondo de columna. Por su uso más extendido, se seleccionarán cambiadores tipo *AJW* para los condensadores totales de las distintas operaciones. Serán del tipo *AES* los cambiadores para acondicionamiento de temperatura sin cambio de fase, correspondiendo a este último tipo el refrigerador E-24, usado para reducir la temperatura del residuo de "EXTRACTIVA 1" de carga a "EXTRACTIVA 2"; E-5, usado para subir la temperatura de la alimentación de "EXTRACTIVA 1" y E-25, para subir la temperatura del destilado de "MÚLTIPLE" de carga a "BINARIA".

Para los calderines el fluido calefactor será vapor de baja presión y, para los condensadores y enfriadores, el fluido refrigerante será agua a 7 °C, ambas corrientes suministradas por la Refinería. Los calentadores E-5 y E-25 también consumirán vapor de baja presión.

En los calderines y calentadores, el vapor de baja presión circulará por carcasa por fluir a mayor presión. En los condensadores, el agua de refrigeración circulará por tubos permitiendo la condensación en la carcasa. Los refrigerantes funcionan al contrario en aras de ofrecer la menor pérdida de carga al fluido de proceso.

#### **MD.C6.4. Criterios de selección de bombas**

El sistema de tuberías, esbozado en el capítulo primero del quinto anexo, requiere distintos dispositivos de bombeo si bien todos

ellos presentan una relación H-Q comprendida dentro de la siguiente tabla:

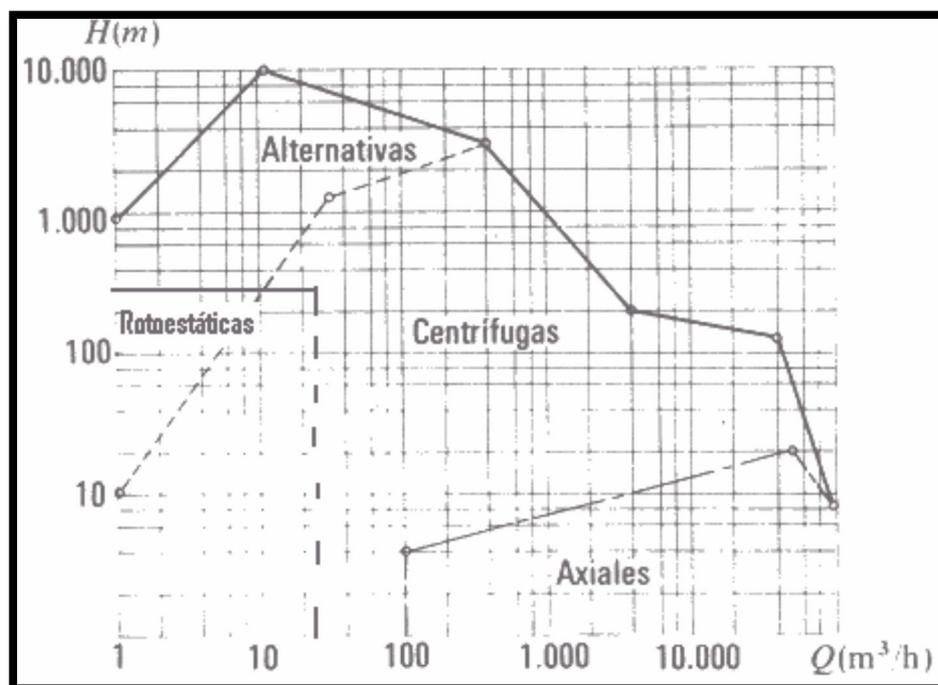


Figura. MD.29. Rango de funcionamiento de bombas. (CEPSA, 2011)

La mayor altura manométrica de las bombas requeridas es de 180 m y el mayor caudal, de 260 m<sup>3</sup>/h, por lo que serán de utilidad las bombas centrífugas, a la sazón, las de aplicación más extendida en la industria química en general, particularmente en refinerías, gracias a su gran versatilidad, bajo coste y a una operación y mantenimiento sencillos.

Las bombas centrífugas constan de las siguientes partes:

- Tubería de aspiración.
- Rodete o impulsor, formado por una serie de álabes que giran dentro de una carcasa circular. El rodete se encuentra unido al eje y es la parte móvil de la bomba. El líquido penetra axialmente por la tubería de aspiración hasta el centro del rodete que es accionado por un motor, experimentando un cambio de dirección y absorbiendo un trabajo.

- La carcasa o voluta está dispuesta en forma de caracol de tal manera que la separación entra la carcasa y el rodete es mínima en la parte superior y va aumentando hasta que el seno del líquido se encuentra frente a la abertura de impulsión.
- Tubería de impulsión.

En la siguiente figura se muestran las partes a que se hace referencia:

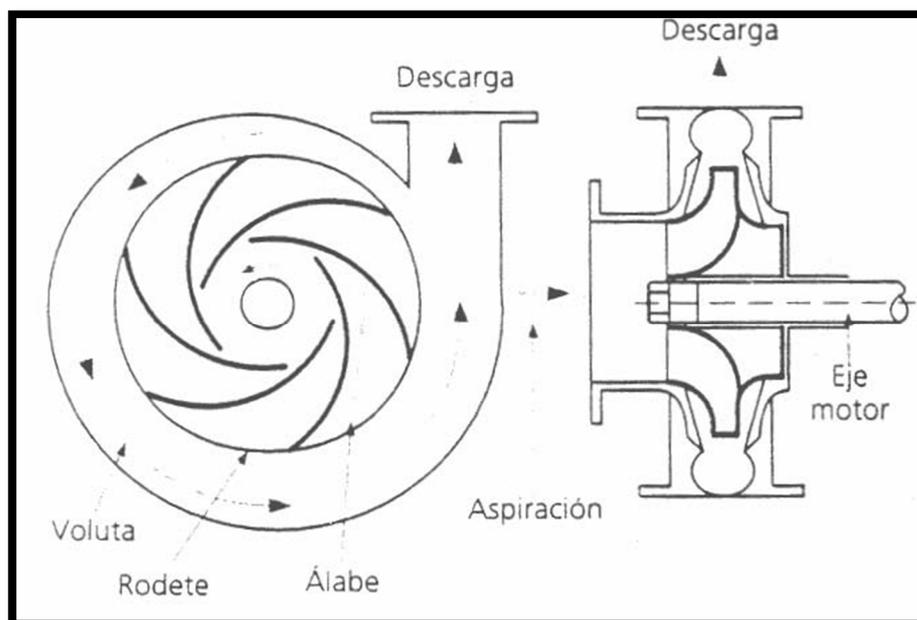


Figura. MD.30. Partes principales de una bomba centrífuga. (CEPSA, 2011)

### **MD.C6.5. Criterios de selección de materiales**

Puesto que los distintos compuestos de la alimentación del proceso, así como el extractante, son especies no corrosivas, el material de construcción será acero al carbono.

Las condiciones de presión y temperatura del proceso son asimismo lo suficientemente benignas como para emplear aceros al carbono según distintas especificaciones, tal como se mostrará y justificará para cada elemento en los anexos de cálculo.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Memoria descriptiva

---

Los recipientes de “SIMPLE”, “RECUPERACIÓN”, los acumuladores, cambiadores, bombas y tanques se construirán a partir de acero según SA-285 grado C, a la sazón el más económico. Las torres de destilación usarán como material estructural acero al carbono según SA-515 grado 70, por requerir una resistencia mecánica superior.

---

## **Capítulo MD.C7. Hojas de datos de equipos**

Se dedica el presente capítulo a la descripción de los detalles de construcción, de los distintos equipos involucrados en el proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas.

Siguiendo un orden paralelo al establecido en el capítulo anterior, se abordan las especificaciones de los recipientes a presión, tanques, sistema de tuberías y bombas.

Puesto que el diseño en profundidad de los aparatos de intercambio de calor no es objeto del presente PFC, se excluye la inclusión del resumen de sus dimensiones y diseño mecánico. El siguiente será el orden del capítulo:

- Generalidades sobre recipientes a presión.
- Hojas de datos de recipientes a presión.
  - o Separadores gas-líquido.
  - o Torres de destilación.
  - o Acumuladores.
- Generalidades sobre tanques.
- Hojas de datos de tanques.
- Generalidades sobre tuberías y bombas.
- Hojas de datos de tuberías y bombas.

Se dedicará una sección a cada uno de los conceptos anteriores.

### **MD.C7.1. Generalidades sobre recipientes a presión**

Se describirán en el presente apartado aquéllos conceptos que posteriormente formarán parte de las hojas de datos de los distintos equipos.

### MD.C7.1.1. Separadores gas-líquido

A los separadores gas-líquido ingresa una alimentación líquida, que vaporiza y se escinde por la brida superior de descarga, del líquido de cola que evacúa por la brida de fondo. En las hojas de datos se especificará puntualmente las corrientes de alimentación y salida de los separadores.

También será objeto de las hojas de datos la configuración del recipiente, su número, diámetro y altura, si la configuración fuera vertical, o diámetro y longitud si fuera horizontal. Se adjuntará también el tiempo de residencia, esto es, el tiempo que permanece el líquido en el aparato previo a su descarga. El último dato de diseño hidráulico es el nivel del líquido. El resto de datos se proporcionará y justificará convenientemente en los anexos de cálculo.

Dentro de los datos de diseño mecánico conviene destacar los siguientes conceptos, válidos para todos los tipos de recipientes a presión.

Todo recipiente a presión está formado por la envolvente, dispositivos de sujeción o apoyo del propio equipo, conexiones por las que ingresan y descargan los fluidos, elementos internos y accesorios exteriores del recipiente. Se describen someramente los citados elementos.

#### - Envolvente

Se trata de la envoltura metálica que forma en sí el recipiente. Como se ha indicado en el apartado previo, los aparatos cilíndricos son los más utilizados y, en ellos, la envolvente está formada, básicamente, por dos elementos: la parte cilíndrica o casco y los fondos o cabezales. Si el casco está compuesto por cuerpos cilíndricos de diversos diámetros, la transición entre los mismos se practicará mediante inclusión de un cuerpo troncocónico. En los anexos se deno-

minará “chapa envolvente” al revestimiento protector del aislamiento en material aluminio. No debe confundirse con el presente concepto.

- Casco

El casco está formado por una serie de virolas soldadas unas con otras, entendiéndose por virola el trozo de tubería o una chapa que, convenientemente curvada y soldada, forma un cilindro sin costuras circunferenciales.

La unión de varias virolas forma el casco, de forma que la suma de las alturas de los cilindros obtenidos por las virolas será la requerida por el casco.

Las soldaduras de una virola son axiales y longitudinales, ya que están realizadas unas siguiendo la generatriz del cilindro, (las que cierran virolas) y otras uniendo las virolas y los cabezales al casco, siguiendo la línea circunferencial que forma su perímetro. Cuando el diámetro de un casco es menor de 30 pulgadas (0,762 m), se emplea normalmente tubería, mientras que para diámetros superiores se construyen a partir de chapa.

Cuando los espesores requeridos para el casco son muy elevados, procede construirlo en material forjado, o con varias cubiertas de menor espesor embebidas en caliente.

- Cabezales

Los cabezales o fondos son las tapas que cierran la carcasa. Normalmente son bombeados, existiendo una gran diversidad de tipos entre ellos, y, como excepción, existen fondos cónicos y planos de muy reducida utilización.

Todos los fondos se realizan a partir de chapa, a la que mediante estampación se le confiere la forma deseada, salvo el caso de fondos cónicos y planos.

En los fondos se realiza la transición de una figura bombeada a una cilíndrica, que es el casco; esta línea de transición, denominada precisamente línea de tangencia, está sometida a grandes tensiones axiales que se traducen en fuertes tensiones locales, siendo éste el punto más débil del recipiente. Por esta razón no es aconsejable realizar la soldadura de unión cabezal-casco a lo largo de dicha línea. Al objeto de evitar la coincidencia, los fondos bombeados se construyen con una parte cilíndrica, denominada pestaña o faldilla, cuya altura mínima varía según códigos y fabricantes.

Al respecto de estos conceptos se incluirá en la hoja de datos de los recipientes, el material de construcción, espesores de casco, cabezales y cono si lo hubiera, espesor de aislamiento, peso del recipiente vacío y datos sobre los soportes y accesos. También se indicará el tipo de cabezal seleccionado, delegando en los anexos de diseño mecánico su justificación.

En cuanto a los accesorios externos a los recipientes, conviene mencionar sus soportes de instalación del aislamiento, anclajes para aplicación de protección contra incendios, soportes de escalera y plataformas, soportes para tuberías, pescantes, accesos de hombre, aislamiento y apoyo del recipiente.

Se pasa a comentar los aspectos más relevantes acerca de tales conceptos.

- Soportes de instalación del aislamiento

Cuando la temperatura del fluido interior es superior a 60 °C, o bien se trata de un proceso sensible a las variaciones de temperatura ambiental, como es el caso y se justifica por extenso en los anexos de diseño mecánico, se deberá prever la instalación de un aislante que impida la pérdida de calor o el calentamiento del interior, así como por seguridad. Este aislamiento vendrá soportado por unos anillos o clips que se soldarán al casco.

- Anclajes para aplicación de protección contra incendios

Si un equipo está instalado en una zona donde existe peligro de incendio, o por las propias características inflamables de las sustancias involucradas, se aplicará al soporte del recipiente un recubrimiento de cemento protector. Para la aplicación de dicha capa, deberán soldarse anclajes que sirvan de soporte a la capa de cemento ignífugo.

- Soportes de escalera y plataformas

Se preverá la instalación de escaleras y plataformas para proporcionar acceso a las bocas de hombre y en todo caso de descanso cada 30 ft (9,1 m) de altura, en los recipientes verticales. En los recipientes horizontales se prescinde de la instalación de escaleras y plataformas, no así de accesos de hombre. Se preverá la instalación de clips soldados en la envolvente, a las que se atornillan estos elementos.

Las medidas para escaleras y plataformas se proporcionan en las figuras MD.31 y MD.32.

- Soportes para tubería

Igualmente, para las tuberías bajantes se instalarán clips de soporte.

- Pescantes

Para los recipientes comerciales que contienen elementos pesados en su interior, (las torres de platos), es preciso instalar un pescante en la parte superior del equipo para facilitar la instalación y la retirada de los citados internos. Los separadores gas-líquido no requieren la instalación de pescantes, puesto que no contienen elementos internos masivos, no así las torres de destilación.

# Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Memoria descriptiva

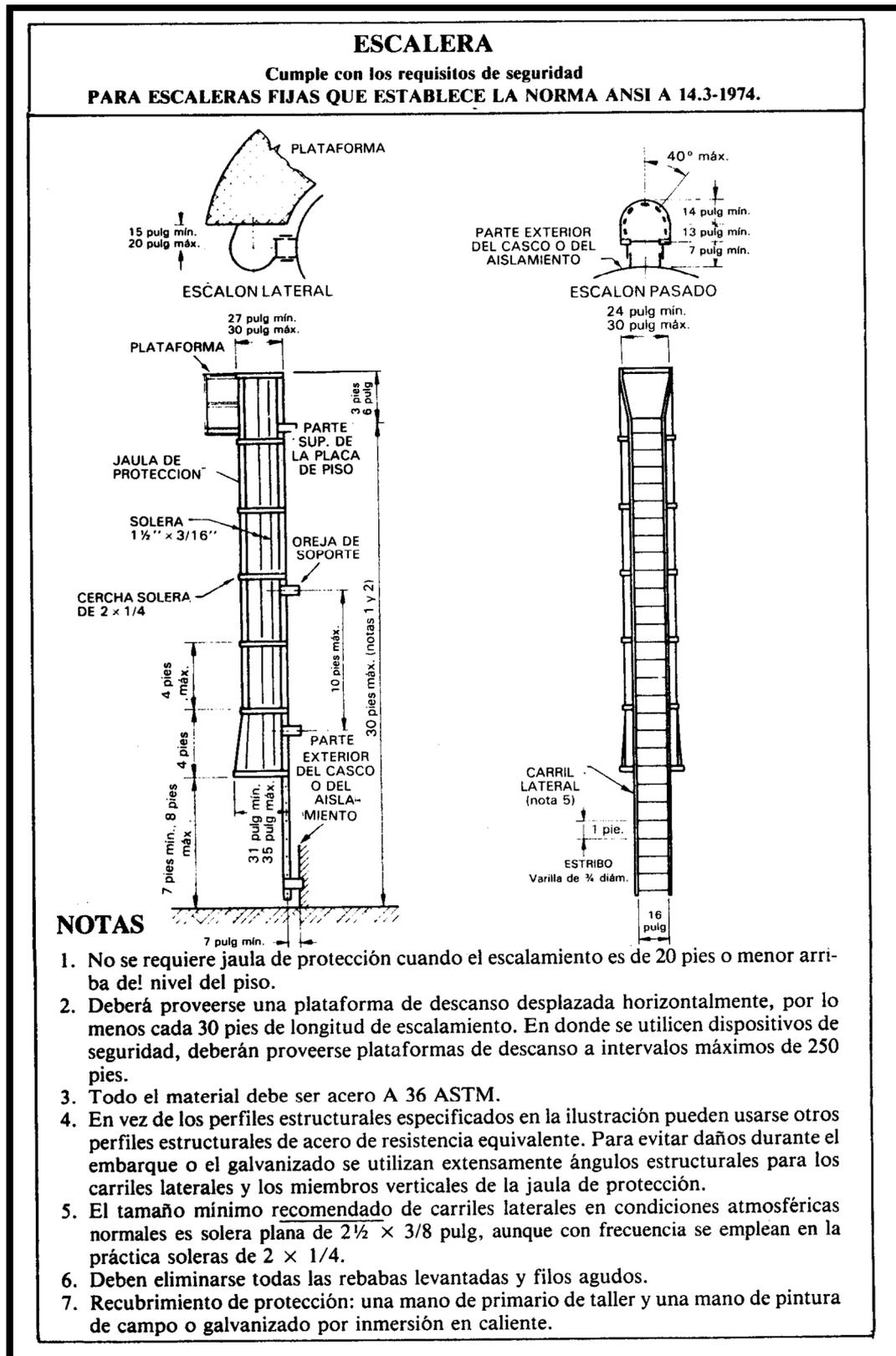


Figura. MD.31. Especificaciones ANSI sobre la escalera. (E. F. Megyesy, 1992)

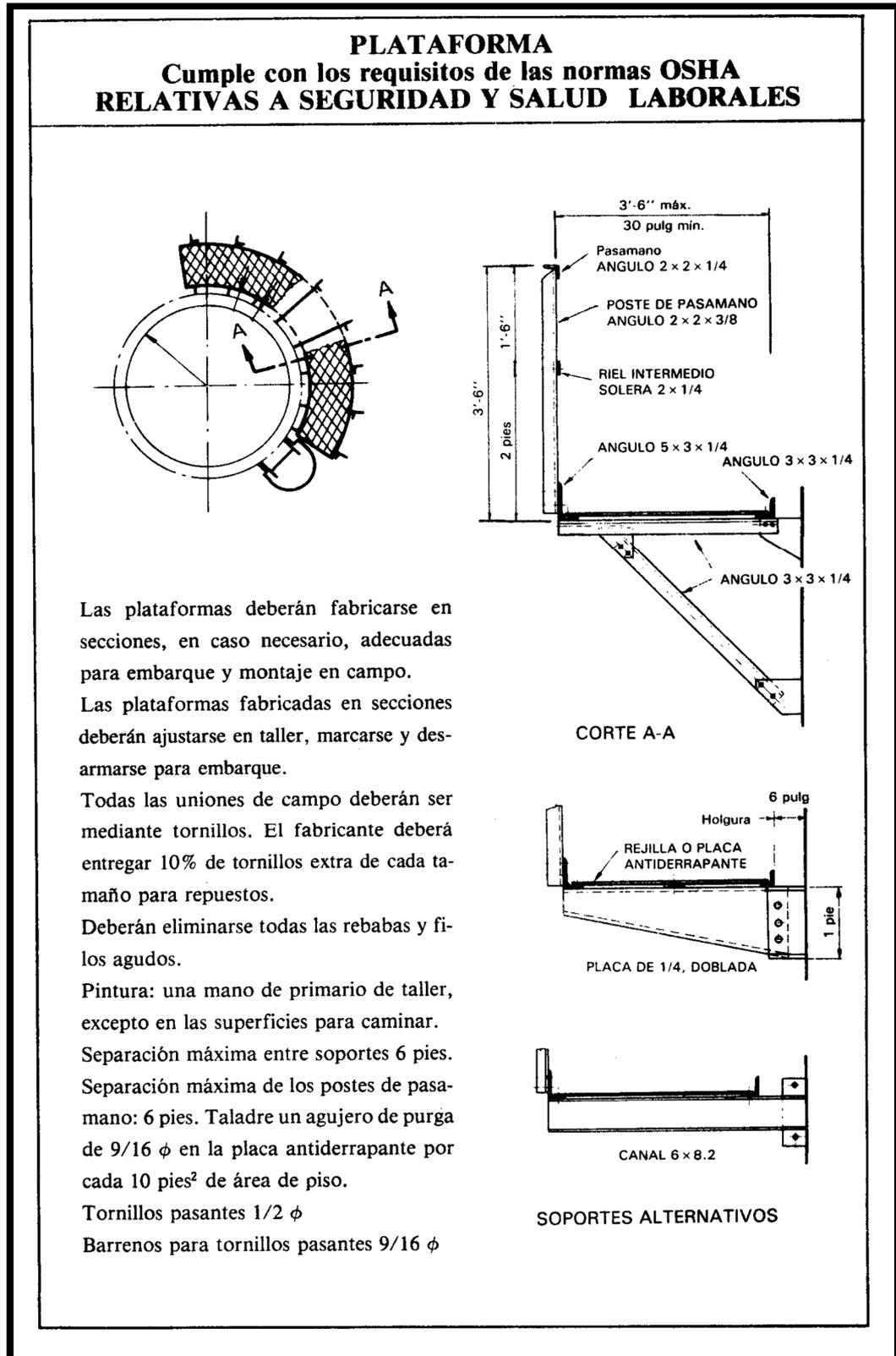


Figura. MD.32. Especificaciones OSHA sobre plataformas. (E. F. Megyesy, 1992)

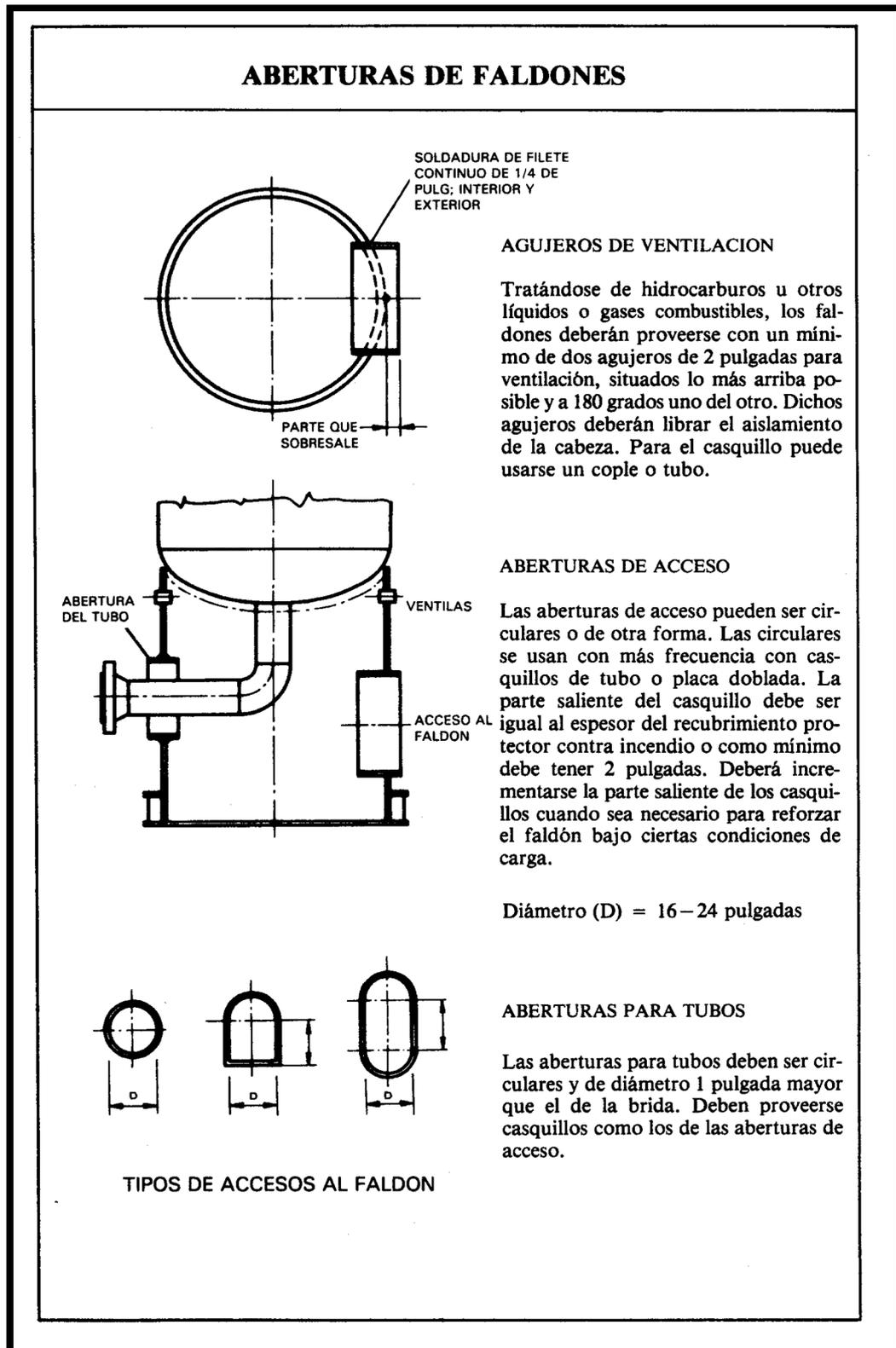


Figura. MD.33. Especificaciones ASME sobre elementos del faldón.

(E. F. Megyesy, 1992)

- Accesos de hombre

Los recipientes a presión deberán incluir aberturas en sus cascos, en función de su tamaño para permitir su inspección y eventual reparación. El tamaño estándar de dichos accesos oscila entre 16 y 24 pulgadas según código ASME. Así, se seleccionará entradas de 60 cm (23,6 pulgadas) para todos los recipientes, a excepción de los acumuladores de menores dimensiones, para los que se preverá una entrada menor. Las columnas preverán la instalación de bocas de hombre a la altura de los platos críticos de columna: último plato o de fondo, plato de alimentación y plato primero o superior. El acceso al resto de platos se practicará a través de las aperturas previstas en los platos en su región perforada.

- Aislamiento del recipiente

Los recipientes se cubrirán con el espesor de lana de vidrio calculada en los anexos pertinentes de diseño mecánico.

- Apoyo de los recipientes

Los recipientes horizontales se apoyan sobre el terreno, o estructura portante, por medio de silletas de acero o cemento, siendo las más habituales, y aplicadas en el PFC, las primeras.

Desde los puntos de vista estático y económico, se prefiere el uso de dos silletas únicamente a diferencia del sistema de varios soportes. La ubicación de las silletas viene determinada por la situación de la situación de la abertura de fondo del recipiente. Para todos los recipientes horizontales diseñados, se preverá una tubuladura de fondo centrada, por lo que las silletas se colocarán junto a la línea de tangencia del casco y sus cabezales.

Al objeto de no crear tensiones en el equipo, es necesario que éste pueda dilatarse libremente sobre el eje principal, por lo que una de las silletas dispondrá de libertad de movimiento, mientras que la restante quedará fijada al terreno por pernos de anclaje.

Las características de este diseño se participan por extenso en los anexos de diseño mecánico de los distintos aparatos.

El soporte de recipientes verticales consistirá en faldones cilíndricos. Son éstos elementos estructurales en forma de cuerpo cilíndrico sobre el que descansará el recipiente, apoyando uniformemente su carga a lo largo del perímetro de la circunferencia de soldadura, evitando concentraciones de esfuerzos en la envolvente y disminuyendo el esfuerzo transmitido al suelo. Este elemento de soporte es el más indicado en torres altas que ejercen esfuerzos elevados sobre el terreno.

El faldón a su vez descansará sobre un anillo de base que contiene los pernos de anclaje. El número de pernos será siempre un múltiplo de 4.

Los faldones preverán entrada a su interior y ventilaciones para evitar la acumulación de gases en su interior. Se muestran los criterios de diseño de los faldones en la Figura MD.33.

#### MD.C7.1.2. Torres de destilación

Además de los datos que, como recipientes a presión, comparten con los aparatos anteriores, las torres de destilación incluirán entre sus hojas de datos referencias a las corrientes, tubuladuras, y demás datos concernientes al diseño de los platos, como son: diámetro, espaciado, pasos, número por zona de columna, área de plato y activa, altura y longitud de los vertederos, así como el espesor de plato y número de perforaciones.

## **MD.C7.2. Hojas de datos de recipientes a presión**

### **MD.C7.2.1. Separadores gas-líquido**

<b>Hoja de datos de los separadores de "SIMPLE"</b>							
<b>Designación y número</b>		S-1, S-2, S-3 y S-4 (4 separadores)					
<b>Material de construcción</b>		Acero al carbono según SA-285 grado C					
<b>Características comunes</b>							
<b>Diseño hidráulico</b>							
<b>Disposición</b>		Vertical					
<b>Diámetro (m)</b>		1,2					
<b>Altura (m)</b>		3,8					
<b>Tiempo de residencia (s)</b>		240					
<b>Nivel del líquido (m)</b>		1,5					
<b>Otros elementos</b>		Extractor de neblina, rompedor de vórtices					
<b>Casco</b>							
<b>Diámetro interno (m)</b>		1,2					
<b>Espesor comercial (in y mm)</b>		(5/16 y 7,94)					
<b>Altura total del recipiente (m)</b>		5,8					
<b>Cabezales</b>							
<b>Tipo</b>		Toriosférico <i>Klopper</i>					
<b>Espesor comercial (in y mm)</b>		(3/8 y 1,48)					
<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>		0,201					
<b>Otros elementos</b>							
<b>Escalera/plataformas</b>		Sí / 2					
<b>Nº accesos de hombre (diámetro)</b>		1 (0,6 m)					
<b>Aislamiento de lana de vidrio (mm)</b>		25					
<b>Tipo de soporte</b>		Faldón, 8 pernos					
<b>Tubuladuras</b>							
<b>Alimentación (A)</b>		Tubería 3", Sch 40, BW, según SA-106 B					
<b>Descarga de líquido (DL)</b>		Tubería 2", Sch 120, BW, según SA-106 B					
<b>Descarga de vapor (DV)</b>		Tubería 20", Sch 10, BW, según SA-106 B					
<b>Líneas de corrientes</b>							
<b>S-1</b>		<b>S-2</b>		<b>S-3</b>		<b>S-4</b>	
<b>A</b>	P-6 (L <sub>0</sub> /4)	<b>A</b>	P-7 (L <sub>0</sub> /4)	<b>A</b>	P-8 (L <sub>0</sub> /4)	<b>A</b>	P-9 (L <sub>0</sub> /4)
<b>DL</b>	P-10 (L/4)	<b>DL</b>	P-11 (L/4)	<b>DL</b>	P-12 (L/4)	<b>DL</b>	P-13 (L/4)
<b>DV</b>	P-14 (V/4)	<b>DV</b>	P-15 (V/4)	<b>DV</b>	P-16 (V/4)	<b>DV</b>	P-17 (V/4)

Tabla. MD. XXII. Hoja de datos de los separadores de "SIMPLE"

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Memoria descriptiva

Los separadores de “SIMPLE” son cuatro recipientes verticales gemelos. En la Tabla MD.XII se muestran sus principales datos de diseño. En última instancia se ha incluido información sobre las líneas que alimentan y parten de los distintos equipos y la correspondiente corriente que circula por tales conducciones. Se sugiere al lector que despliegue el plano de flujo de proceso mientras procede a la lectura de estos datos. Las corrientes y sus designaciones fueron especificadas en el capítulo segundo de la presente memoria descriptiva. Se sigue la hoja de datos de los equipos de la operación “RECUPERACIÓN”.

<b>Hoja de datos del separador de “RECUPERACIÓN”</b>	
<b>Designación y número</b>	S-5
<b>Material de construcción</b>	Acero al carbono según SA-285 grado C
<b>Características comunes</b>	
<b>Diseño hidráulico</b>	
<b>Disposición</b>	Horizontal
<b>Diámetro (m)</b>	1,1
<b>Longitud (m)</b>	11,7
<b>Tiempo de residencia (s)</b>	525
<b>Nivel del líquido (m)</b>	0,6
<b>Otros elementos</b>	Rompedor de vórtices
<b>Casco</b>	
<b>Diámetro interno (m)</b>	1,1
<b>Espesor comercial (in y mm)</b>	(7/16 y 11,11)
<b>Cabezales</b>	
<b>Tipo</b>	Toriesférico <i>Korboggen</i>
<b>Espesor comercial (in y mm)</b>	(1/2 y 12,70)
<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	0,335
<b>Otros elementos</b>	
<b>Escalera/plataformas</b>	No
<b>Nº accesos de hombre (diámetro)</b>	1 (0,6 m)
<b>Aislamiento de lana de vidrio (mm)</b>	50
<b>Tipo de soporte</b>	2 silletas

Tabla. MD. XXIII. Hoja de datos del separador de “RECUPERACIÓN”. (Continúa en página siguiente)

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Memoria descriptiva

Tubuladuras	
<b>Alimentación (A)</b>	Tubería 3", Sch 30, BW, según SA-106 B
<b>Descarga de líquido (DL)</b>	Tubería 2-1/2", Sch 10, BW, según SA-106 B
<b>Descarga de vapor (DV)</b>	Tubería 5", Sch 10, BW, según SA-106 B
Líneas de corrientes	
S-5	
<b>A</b>	P-135 (X)
<b>DL</b>	P-138 (L')
<b>DV</b>	P-136 (V')

Tabla. MD. XXIII. Hoja de datos del separador de "RECUPERACIÓN". (Viene de página anterior)

### MD.C7.2.2. Torres de destilación

Se sigue la hoja de datos correspondiente a los equipos de "EXTRACTIVA 1".

Hoja de datos de "EXTRACTIVA 1"		
<b>Designación y número</b>	D-1, D-2 y D-3 (3 torres de destilación)	
<b>Material de construcción</b>	Acero al carbono según SA-515 grado 70	
Diseño hidráulico		
	D-1	D-2 y D-3
<b>Tipo de plato</b>	Perforado	
<b>Nº de platos agotamiento / Nº de pasos</b>	50/3	-
<b>Nº de platos rectificación / Nº de pasos</b>	26/2	75/2
<b>Diámetro zona rectificación (m)</b>	5	5
<b>Diámetro zona agotamiento (m)</b>	6,5	-
<b>Reducción de diámetro</b>	Sí	No
<b>Espaciado de platos (m)</b>	0,9	
<b>Área de platos (m<sup>2</sup>)</b>	33,183/19,635	19,635
<b>Altura de vertederos (cm)</b>	9	
<b>Longitud de vertederos laterales (mm)</b>	3,50/4,55	4,55
<b>Espesor de platos (mm)</b>	4,5	
<b>Nº de perforaciones</b>	14761/10269	10269

Tabla. MD. XXIV. Hoja de datos de "EXTRACTIVA 1". (Continúa en pág. siguiente)

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Memoria descriptiva

<b>Casco y cono</b>					
		<b>D-1</b>	<b>D-2</b>	<b>D-3</b>	
<b>Espesor com. zona rect. (in y mm)</b>		(1-3/16 y 30,16)		(1 y 25,40)	
<b>Espesor com. zona agot. (in y mm)</b>		(1-3/16 y 30,16)		-	
<b>Espesor com. cono (in y mm)</b>		(1-1/4 y 31,75)		-	
<b>Altura cono (m)</b>		1,3		-	
<b>Altura total del recipiente (m)</b>		77,0		74,4	
<b>Cabezales</b>					
<b>Tipo</b>		Toriesférico <i>Klopper</i>			
<b>Espesor com. ambos cabezales (in y mm)</b>		(1-1/4 y 31,75)		(1-3/16 y 30,16)	
<b>Volumen cabezal superior (m<sup>3</sup>)</b>		14,432		14,323	
<b>Volumen cabezal inferior (m<sup>3</sup>)</b>		30,601			
<b>Otros elementos</b>					
<b>Escalera/plataformas</b>		Sí/9			
<b>Nº accesos de hombre (diámetro)</b>		3 (0,6 m)			
<b>Aislamiento de lana de vidrio (mm)</b>		40			
<b>Tipo de soporte</b>		Faldón, 44 pernos		Faldón, 36 pernos	
<b>Tubuladuras</b>					
<b>Alimentación (A1)</b>		Tubería 5", Sch 10, BW, según SA-106 B		D-1	
<b>Descarga de líquido (DL1)</b>		Tubería 8", Sch 60, BW, según SA-106 B		D-1	
<b>Vapor recirculado (VR1)</b>		Tubería 34", Sch 10, BW, según SA-106 B		D-1	
<b>Descarga/carga de vapor (DV12)</b>		Tubería 36", Sch 10, BW, según SA-106 B		D-1, D-2	
<b>Descarga líquido/recirculación (LR12)</b>		Tubería 5", Sch 10, BW, según SA-106 B		D-1, D-2	
<b>Descarga/carga de vapor (DV23)</b>		Tubería 34", Sch 10, BW, según SA-106 B		D-2, D-3	
<b>Descarga líquido/recirculación (LR23)</b>		Tubería 5", Sch 10, BW, según SA-106 B		D-2, D-3	
<b>Descarga de vapor (DV3)</b>		Tubería 34", Sch 10, BW, según SA-106 B		D-3	
<b>Recirculación de líquido (LR3)</b>		Tubería 5", Sch 10, BW, según SA-106 B		D-3	
<b>Líneas de corrientes</b>					
<b>D-1</b>		<b>D-2</b>		<b>D-3</b>	
<b>A1</b>	P-27 (U)	<b>DV12</b>	P-31 (V)	<b>DV23</b>	P-33 (V)
<b>DL1</b>	P-28 (L')	<b>LR12</b>	P-30 (L)	<b>LR23</b>	P-32 (L)
<b>VR1</b>	P-29 (V')	<b>DV23</b>	P-33 (V)	<b>DV3</b>	P-34 (V)
<b>DV12</b>	P-31 (V)	<b>LR23</b>	P-32 (L)	<b>LR3</b>	P-37 (L)
<b>LR12</b>	P-30 (L)				

Tabla. MD. XXIV. Hoja de datos de "EXTRACTIVA 1". (Viene de pág. anterior)

Las tuberías que son compartidas por los distintos equipos no se repiten. Los datos hidráulicos correspondientes a las zonas de distinto diámetro de la torre D-1 vienen dados separados por una barra.

Se sigue la hoja de datos correspondiente a los equipos de “EXTRACTIVA 2”.

<b>Hoja de datos de “EXTRACTIVA 2”</b>		
<b>Designación y número</b>	D-4, D-5, D-6 y D-7 (4 torres de destilación)	
<b>Material de construcción</b>	Acero al carbono según SA-515 grado 70	
<b>Diseño hidráulico</b>		
	<b>D-4 y D-6 (Tren 1)</b>	<b>D-5 y D-7 (Tren 2)</b>
<b>Tipo de plato</b>	Perforado	
<b>Nº de platos agotamiento / Nº de pasos</b>	45/2	-
<b>Nº de platos rectificación / Nº de pasos</b>	10/2	56/2
<b>Diámetro zona rectificación (m)</b>	7	
<b>Diámetro zona agotamiento (m)</b>		
<b>Espaciado de platos (m)</b>	0,9	
<b>Área de platos (m<sup>2</sup>)</b>	38,485	
<b>Altura de vertederos (cm)</b>	9	
<b>Longitud de vertederos laterales (mm)</b>	4,9	
<b>Espesor de platos (mm)</b>	4,5	
<b>Nº de perforaciones</b>	20127	
<b>Casco</b>		
<b>Espesor com. zona rect. (in y mm)</b>	(7/8 y 22,22)	
<b>Espesor com. zona agot. (in y mm)</b>		
<b>Altura total del recipiente (m)</b>	56,4	57,3
<b>Cabezales</b>		
<b>Tipo</b>	Toriesférico <i>Klopper</i>	
<b>Espesor com. ambos cabezales (in y mm)</b>	(15/16 y 23,81)	(1-3/16 y 30,16)
<b>Volumen cabezal superior (m<sup>3</sup>)</b>	73,643	
<b>Volumen cabezal inferior (m<sup>3</sup>)</b>		
<b>Otros elementos</b>		
<b>Escalera/plataformas</b>	Sí/7	
<b>Nº accesos de hombre (diámetro)</b>	3 (0,6 m)	
<b>Aislamiento de lana de vidrio (mm)</b>	30	
<b>Tipo de soporte</b>	Faldón, 48 pernos	

Tabla. MD. XXV. Hoja de datos de “EXTRACTIVA 2”. (Continúa en pág. siguiente)

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Memoria descriptiva

Tubuladuras			
<b>Alimentación (A46)</b>		Tubería 3", Sch 10	D-4 y D-6
<b>Descarga de líquido (DL46)</b>		Tubería 6", Sch 10	D-4 y D-6
<b>Vapor recirculado (VR46)</b>		Tubería 36", Sch 10	D-4 y D-6
<b>Descarga/carga de vapor (DV46-57)</b>		Tubería 36", Sch 10	D-4 y D-6 – D-5 y D-7
<b>Descarga líquido/recirculación (LR46-57)</b>		Tubería 6", Sch 40	D-4 y D-6 – D-5 y D-7
<b>Descarga de vapor (DV57)</b>		Tubería 36", Sch 10	D-5 y D-7
<b>Recirculación de líquido (LR57)</b>		Tubería 6", Sch 40	D-5 y D-7
Líneas de corrientes			
D-4 y D-6 (Tren 1)		D-5 y D-7 (Tren 2)	
<b>A46</b>	P-42 y P-43 (W)	<b>DV46-57</b>	P-47 y P-57 (V)
<b>DL46</b>	P-44 y P-54 (L')	<b>LR46-57</b>	P-46 y P-56 (L)
<b>VR46</b>	P-45 y P-55 (V')	<b>DV57</b>	P-48 y P-58 (V)
<b>DV46-57</b>	P-47 y P-57 (V)	<b>LR57</b>	P-51 y P-61 (L)
<b>LR46-57</b>	P-46 y P-56 (L)		

Tabla. MD. XXV. Hoja de datos de "EXTRACTIVA 2". (Viene de pág. anterior)

Debe puntualizarse sobre las hojas de datos anteriores lo que sigue:

- En la Tabla MD.XXV, se han ahorrado las especificaciones completas de tuberías: todas presentan los extremos para soldadura a tope (BW) y se fabrican en acero al carbono calmado según SA-106 grado B.
- En la designación de tubuladuras no se repiten las que son compartidas por las columnas. En la Tabla MD.XXV, por ejemplo las tubuladuras A46 significan: Tubuladuras de alimentación, de las torres D-4 y D-6, trasegada por las líneas P-42 y P-43 cuya alimentación es W, residuo de "EXTRACTIVA 1", (véase capítulo segundo de descripción de corrientes).
- Las corrientes L, L', V y V' se refieren a los caudales de líquido y vapor de columna. No deben confundirse con otras corrientes del proceso notadas igualmente.

Se sigue la hoja de datos correspondiente a los equipos de "MÚLTIPLE".

**Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas**

Documento 1. Memoria descriptiva

<b>Hoja de datos de "MÚLTIPLE"</b>		
<b>Designación y número</b>	D-8, D-9, D-10 y D-11 (4 torres de destilación)	
<b>Material de construcción</b>	Acero al carbono según SA-515 grado 70	
<b>Diseño hidráulico</b>		
	<b>D-8 y D-10 (Tren 1)</b>	<b>D-9 y D-11 (Tren 2)</b>
<b>Tipo de plato</b>	Perforado	
<b>Nº de platos agotamiento / Nº de pasos</b>	42/1	-
<b>Nº de platos rectificación / Nº de pasos</b>	19/1	61/1
<b>Diámetro zona rectificación (m)</b>	6	
<b>Diámetro zona agotamiento (m)</b>		
<b>Espaciado de platos (m)</b>	0,9	
<b>Área de platos (m<sup>2</sup>)</b>	28,274	
<b>Altura de vertederos (cm)</b>	9	
<b>Longitud de vertederos laterales (mm)</b>	4,2	
<b>Espesor de platos (mm)</b>	4,5	
<b>Nº de perforaciones</b>	16996	
<b>Casco</b>		
<b>Espesor com. zona rect. (in y mm)</b>	(13/16 y 20,64)	
<b>Espesor com. zona agot. (in y mm)</b>		
<b>Altura total del recipiente (m)</b>	61,8	
<b>Cabezales</b>		
<b>Tipo</b>	Torisférico <i>Klopper</i>	
<b>Espesor com. ambos cabezales (in y mm)</b>	(7/8 y 22,22)	
<b>Volumen cabezal superior (m<sup>3</sup>)</b>	46,735	
<b>Volumen cabezal inferior (m<sup>3</sup>)</b>		
<b>Otros elementos</b>		
<b>Escalera/plataformas</b>	Sí/8	
<b>Nº accesos de hombre (diámetro)</b>	3 (0,6 m)	
<b>Aislamiento de lana de vidrio (mm)</b>	30	
<b>Tipo de soporte</b>	Faldón, 40 pernos	

Tabla. MD. XXVI. Hoja de datos de "MÚLTIPLE". (Continúa en pág. siguiente)

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Memoria descriptiva

<b>Tubuladuras</b>			
<b>Alimentación (A8,10)</b>	Tubería 2-1/2", Sch 10		D-8 y D-10
<b>Descarga de líquido (DL8,10)</b>	Tubería 5", Sch 40		D-8 y D-10
<b>Vapor recirculado (VR8,10)</b>	Tubería 30", Sch 10		D-8 y D-10
<b>Descarga/carga de vapor (DV8,10-9,11)</b>	Tubería 30", Sch 10		D-8 y D-10 – D-9 y D-11
<b>Descarga líquido/recirculación (LR8,10-9,11)</b>	Tubería 5", Sch 40		D-8 y D-10 – D-9 y D-11
<b>Descarga de vapor (DV9,11)</b>	Tubería 30", Sch 10		D-9 y D-11
<b>Recirculación de líquido (LR9,11)</b>	Tubería 5", Sch 40		D-9 y D-11
<b>Líneas de corrientes</b>			
<b>D-8 y D-10 (Tren 1)</b>		<b>D-9 y D-11 (Tren 2)</b>	
<b>A8,10</b>	P-52 y P-62 (W)	<b>DV8,10-9,11</b>	P-68 y P-78 (V)
<b>DL8,10</b>	P-65 y P-75 (L')	<b>LR8,10-9,11</b>	P-67 y P-77 (L)
<b>VR8,10</b>	P-66 y P-76 (V')	<b>DV9,11</b>	P-68 y P-79 (V)
<b>DV8,10-9,11</b>	P-68 y P-78 (V)	<b>LR9,11</b>	P-72 y P-82 (L)
<b>LR8,10-9,11</b>	P-67 y P-77 (L)		

Tabla. MD. XXVI. Hoja de datos de "MÚLTIPLE". (Viene de pág. anterior)

Se sigue la hoja de datos correspondiente a los equipos de "BINARIA".

<b>Hoja de datos de "BINARIA"</b>			
<b>Designación y número</b>	D-12 a D-20 (9 torres de destilación)		
<b>Material de construcción</b>	Acero al carbono según SA-515 grado 70		
<b>Diseño hidráulico</b>			
	<b>D-12, D-15 y D-18</b>	<b>D-13, D-16 y D-19</b>	<b>D-14, D-17 y D-20</b>
	<b>Tren 1</b>	<b>Tren 2</b>	<b>Tren 3</b>
<b>Tipo de plato</b>	Perforado		
<b>Nº de platos agot. / Nº de pasos</b>	71/2	5/2	71/1
<b>Nº de platos rect. / Nº de pasos</b>	-	67/2	71/1
<b>Diámetro zona rectificación (m)</b>	6,5	7	
<b>Diámetro zona agotamiento (m)</b>			
<b>Espaciado de platos (m)</b>	0,9		
<b>Área de platos (m<sup>2</sup>)</b>	33,183	38,845	
<b>Altura de vertederos (cm)</b>	9		
<b>Long. de vert. laterales (mm)</b>	4,55	4,90	
<b>Espesor de platos (mm)</b>	4,5		
<b>Nº de perforaciones</b>	17354	20127	

Tabla. MD. XXVII. Hoja de datos de "BINARIA". (Continúa en pág. siguiente)

**Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas**

Documento 1. Memoria descriptiva

<b>Casco</b>			
	<b>D-12, D-15, D-18</b>	<b>D-13, D-16, D-19</b>	<b>D-14, D-17, D-20</b>
	<b>Tren 1</b>	<b>Tren 2</b>	<b>Tren 3</b>
<b>Espesor com. zona rect. (in y mm)</b>	(1-3/16 y 30,16)		
<b>Espesor com. zona agot. (in y mm)</b>			
<b>Altura total del recipiente (m)</b>	70,8	71,7	70,8
<b>Cabezales</b>			
<b>Tipo</b>	Toriesférico <i>Klopper</i>		
<b>Espesor com. ambos cabezales (in y mm)</b>	(1-1/4 y 31,75)		
<b>Volumen cabezal superior (m<sup>3</sup>)</b>	30,601	75,354	
<b>Volumen cabezal inferior (m<sup>3</sup>)</b>			
<b>Otros elementos</b>			
<b>Escalera/plataformas</b>	Sí/8		
<b>Nº accesos de hombre (diámetro)</b>	3 (0,6 m)		
<b>Aislamiento de lana de vidrio (mm)</b>	40		
<b>Tipo de soporte</b>	Faldón, 44 pernos	Faldón, 48 pernos	

Tabla. MD. XXVII. Hoja de datos de "BINARIA". (Viene de pág. anterior)

<b>Tubuladuras</b>		
<b>Alimentación (A12,15,18) ← → 1</b>	Tubería 5", Sch 10	12,15,18
<b>Descarga de líquido (DL12,15,18) ← → 2</b>	Tubería 5", Sch 10	12,15,18
<b>Vapor recirculado (VR12,15,18) ← → 3</b>	Tubería 5", Sch 10	12,15,18
<b>Descarga/carga de vapor (DV12,15,18-13,16,19) ← → 4</b>	Tubería 5", Sch 10	12,15,18-13,16,19
<b>Descarga líquido/recirculación (LR12,15,18-13,16,19) ← → 5</b>	Tubería 5", Sch 10	12,15,18-13,16,19
<b>Descarga/carga de vapor (DV13,16,19-14,17,20) ← → 6</b>	Tubería 5", Sch 10	13,16,19-14,17,20
<b>Descarga líquido/recirculación (LR13,16,19-14,17,20) ← → 7</b>	Tubería 5", Sch 10	13,16,19-14,17,20
<b>Descarga de vapor (DV14,17,20) ← → 8</b>	Tubería 5", Sch 10	14,17,20
<b>Recirculación de líquido (LR14,17,20) ← → 9</b>	Tubería 5", Sch 10	14,17,20

<b>Líneas de corrientes</b>					
<b>D-12, D-15 y D-18 (Tren 1)</b>		<b>D-13, D-16 y D-19 (Tren 2)</b>		<b>D-14, D-17 y D-20 (Tren 3)</b>	
<b>1</b>	P-87, P-88 y P-89 (G)	<b>4</b>	P-93, P-105 y P-119 (V')	<b>6</b>	P-95, P-107 y P-121 (V)
<b>2</b>	P-90, P-102 y P-116 (L')	<b>5</b>	P-92, P-104 y P-118 (L')	<b>7</b>	P-94, P-106 y P-120 (L)
<b>3</b>	P-91, P-103 y P-117 (V')	<b>6</b>	P-95, P-107 y P-121 (V)	<b>8</b>	P-96, P-108 y P-122 (V)
<b>4</b>	P-93, P-105 y P-119 (V')	<b>7</b>	P-94, P-106 y P-120 (L)	<b>9</b>	P-99, P-111 y P-125 (L)
<b>5</b>	P-92, P-104 y P-118 (L')				

Tabla. MD. XXVII.bis. Hoja de datos de "BINARIA"

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Memoria descriptiva

### MD.C7.2.3. Acumuladores

Se sigue la hoja de datos correspondiente a los acumuladores.

Hoja de datos de los acumuladores de reflujo							
<b>Designación y número</b>		A-1 a A-4 (4 acumuladores)					
<b>Material de construcción</b>		Acero al carbono según SA-285 grado C					
Características comunes							
Diseño hidráulico							
	<b>A-1</b>	<b>A-2</b>	<b>A-3</b>	<b>A-4</b>			
<b>Disposición</b>	Horizontal						
<b>Diámetro (m)</b>	1,6	1,3					
<b>Longitud (m)</b>	7,0	5,6					
<b>Tiempo de residencia (s)</b>	450						
<b>Nivel del líquido (m)</b>	0,8	0,7					
<b>Otros elementos</b>	Rompedor de vórtices						
Casco							
<b>Diámetro interno (m)</b>	1,6	1,3					
<b>Espesor comercial (in y mm)</b>	(5/16 y 7,94)	(1/4 y 6,35)					
Cabezales							
<b>Tipo</b>	Toriosférico <i>Klopper</i>						
<b>Espesor comercial (in y mm)</b>	(3/8 y 9,52)	(5/16 y 7,94)					
<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	0,980	0,528					
Otros elementos							
<b>Escalera/plataformas</b>	No						
<b>Nº acc. de hombre (diámetro)</b>	1 (0,6 m)						
<b>Aisl. de lana de vidrio (mm)</b>	40	30					
<b>Tipo de soporte</b>	2 silletas						
Tubuladuras							
<b>A-1</b>	<b>Carga de líquido (CL)</b>	Tubería 6", Sch 10					
	<b>Descarga de líquido (DL)</b>	Tubería 6", Sch 10					
<b>A-2 y A-3</b>	<b>Carga de líquido (CL)</b>	Tubería 6", Sch 40					
	<b>Descarga de líquido (DL)</b>	Tubería 6", Sch 40					
<b>A-4</b>	<b>Carga de líquido (CL)</b>	Tubería 5", Sch 10					
	<b>Descarga de líquido (DL)</b>	Tubería 5", Sch 10					
Líneas de corrientes							
	<b>A-1</b>	<b>A-2</b>	<b>A-3</b>	<b>A-4</b>			
<b>CL</b>	P-35 (V-E1)	<b>CL</b>	P-49 (V-E2)	<b>CL</b>	P-59 (V-E2)	<b>CL</b>	P-70 (V-M)
<b>DL</b>	P-36 (V-E1)	<b>DL</b>	P-50 (V-E2)	<b>DL</b>	P-60 (V-E2)	<b>DL</b>	P-71 (V-M)

Tabla. MD. XXVIII. Hoja de datos de acumuladores

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Memoria descriptiva

Hoja de datos de los acumuladores de reflujo							
<b>Designación y número</b>		A-5 a A-8 (4 acumuladores)					
<b>Material de construcción</b>		Acero al carbono según SA-285 grado C					
Características comunes							
Diseño hidráulico							
		A-5	A-6	A-7	A-8		
<b>Disposición</b>		Horizontal					
<b>Diámetro (m)</b>		1,3	0,8				
<b>Longitud (m)</b>		5,6	3,4				
<b>Tiempo de residencia (s)</b>		450					
<b>Nivel del líquido (m)</b>		0,7	0,4				
<b>Otros elementos</b>		Rompedor de vórtices					
Casco							
<b>Diámetro interno (m)</b>		1,3	0,8				
<b>Espesor comercial (in y mm)</b>		(1/4 y 6,35)					
Cabezales							
<b>Tipo</b>		Toriesférico <i>Klopper</i>					
<b>Espesor comercial (in y mm)</b>		(5/16 y 7,94)					
<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>		0,528	0,107				
Otros elementos							
<b>Escalera/plataformas</b>		No					
<b>Nº acc. de hombre (diámetro)</b>		1 (0,6 m)	1 (0,41 m)				
<b>Aisl. de lana de vidrio (mm)</b>		30	40				
<b>Tipo de soporte</b>		2 silletas					
Tubuladuras							
<b>A-5</b>	<b>Carga de líquido (CL)</b>		Tubería 5", Sch 10				
	<b>Descarga de líquido (DL)</b>		Tubería 5", Sch 10				
<b>A-6 , A-7 y A-8</b>	<b>Carga de líquido (CL)</b>		Tubería 6", Sch 10				
	<b>Descarga de líquido (DL)</b>		Tubería 6", Sch 10				
Líneas de corrientes							
A-5		A-6		A-7		A-8	
<b>CL</b>	P-70 (V-M)	<b>CL</b>	P-97 (V-B)	<b>CL</b>	P-109 (V-B)	<b>CL</b>	P-123 (V-B)
<b>DL</b>	P-80 (V-M)	<b>DL</b>	P-98 (V-B)	<b>DL</b>	P-110 (V-B)	<b>DL</b>	P-124 (V-B)

Tabla. MD. XXVIII.bis. Hoja de datos de acumuladores

Donde para las líneas de corrientes, V simboliza el vapor de las operaciones de destilación "EXTRACTIVA 1" (E-1), "EXTRACTIVA 2" (E-2), "MÚLTIPLE" (M) y "BINARIA" (B).

### **MD.C7.3. Generalidades sobre tanques**

El presente proyecto diseña tres tanques, dos de procesos y uno de almacenamiento, con una capacidad de reserva de la producción de 3 días. Adicionalmente, el nivel de llenado de los tanques será variable en función de las dimensiones de los mismos. Se trata de dos tanques de techo flotante cubierto para los tanques de procesos y un tanque esférico para el almacenamiento del producto terminado. La siguiente tabla recoge los datos mínimos requeridos para el dimensionado:

<b>Datos previos al diseño de tanques</b>			
	<b>Tanque T-1</b>	<b>Tanque T-2</b>	<b>Tanque T-3</b>
<b>Corriente almacenada</b>	U	Furfural en U	Z tras "BLENDING"
<b>Caudal másico (kt/año)</b>	1062,537	330,658	200,8
<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	720,635	1211,774	614,992
<b>Caudal volumétrico (m<sup>3</sup>/día)</b>	4039,576	747,593	894,909
<b>Fracción de llenado</b>	7/10	1/2	5/6
<b>Volumen a 3 días (m<sup>3</sup>)</b>	17312,471	4485,556	3221,313

Tabla. MD. XXIX. Datos previos para el cálculo de tanques

El tanque T-1 es el que se ha denominado de "BLENDING de EXTRACTIVA 1" y almacena la corriente mezclada completa de carga a "EXTRACTIVA 1", U, durante 3 días de operación.

El tanque T-2 almacena el furfural fresco de carga al tanque anterior, T-1. Se ha dimensionado suponiendo que el extractante no se recirculara, es decir, bajo la hipótesis de necesitar aportar todo el furfural requerido, cuyo caudal figura entre los datos de la corriente U, (véase capítulo segundo de la memoria descriptiva); en lugar de acumular tan sólo el consumo a tres días del extractante de reposición. Debe dimensionarse de esta forma, puesto que durante el arranque de la planta será necesario aportar todo el furfural fresco equivalente a 3 días, tiempo estimado de funcionamiento estacionario. Finalizados los tres días, el tanque funcionará como repositorio,

---

aportando estrictamente la cantidad indicada en capítulo antedicho, como corriente de *make-up*.

Finalmente, el tanque T-3 almacena la corriente final de proceso, una vez se ha desviado el porcentaje indicado como estrategia de recirculación, igualmente por tres días.

Las densidades de las corrientes correspondientes a los tanques T-1 y T-3 se justificarán en los anexos a la memoria descriptiva, mientras que la densidad de la corriente almacenada en T-2 se ha obtenido siguiendo el mismo procedimiento que se mostrará para las corrientes anteriores en los anexos.

La fracción de llenado se decide según códigos de diseño. Para tanques cilíndricos la horquilla 50-70% de llenado es suficientemente segura, según norma *API 650*. Para los depósitos esféricos el código *ASME* prescribe sobredimensionamiento del 20%, lo que equivale a un llenado de las 5/6 partes del tanque.

El volumen requerido de los tanques se calcula multiplicando el caudal volumétrico diario por el número de días de almacenamiento y dividiendo por la fracción de llenado.

Antes de presentar las hojas de datos de los tanques se describen los detalles de diseño más significativos.

Los tanques de techo flotante cubierto, son recipientes verticales, constituidos por un casco cilíndrico, cerrados por una placa plana, con pendiente del 1,3% que facilite el drenaje del tanque en la solera, y un doble techo plano, uno externo fijo y otro flotante libre sobre la superficie del líquido almacenado.

El techo móvil desliza verticalmente dentro del cuerpo del tanque, flotando directamente sobre el producto almacenado, con lo que sigue las variaciones del nivel del líquido. En estas condiciones, la fase vapor desprendida del líquido es prácticamente despreciable.

Suelen fabricarse en aluminio, puesto que se requiere un material liviano.

El techo se sustenta en el líquido mediante pontones, o compartimentos estancos que flotan sobre el producto. La estanqueidad del techo se asegura mediante los sellos: una junta, normalmente de gomaespuma, colocada en la unión techo-casco.

Los fondos se construyen por superposición y soldadura a solape de chapas metálicas. El cuerpo del tanque, por su parte se fabrica a base de virolas de chapas metálicas soldadas a tope.

Contarán con sistema de venteo, consistente en una válvula de presión-vacío situada en el techo del tanque, a fin de evitar deformaciones del techo o de las paredes a consecuencia de las variaciones de presión.

El soporte del tanque estará constituido por un aro perimetral de hormigón sobre el que descansará el tanque a fin de evitar el hundimiento en terreno y corrosión de la solera.

Entre los elementos externos y accesorios, se dotarán dos accesos de hombre de 0,6 m, escalera en espiral y al menos una plataforma que permita el acceso al techo y dispositivos de tomas de muestras que faciliten el control rutinario del tanque.

En el caso de los tanques esféricos, debe impedirse todo contacto con el exterior, ya que las pérdidas por evaporación serían cuantiosas. Las esferas se encuentran completamente cerradas quedando su espacio vacío de líquido ocupado por su vapor de equilibrio.

El proceso de llenado y vaciado del tanque se realiza mediante un juego de presiones: al aliviar la presión, parte del producto pasa a fase vapor, de modo que el líquido evacúa y, viceversa, un aumento de presión hace disminuir la fase vapor y aumentar la líquida. El resto del tiempo la presión, por la existencia de un equilibrio líquido-vapor,

es aproximadamente constante. En todo caso, las esferas se proveerán de venteos que evacúen a la red de antorchas ante cualquier excursión positiva de la presión, (lo que puede suceder a resultas del aumento de temperatura en verano).

Las esferas se construyen en gajos, utilizando chapas de acero debidamente curvadas. Las soldaduras deberán ser radiografiadas para descartar fisuras internas que se pudieran haber generado durante el montaje.

El soporte típico es sobre patas, que deberán soportar el peso de la esfera en prueba hidráulica. Como todos los tanques contarán también con escalera helicoidal, que dé acceso a la zona superior, accesos de hombre, dispositivos de toma de muestras y demás instrumentación. La siguiente figura muestra los tipos de tanque empleados:

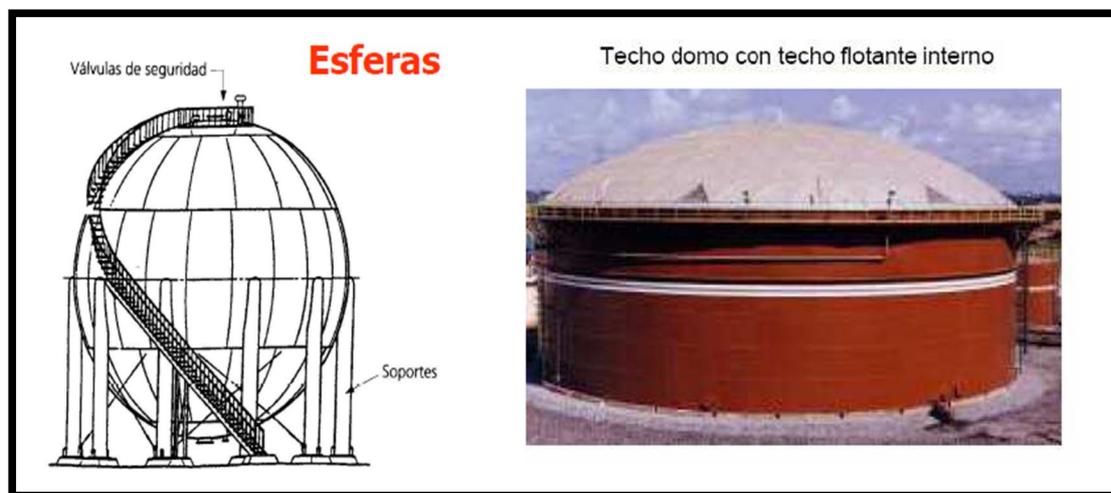


Figura. MD.34. Tanque esférico, (izqda.) y de techo flotante cubierto (dcha.).  
(CEPSA, 2011)

#### **MD.C7.4. Hojas de datos de tanques**

Se proporcionan seguidamente las hojas de datos correspondientes a los tanques T-1 y T-2:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Memoria descriptiva

<b>Hoja de datos de los tanques T-1 y T-2</b>			
<b>Designación y número</b>	T-1 y T-2 (2 tanques)		
<b>Material de construcción</b>	Acero al carbono según SA-285 grado C		
<b>Características comunes</b>			
<b>Diseño hidráulico</b>			
	<b>T-1</b>	<b>T-2</b>	
<b>Tipo</b>	Cilíndrico de techo flotante cubierto		
<b>P de almacenamiento (atm)</b>	4,5	1	
<b>T de almacenamiento (°C)</b>	17,8	20	
<b>Diámetro (m)</b>	42,7	22,2	
<b>Altura (m)</b>	12,2		
<b>Volumen total (m<sup>3</sup>)</b>	17412,895	4731,765	
<b>Volumen ocupado (m<sup>3</sup>)</b>	12118,729	2242,778	
<b>Otros elementos</b>	Rompedor de vórtices		
<b>Casco, fondo y techo fijo</b>			
<b>Espesor comercial (in y mm)</b>	(9/16 y 14,29)	(3/8 y 9,52)	
<b>Techo flotante</b>			
<b>Espesor comercial (in y mm)</b>	(3/16 y 4,76)		
<b>Otros elementos</b>			
<b>Escalera/plataformas</b>	Sí/1		
<b>Nº acc. de hombre (diámetro)</b>	2 (0,6 m)		
<b>Tipo de soporte</b>	Base de hormigón		
<b>Tubuladuras y líneas de corrientes</b>			
<b>T-1</b>	<b>Vapor de "SIMPLE"</b>	Tubería 4-1/2", Sch 40	P-23 (74% V)
	<b>Destilado de "EXTR. 1"</b>	Tubería 1-1/2", Sch 40	P-39 (26% D)
	<b>Destilado de "BINARIA"</b>	Tubería 3/4", Sch 40	P-128 (26% H)
	<b>Residuo de "BINARIA"</b>	Tubería 1-1/4", Sch 10	P-132 (23% Z)
	<b>Furfural de "RECUP."</b>	Tubería 2-1/2", Sch 10	P-140 (98% L')
	<b>Furf. fresco en arranque</b>	Tubería 2-1/2", Sch 10	P-142 (2718 t/3 día)
	<b>Furf. fresco en estacionario</b>	Tubería 1/2", Sch 40	P-143 (7 kt/año)
<b>T-2</b>	<b>Descarga de líquido</b>	Tubería 5", Sch 10	P-26 (U)
	<b>Carga de furfural fresco</b>	Tubería 5", Sch 40	P-141 (7 kt/año)
	<b>Furf. fresco en arranque</b>	Tubería 2-1/2", Sch 10	P-142 (2718 t/3 día)
	<b>Furf. fresco en estacionario</b>	Tubería 1/2", Sch 40	P-143 (7 kt/año)

Tabla. MD. XXX. Hoja de datos de tanques

En este caso, las líneas de corrientes indican tanto la designación sobre el diagrama de flujo de las mismas, como el porcentaje mezclado de las distintas corrientes a "BLENDING", en los términos

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Memoria descriptiva

que se describió en el segundo capítulo. Los consumos de furfural tanto en arranque como en estacionario se han tabulado para cada tanque. Sigue la hoja de datos del tanque T-3:

Hoja de datos del tanque T-3			
<b>Designación y número</b>	T-3		
<b>Material de construcción</b>	Acero al carbono según SA-285 grado C		
Diseño hidráulico			
<b>Tipo</b>	Esférico		
<b>P de almacenamiento (atm)</b>	4		
<b>T de almacenamiento (°C)</b>	27,7		
<b>Radio (m)</b>	9,2		
<b>Volumen total (m<sup>3</sup>)</b>	3221,313		
<b>Volumen ocupado (m<sup>3</sup>)</b>	2684,427		
<b>Otros elementos</b>	Rompedor de vórtices		
Casco			
<b>Espesor comercial (in y mm)</b>	(2 y 50,8)		
Otros elementos			
<b>Escalera/plataformas</b>	Sí/1		
<b>Nº acc. de hombre (diámetro)</b>	2 (0,6 m)		
<b>Tipo de soporte</b>	Patas soldadas al casco		
Tubuladuras y líneas de corrientes			
<b>T-1</b>	<b>Vapor de "SIMPLE"</b>	Tubería 4-1/2", Sch 40	P-23 (74% V)
	<b>Destilado de "EXTR. 1"</b>	Tubería 1-1/2", Sch 40	P-39 (26% D)
	<b>Destilado de "BINARIA"</b>	Tubería 3/4", Sch 40	P-128 (26% H)
	<b>Residuo de "BINARIA"</b>	Tubería 1-1/4", Sch 10	P-132 (23% Z)
	<b>Furfural de "RECUP."</b>	Tubería 2-1/2", Sch 10	P-140 (98% L')
	<b>Furf. fresco en arranque</b>	Tubería 2-1/2", Sch 10	P-142 (2718 t/3 día)
	<b>Furf. fresco en estacionario</b>	Tubería 1/2", Sch 40	P-143 (7 kt/año)
<b>T-2</b>	<b>Descarga de líquido</b>	Tubería 5", Sch 10	P-26 (U)
	<b>Carga de furfural fresco</b>	Tubería 5", Sch 40	P-141 (7 kt/año)
	<b>Furf. fresco en arranque</b>	Tubería 2-1/2", Sch 10	P-142 (2718 t/3 día)
	<b>Furf. fresco en estacionario</b>	Tubería 1/2", Sch 40	P-143 (7 kt/año)

Tabla. MD. XXX.bis. Hoja de datos de tanques

El material seleccionado es acero al carbono para todos los gracias a las propiedades no corrosivas de los materiales.

### **MD.C7.5. Generalidades sobre tuberías y bombas**

Los criterios para el diseño del sistema de tuberías se han discutido convenientemente en los anexos de diseño mecánico, por lo que no se redundará en la memoria descriptiva.

Puesto que no figuran en aquéllos, debe ofrecerse siquiera una visión de soslayo acerca de los accesorios de las conducciones, sin perjuicio de lo indicado en los anexos acerca de los objetivos de profundización del cálculo.

En lo tocante a las uniones entre tramos rectos de tubería, así como de tuberías con demás accesorios y equipos se llevará a término por medio de bridas. La instrumentación requerirá uniones rosadas. Las bridas estarán constituidas básicamente por dos discos iguales unidos entre sí mediante pernos que comprimen una junta situada entre sus caras, asegurando la estanqueidad de la conexión. Las bridas más comunes, y extensamente aplicadas en el presente PFC serán de cuello soldable. La siguiente figura muestra los tipos de brida.

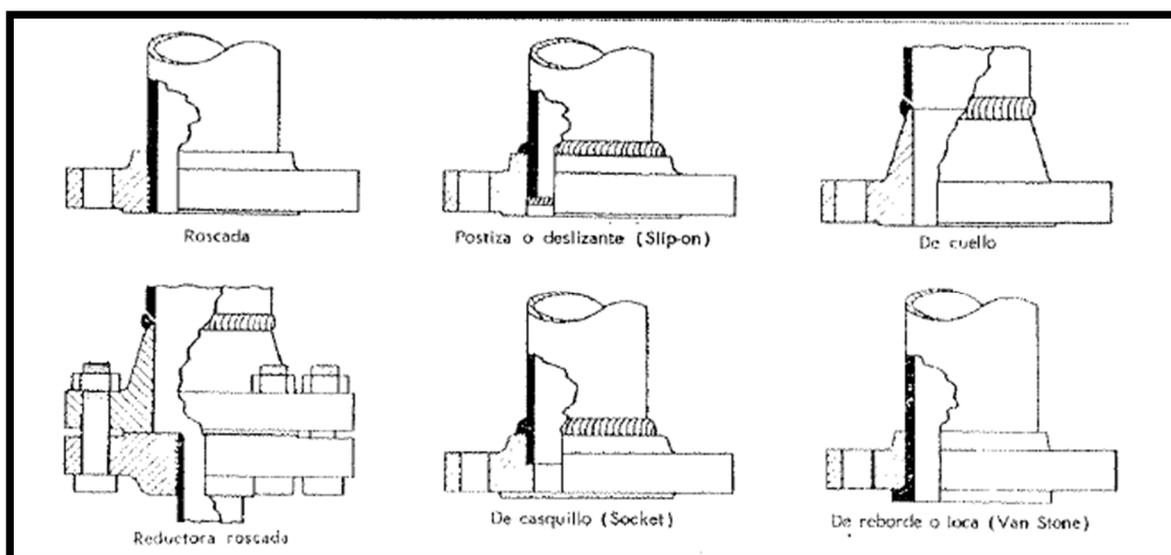


Figura. MD.35. Tipos de bridas. (CEPSA, 2011)

Los accesorios de tubería más típicos son los codos, que permiten efectuar cambios de dirección en las tuberías; térs, que permiten los empalmes de varias conducciones en una y viceversa, la separación del flujo. Éstos son los accesorios más significativos que requerirá el diseño en profundidad de la red de tuberías asociada al proceso proyectado.

Pese a que el bosquejo llevado a cabo en este sentido, a fuer del vocación de pre-ingeniería del PFC, debidamente justificado en los anexos; no incluye la disposición de los accesorios, sí se ha considerado su contribución a las pérdidas de carga por sobredimensionamiento de las mismas.

Las tuberías deberán ser cubiertas por un aislamiento con de lana de vidrio, recubierto con chapa de aluminio en las mismas condiciones que se expone en los anexos de diseño mecánico para los equipos, de modo que se proteja las tuberías de las inclemencias meteorológicas.

En cuanto a las válvulas, son éstos los dispositivos aplicados al control, interrupción, regulación, cierre o apertura del flujo en las conducciones. Cumplen un papel fundamental en el control automático de procesos además de garantizar la seguridad en los procesos.

La complejidad de la red de tuberías hace objeto de una ingeniería en detalle el diseño y aplicación de válvulas de control y manuales, si bien, se proporcionará una breve reseña sobre la función de las válvulas principales.

Las válvulas más sencillas son las denominadas de corte, cuya función consiste en permitir el paso de todo el flujo circulante por una conducción, o impedirlo completamente.

Dentro de la anterior categoría, las válvulas de compuerta consisten en un elemento metálico que ocluye la conducción cuando es accionado mecánicamente por un vástago. Al revertir la operación el

área de flujo coincide con el diámetro nominal de la tubería, por lo que se permite todo el paso del flujo, ocasionando una pérdida de carga relativamente baja. Puesto que el accionamiento de la válvula es lento, su operatividad es limitada y expone al mecanismo a un severo desgaste tanto mayor cuanto más frecuente sea su actuación. Normalmente las válvulas de compuerta se emplean para aislar circuitos de forma perdurable, en ningún caso como norma habitual.

Si la aplicación requiere un accionamiento frecuente, en lugar de válvulas de compuerta se emplearán válvulas de bola o de globo. La primera consiste en una esfera inserta en la conducción que, al disponerse paralelamente al flujo, (lo que se evidencia por la posición de la palanca de accionamiento), ofrece un área de paso casi coincidente con la de la conducción, a través de una perforación debidamente practicada en la esfera. Las válvulas de globo son similares a las de compuerta, si bien difieren en la morfología del asiento: mientras que en las primeras una compuerta obstruye el paso de fluido, en el segundo caso se tiene un asiento curvo centrado en la conducción que permite una regulación grosera del caudal a diferencia de las otras dos.

Las válvulas de globo, por su forma curva, sufren poca fricción y son de uso habitual en aplicaciones que requieren, además del corte del flujo, cierta regulación. La Figura MD.36 muestra ejemplos de estas válvulas.

Dentro de las válvulas de regulación, las válvulas de diafragma pueden resultar bastante útiles para la red de tuberías diseñada, puesto que, además de estar indicadas para la apertura y cierre total, son asimismo útiles para el estrangulamiento a baja presión de operación. Su funcionamiento consiste en la reducción de la sección de paso por medio de una membrana accionada por un vástago. Puesto que la membrana es impermeable elimina la posibilidad de fugas por el empaque. Se presenta una ilustración de lo mencionado en la Figura MD.37.

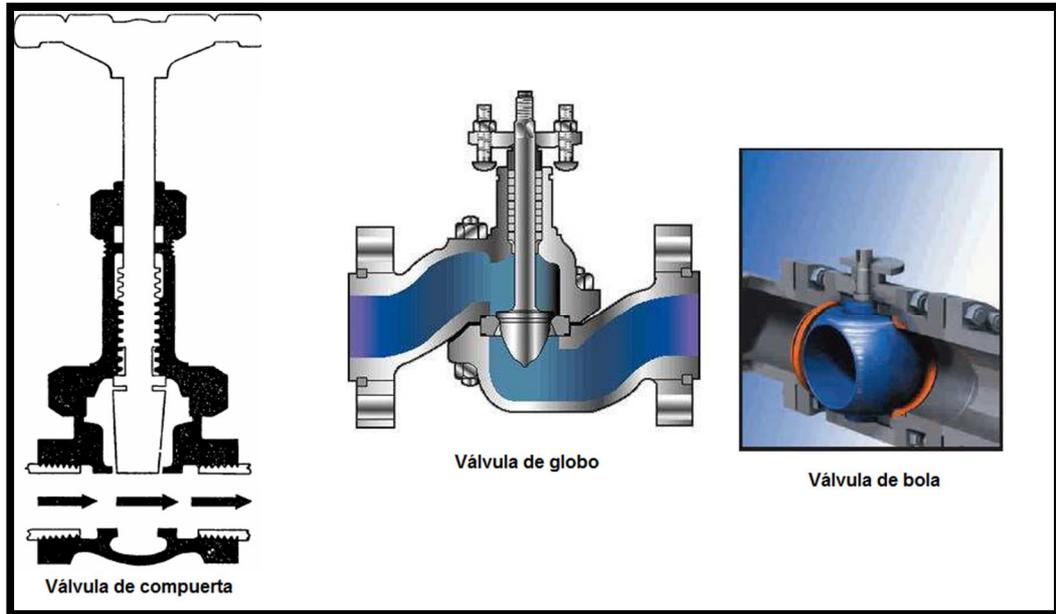


Figura. MD.36. Tipos de válvulas de corte. (CEPSA, 2011)

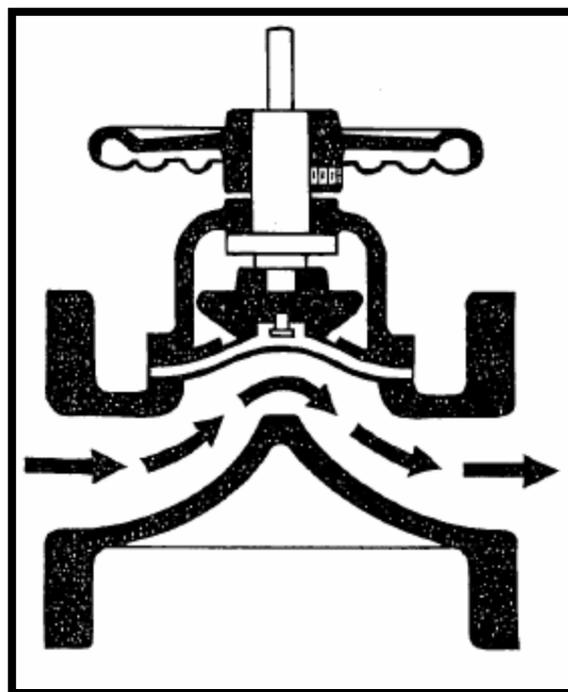


Figura. MD.37. Válvula de diafragma. (CEPSA, 2011)

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Memoria descriptiva

En cuanto a otras válvulas de distinta funcionalidad, puede citarse la válvula de tres vías. Se trata de un dispositivo que intercambia o regula el caudal de flujo de en dos ramales, donde el fluido de una acometida principal es dirigido por la abertura del asiento a una u otra salida en mayor o menor grado.

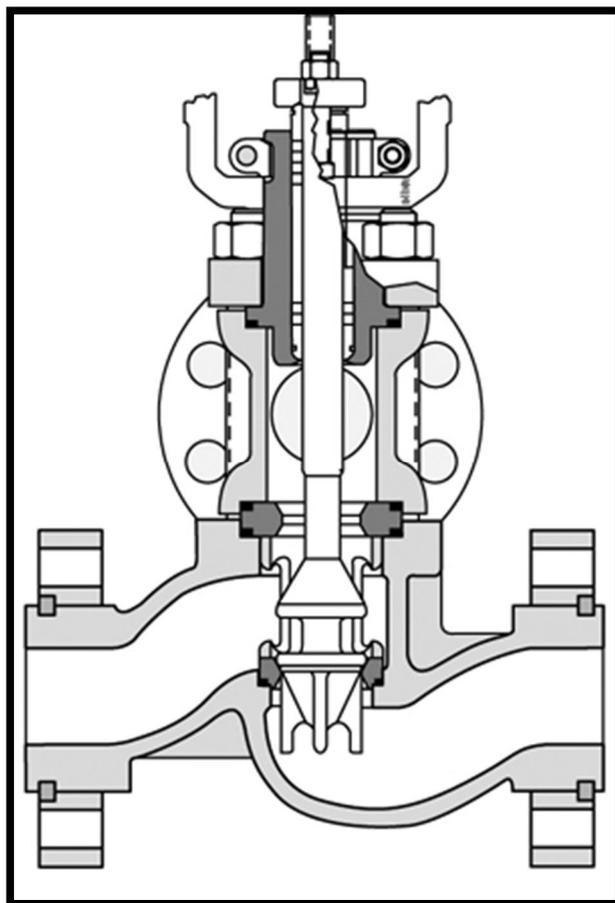


Figura. MD.38. Válvula de 3 vías. (*Empresa Flowserve*)

Válvulas de este tipo se requerirán por ejemplo en las líneas de proceso P-23 y P-24 y P-25. Durante el arranque de la planta todo el vapor condensado de "SIMPLE" discurre por P-24, desde P-23, hasta el tanque de "BLENDING", T-1, donde se mezcla con el extractante y se carga a "EXTRACTIVA 1". En operación, cuando se dispone de extractante recirculado, sólo parte del vapor condensado es dirigido a T-1, luego será necesaria una válvula de estas características al ob-

jeto de moderar el desvío de esta corriente. También serán de aplicación en todos los desvíos de corrientes al tanque de “BLENDING”.

También serán de utilidad las válvulas reductoras de presión, que faciliten la separación espontánea de fases en los separadores gas-líquido.

Deben citarse las válvulas de seguridad de que se dotarán todos los recipientes a presión, consistentes en una apertura en su casco sellada por un disco preparado para romper ante una sobrepresión determinada, relajando así la presión ante una posible excursión.

Salvando éstas últimas, las válvulas mencionadas podrán ser dotadas de actuadores hidráulicos o mecánicos que faciliten el control automático de los procesos.

Queda demostrada la complejidad del diseño en detalle de una red de tuberías asociada a una planta de procesos. Éste particular conlleva una carga de trabajo que escapa a los objetivos del PFC, puesto que el diseño detallado de los accesorios, instrumentos y estudios de flexibilidad de tuberías sentaría tema de estudio de distintos proyectos para cada unidad de proceso, realizada en la práctica por un equipo multidisciplinar de ingeniería en fase de eventual desarrollo del PFC.

Se aprovecha para recordar la intención fundamental del presente PFC: demostrar la existencia de una tecnología suficiente para obtener un proceso rentable que, en suma, justifique su desarrollo en detalle.

Efectuadas las consideraciones del actual y anteriores apartados, así como las mencionadas en los anexos de cálculo de tuberías y bombeo, se dará por cerrado el capítulo una vez incluidas las hojas de datos del sistema de tuberías y bombas.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Memoria descriptiva

### **MD.C7.6. Hojas de datos de tuberías y bombas**

Se proporcionarán seguidamente las hojas con datos sobre la red de tuberías y bombeo. Para el primer caso se proveerá una primera batería de tablas que incluyen la designación de las líneas, tal como aparecen en el diagrama de flujo, su descripción, (diámetro nominal, número de Schedule y utilidad dentro de la planta de procesos) y la unidad a la que prestan servicios. La segunda batería incluye los datos de diámetros interno, ( $D_i$ ), externo, ( $D_e$ ), espesor ( $t$ ), caudal y velocidad de flujo en las mencionadas tuberías.

Se concluye con la recopilación de especificaciones de las distintas bombas.

Designación	Descripción	Unidad
P-1	Tubería 6 in, Sch 40, para colector de alimentación presurizada	SIMPLE
P-2	Tubería 3 in, Sch 40, para ramales de alimentación presurizada	SIMPLE
P-3	Tubería 3 in, Sch 40, para ramales de alimentación presurizada	SIMPLE
P-4	Tubería 3 in, Sch 40, para ramales de alimentación presurizada	SIMPLE
P-5	Tubería 3 in, Sch 40, para ramales de alimentación presurizada	SIMPLE
P-6	Tubería 3 in, Sch 40, para ramales de alimentación	SIMPLE
P-7	Tubería 3 in, Sch 40, para ramales de alimentación	SIMPLE
P-8	Tubería 3 in, Sch 40, para ramales de alimentación	SIMPLE
P-9	Tubería 3 in, Sch 40, para ramales de alimentación	SIMPLE
P-10	Tubería 2 in, Sch 120, para ramales de descarga de líquido	SIMPLE
P-11	Tubería 2 in, Sch 120, para ramales de descarga de líquido	SIMPLE
P-12	Tubería 2 in, Sch 120, para ramales de descarga de líquido	SIMPLE
P-13	Tubería 2 in, Sch 120, para ramales de descarga de líquido	SIMPLE
P-14	Tubería 20 in, Sch 10, para ramales de descarga vapor	SIMPLE
P-15	Tubería 20 in, Sch 10, para ramales de descarga vapor	SIMPLE
P-16	Tubería 20 in, Sch 10, para ramales de descarga vapor	SIMPLE
P-17	Tubería 20 in, Sch 10, para ramales de descarga vapor	SIMPLE
P-18	Tubería 3-1/2 in, Sch 10, para colección y entrega del líquido	SIMPLE
P-19	Tubería 2-1/2 in, Sch 40, para ramales de vapor condensado	SIMPLE
P-20	Tubería 2-1/2 in, Sch 40, para ramales de vapor condensado	SIMPLE
P-21	Tubería 2-1/2 in, Sch 40, para ramales de vapor condensado	SIMPLE
P-22	Tubería 2-1/2 in, Sch 40, para ramales de vapor condensado	SIMPLE
P-23	Tubería 4-1/2 in, Sch 40, para colección del vapor	SIMPLE
P-24	Tubería 4-1/2 in, Sch 40, para conducción del vapor cond. a BLENDING	SIMPLE
P-25	Tubería 2-1/2 in, Sch 40, para entrega de vapor condensado	SIMPLE
P-26	Tubería 5 in, Sch 10, para descarga de BLENDING a T de almacenamiento	BLENDING

Tabla. MD. XXXI. H. de datos: Red de tuberías. Descripción. (Cont. en pág. sig.)

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Memoria descriptiva

Designación	Descripción	Unidad
P-34	Tubería 34 in, Sch 10, para descarga de vapor de 3ª columna	EXTRACTIVA 1
P-35	Tubería 6 in, Sch 10, para conducción de carga al acumulador	EXTRACTIVA 1
P-36	Tubería 6 in, Sch 10, para conducción de descarga del acumulador	EXTRACTIVA 1
P-37	Tubería 5 in, Sch 10, para conducción de reflujo de columna	EXTRACTIVA 1
P-38	Tubería 3 in, Sch 10, para conducción de destilado	EXTRACTIVA 1
P-39	Tubería 1-1/2 in, Sch 40, para conducción de destilado a BLENDING	EXTR. 1/BLEND.
P-40	Tubería 2-1/2 in, Sch 10, para entrega de destilado	EXTRACTIVA 1
P-41	Tubería 4-1/2 in, Sch 40, para conducción de residuo	EXTRACTIVA 1
P-42	Tubería 3 in, Sch 10, para ramales de alimentación	EXTRACTIVA 2
P-43	Tubería 3 in, Sch 10, para ramales de alimentación	EXTRACTIVA 2
P-44	Tubería 6 in, Sch 10, para para descarga de fondo de 1ª columna	EXTRACTIVA 2
P-54	Tubería 6 in, Sch 10, para para descarga de fondo de 1ª columna	EXTRACTIVA 2
P-45	Tubería 36 in, Sch 10, para vapor de calderín a 1ª columna	EXTRACTIVA 2
P-55	Tubería 36 in, Sch 10, para vapor de calderín a 1ª columna	EXTRACTIVA 2
P-46	Tubería 6 in, Sch 40, para descarga de fondo de 2ª columna y carga a 1ª	EXTRACTIVA 2
P-56	Tubería 6 in, Sch 40, para descarga de fondo de 2ª columna y carga a 1ª	EXTRACTIVA 2
P-47	Tubería 36 in, Sch 10, para descarga de vapor de 1ª columna	EXTRACTIVA 2
P-57	Tubería 36 in, Sch 10, para descarga de vapor de 1ª columna	EXTRACTIVA 2
P-48	Tubería 36 in, Sch 10, para descarga de vapor de 2ª columna	EXTRACTIVA 2
P-58	Tubería 36 in, Sch 10, para descarga de vapor de 2ª columna	EXTRACTIVA 2
P-49	Tubería 6 in, Sch 40, para conducción de carga al acumulador	EXTRACTIVA 2
P-59	Tubería 6 in, Sch 40, para conducción de carga al acumulador	EXTRACTIVA 2
P-50	Tubería 6 in, Sch 40, para conducción de descarga del acumulador	EXTRACTIVA 2
P-60	Tubería 6 in, Sch 40, para conducción de descarga del acumulador	EXTRACTIVA 2
P-51	Tubería 6 in, Sch 40, para conducción de reflujo de columna	EXTRACTIVA 2
P-61	Tubería 6 in, Sch 40, para conducción de reflujo de columna	EXTRACTIVA 2
P-52	Tubería 2-1/2 in, Sch 10, para ramales de dest. y alim. de MÚLTIPLE	EXTR. 2/MÚLT.
P-62	Tubería 2-1/2 in, Sch 10, para ramales de dest. y alim. de MÚLTIPLE	EXTR. 2/MÚLT.
P-53	Tubería 2-1/2 in, Sch 40, para ramales de residuo	EXTRACTIVA 2
P-63	Tubería 2-1/2 in, Sch 40, para ramales de residuo	EXTRACTIVA 2
P-64	Tubería 3 in, Sch 40, para colector de residuo	EXTRACTIVA 2
P-65	Tubería 5 in, Sch 40, para descarga de fondo de 1ª columna	MÚLTIPLE
P-75	Tubería 5 in, Sch 40, para descarga de fondo de 1ª columna	MÚLTIPLE
P-66	Tubería 30 in, Sch 10, para vapor de calderín a 1ª columna	MÚLTIPLE
P-76	Tubería 30 in, Sch 10, para vapor de calderín a 1ª columna	MÚLTIPLE
P-67	Tubería 5 in, Sch 40, para descarga de fondo de 2ª columna y carga a 1ª	MÚLTIPLE
P-77	Tubería 5 in, Sch 40, para descarga de fondo de 2ª columna y carga a 1ª	MÚLTIPLE
P-68	Tubería 30 in, Sch 10, para descarga de vapor de 1ª columna	MÚLTIPLE
P-78	Tubería 30 in, Sch 10, para descarga de vapor de 1ª columna	MÚLTIPLE
P-69	Tubería 30 in, Sch 10, para descarga de vapor de 2ª columna	MÚLTIPLE
P-79	Tubería 30 in, Sch 10, para descarga de vapor de 2ª columna	MÚLTIPLE
P-70	Tubería 5 in, Sch 10, para conducción de carga al acumulador	MÚLTIPLE
P-72	Tubería 5 in, Sch 40, para conducción de reflujo de columna	MÚLTIPLE

Tabla. MD. XXXI. H. de datos: Red de tuberías. Descripción. (Cont. en pág. sig.)

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Memoria descriptiva

Designación	Descripción	Unidad
P-82	Tubería 5 in, Sch 40, para conducción de reflujo de columna	MÚLTIPLE
P-73	Tubería 2-1/2 in, Sch 10, para ramales de destilado	MÚLTIPLE
P-83	Tubería 2-1/2 in, Sch 10, para ramales de destilado	MÚLTIPLE
P-74	Tubería 1/2 in, Sch 40, para ramales de residuo	MÚLTIPLE
P-84	Tubería 1/2 in, Sch 40, para ramales de residuo	MÚLTIPLE
P-85	Tubería 1/2 in, Sch 40, para colector de entrega de residuo	MÚLTIPLE
P-86	Tubería 3 in, Sch 10, para colector de destilado	MÚLTIPLE
P-87	Tubería 2 in, Sch 40, para ramales de alimentación	BINARIA
P-88	Tubería 2 in, Sch 40, para ramales de alimentación	BINARIA
P-89	Tubería 2 in, Sch 40, para ramales de alimentación	BINARIA
P-90	Tubería 6 in, Sch 10, para descarga de fondo de 1ª columna	BINARIA
P-102	Tubería 6 in, Sch 10, para descarga de fondo de 1ª columna	BINARIA
P-116	Tubería 6 in, Sch 10, para descarga de fondo de 1ª columna	BINARIA
P-91	Tubería 30 in, Sch 10, para vapor de calderín a 1ª columna	BINARIA
P-103	Tubería 30 in, Sch 10, para vapor de calderín a 1ª columna	BINARIA
P-117	Tubería 30 in, Sch 10, para vapor de calderín a 1ª columna	BINARIA
P-92	Tubería 6 in, Sch 10, para descarga de fondo de 2ª columna y carga a 1ª	BINARIA
P-104	Tubería 6 in, Sch 10, para descarga de fondo de 2ª columna y carga a 1ª	BINARIA
P-118	Tubería 6 in, Sch 10, para descarga de fondo de 2ª columna y carga a 1ª	BINARIA
P-93	Tubería 30 in, Sch 10, para descarga de vapor de 1ª columna	BINARIA
P-105	Tubería 30 in, Sch 10, para descarga de vapor de 1ª columna	BINARIA
P-119	Tubería 30 in, Sch 10, para descarga de vapor de 1ª columna	BINARIA
P-94	Tubería 6 in, Sch 10, para descarga de fondo de 3ª columna y carga a 2ª	BINARIA
P-106	Tubería 6 in, Sch 10, para descarga de fondo de 3ª columna y carga a 2ª	BINARIA
P-120	Tubería 6 in, Sch 10, para descarga de fondo de 3ª columna y carga a 2ª	BINARIA
P-95	Tubería 30 in, Sch 10, para descarga de vapor de 2ª columna	BINARIA
P-107	Tubería 30 in, Sch 10, para descarga de vapor de 2ª columna	BINARIA
P-121	Tubería 30 in, Sch 10, para descarga de vapor de 2ª columna	BINARIA
P-96	Tubería 30 in, Sch 10, para descarga de vapor de 3ª columna	BINARIA
P-108	Tubería 30 in, Sch 10, para descarga de vapor de 3ª columna	BINARIA
P-122	Tubería 30 in, Sch 10, para descarga de vapor de 3ª columna	BINARIA
P-97	Tubería 6 in, Sch 10, para conducción de carga al acumulador	BINARIA
P-109	Tubería 6 in, Sch 10, para conducción de carga al acumulador	BINARIA
P-123	Tubería 6 in, Sch 10, para conducción de carga al acumulador	BINARIA
P-98	Tubería 6 in, Sch 10, para conducción de descarga del acumulador	BINARIA
P-110	Tubería 6 in, Sch 10, para conducción de descarga del acumulador	BINARIA
P-124	Tubería 6 in, Sch 10, para conducción de descarga del acumulador	BINARIA
P-99	Tubería 6 in, Sch 10, para conducción de reflujo de columna	BINARIA
P-111	Tubería 6 in, Sch 10, para conducción de reflujo de columna	BINARIA
P-125	Tubería 6 in, Sch 10, para conducción de reflujo de columna	BINARIA
P-100	Tubería 1 in, Sch 10, para ramales de destilado	BINARIA
P-112	Tubería 1 in, Sch 10, para ramales de destilado	BINARIA

Tabla. MD. XXXI. H. de datos: Red de tuberías. Descripción. (Cont. en pág. sig.)

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Memoria descriptiva

Designación	Descripción	Unidad
P-126	Tubería 1 in, Sch 10, para ramales de destilado	BINARIA
P-101	Tubería 1-1/2 in, Sch 10, para ramales de residuo	BINARIA
P-114	Tubería 1-1/2 in, Sch 10, para ramales de residuo	BINARIA
P-130	Tubería 1-1/2 in, Sch 10, para ramales de residuo	BINARIA
P-113	Tubería 1-1/4 in, Sch 10, para colector de dos ramales de destilado	BINARIA
P-115	Tubería 2-1/2 in, Sch 30, para colector de dos ramales de residuo	BINARIA
P-127	Tubería 1-1/2 in, Sch 10, para colector de destilado	BINARIA
P-128	Tubería 3/4 in, Sch 40, para conducción de destilado a BLENDING	BIN./BLEND.
P-129	Tubería 1-1/4 in, Sch 10, para entrega de destilado	BINARIA
P-131	Tubería 3 in, Sch 30, para colector de residuo	BINARIA
P-132	Tubería 1-1/4 in, Sch 10, para conducción de residuo a BLENDING	BIN./BLEND.
P-133	Tubería 2-1/2 in, Sch 10, para entrega de butadieno terminado a esfera	BIN./ESFERA
P-134	Tubería 3 in, Sch 30, para alimentación a temperatura de operación	RECUPERACIÓN
P-135	Tubería 3 in, Sch 30, para alimentación a T y P de operación	RECUPERACIÓN
P-136	Tubería 5 in, Sch 10, para descarga de vapor	RECUPERACIÓN
P-137	Tubería 1-1/4 in, Sch 10, para entrega de vapor condensado	RECUPERACIÓN
P-138	Tubería 2-1/2 in, Sch 10, para descarga de líquido	RECUPERACIÓN
P-139	Tubería 1/2 in, Sch 40, para entrega de líquido	RECUPERACIÓN
P-140	Tubería 2-1/2 in, Sch 10, para conducción de líquido a BLENDING	REC./BLEND.
P-141	Tubería 5 in, Sch 40, para carga del tanque	T. FURFURAL
P-142	Tubería 2-1/2 in, Sch 10, para carga a tanque de BLENDING en arranque	FURF./BLEND.
P-143	Tubería 1/2 in, Sch 40, para carga a tanque de BLENDING en estacionario	FURF./BLEND.
P-144	Tubería 4-1/2 in, Sch 40, para colector alimentación a T de operación	EXTRACTIVA 2
P-145	Tubería 3 in, Sch 10, para alimentación a temperatura de operación	BINARIA
P-146	Tubería 12 in, Sch 10, para descarga de butadieno purísimo	ESFERA

Tabla. MD. XXXI. H. de datos: Red de tuberías. Descripción. (Viene de pág. ant.)

Las unidades dobles indican conexión entre las plantas. Por ejemplo REC./BLEND. Indica conducción del fluido desde la unidad de "RECUPERACIÓN" hasta el tanque de "BLENDING de EXTRACTIVA 1". Siguen las hojas de datos para el flujo y dimensiones de las tuberías.

Designación	Fase	D <sub>i</sub> (mm)	D <sub>e</sub> (mm)	t (mm)	Caudal de flujo (m <sup>3</sup> /h)	V <sub>flujo</sub> (m/s)
P-1	Líquido	154	168	7	221,218	3,299
P-2	Líquido	78	89	5	55,304	3,215
P-3	Líquido	78	89	5	55,304	3,215
P-4	Líquido	78	89	5	55,304	3,215
P-5	Líquido	78	89	5	55,304	3,215
P-6	Líquido	78	89	5	55,304	3,215
P-7	Líquido	78	89	5	55,304	3,215

Tabla. MD. XXXI.bis. H. de datos: Red de tuberías. Flujo. (Cont. en pág. sig.)

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Memoria descriptiva

Designación	Fase	D <sub>i</sub> (mm)	D <sub>e</sub> (mm)	t (mm)	Caudal de flujo (m <sup>3</sup> /h)	V <sub>flujo</sub> (m/s)
P-8	Líquido	78	89	5	55,304	3,215
P-9	Líquido	78	89	5	55,304	3,215
P-10	Líquido	48	60	6	20,669	3,173
P-11	Líquido	48	60	6	20,669	3,173
P-12	Líquido	48	60	6	20,669	3,173
P-13	Líquido	48	60	6	20,669	3,173
P-14	Vapor	495	508	6	11928,828	17,218
P-15	Vapor	495	508	6	11928,828	17,218
P-16	Vapor	495	508	6	11928,828	17,218
P-17	Vapor	495	508	6	11928,828	17,218
P-18	Líquido	96	102	3	82,677	3,173
P-19	Líquido	63	73	5	34,635	3,086
P-20	Líquido	63	73	5	34,635	3,086
P-21	Líquido	63	73	5	34,635	3,086
P-22	Líquido	63	73	5	34,635	3,086
P-23	Líquido	114	127	6	138,541	3,770
P-24	Líquido	114	127	6	102,520	2,790
P-25	Líquido	63	73	5	36,021	3,210
P-26	Líquido	134	141	3	168,316	3,315
P-27	Líquido	134	141	3	171,512	3,378
P-28	Líquido	198	219	10	340,507	3,072
P-29	Vapor	848	864	8	37486,184	18,437
P-30	Líquido	134	141	3	183,151	3,608
P-31	Vapor	899	914	8	63223,435	27,667
P-32	Líquido	134	141	3	189,777	3,738
P-33	Vapor	848	864	8	48419,329	23,814
P-34	Vapor	848	864	8	39232,767	19,296
P-35	Líquido	161	168	3	254,727	3,476
P-36	Líquido	161	168	3	254,727	3,476
P-37	Líquido	134	141	3	196,900	3,878
P-38	Líquido	83	89	3	57,827	2,969
P-39	Líquido	35	42	4	15,035	4,341
P-40	Líquido	67	73	3	42,792	3,371
P-41	Líquido	114	127	6	114,348	3,112
P-42	Líquido	83	89	3	55,897	2,870
P-43	Líquido	83	89	3	55,897	2,870
P-44	Líquido	161	168	3	241,045	3,289
P-54	Líquido	161	168	3	241,045	3,289
P-45	Vapor	899	914	8	58054,278	25,405
P-55	Vapor	899	914	8	58054,278	25,405
P-46	Líquido	154	168	7	189,679	2,829
P-56	Líquido	154	168	7	189,679	2,829
P-47	Vapor	899	914	8	54146,895	23,695

Tabla. MD. XXXI.bis. H. de datos: Red de tuberías. Flujo. (Cont. en pág. sig.)

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Memoria descriptiva

Designación	Fase	D <sub>i</sub> (mm)	D <sub>e</sub> (mm)	t (mm)	Caudal de flujo (m <sup>3</sup> /h)	V <sub>flujo</sub> (m/s)
P-57	Vapor	899	914	8	54146,895	23,695
P-48	Vapor	899	914	8	42243,426	18,486
P-58	Vapor	899	914	8	42243,426	18,486
P-49	Líquido	154	168	7	225,942	3,369
P-59	Líquido	154	168	7	225,942	3,369
P-50	Líquido	154	168	7	225,942	3,369
P-60	Líquido	154	168	7	225,942	3,369
P-51	Líquido	154	168	7	194,225	2,896
P-61	Líquido	154	168	7	194,225	2,896
P-52	Líquido	67	73	3	31,717	2,499
P-62	Líquido	67	73	3	31,717	2,499
P-53	Líquido	63	73	5	24,462	2,180
P-63	Líquido	63	73	5	24,462	2,180
P-64	Líquido	78	89	5	48,925	2,844
P-65	Líquido	128	141	7	174,862	3,775
P-75	Líquido	128	141	7	174,862	3,775
P-66	Vapor	746	762	8	23123,636	14,696
P-76	Vapor	746	762	8	23123,636	14,696
P-67	Líquido	128	141	7	135,169	2,918
P-77	Líquido	128	141	7	135,169	2,918
P-68	Vapor	746	762	8	31820,681	20,223
P-78	Vapor	746	762	8	31820,681	20,223
P-69	Vapor	746	762	8	29849,245	18,970
P-79	Vapor	746	762	8	29849,245	18,970
P-70	Líquido	134	141	3	166,120	3,272
P-80	Líquido	134	141	3	166,120	3,272
P-71	Líquido	134	141	3	166,120	3,272
P-81	Líquido	134	141	3	166,120	3,272
P-72	Líquido	128	141	7	135,055	2,915
P-82	Líquido	128	141	7	135,055	2,915
P-73	Líquido	67	73	3	31,065	2,448
P-83	Líquido	67	73	3	31,065	2,448
P-74	Líquido	16	21	3	0,655	0,905
P-84	Líquido	16	21	3	0,655	0,905
P-85	Líquido	16	21	3	1,310	1,810
P-86	Líquido	83	89	3	62,131	3,190
P-87	Líquido	53	60	4	21,255	2,676
P-88	Líquido	53	60	4	21,255	2,676
P-89	Líquido	53	60	4	21,255	2,676
P-90	Líquido	161	168	3	252,209	3,441
P-102	Líquido	161	168	3	252,209	3,441
P-116	Líquido	161	168	3	252,209	3,441
P-91	Vapor	746	762	8	20433,817	12,986

Tabla. MD. XXXI.bis. H. de datos: Red de tuberías. Flujo. (Cont. en pág. sig.)

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Memoria descriptiva

Designación	Fase	D <sub>i</sub> (mm)	D <sub>e</sub> (mm)	t (mm)	Caudal de flujo (m <sup>3</sup> /h)	v <sub>flujo</sub> (m/s)
P-103	Vapor	746	762	8	20433,817	12,986
P-117	Vapor	746	762	8	20433,817	12,986
P-92	Líquido	161	168	3	256,223	3,496
P-104	Líquido	161	168	3	256,223	3,496
P-118	Líquido	161	168	3	256,223	3,496
P-93	Vapor	746	762	8	29723,408	18,890
P-105	Vapor	746	762	8	29723,408	18,890
P-119	Vapor	746	762	8	29723,408	18,890
P-94	Líquido	161	168	3	242,068	3,303
P-106	Líquido	161	168	3	242,068	3,303
P-120	Líquido	161	168	3	242,068	3,303
P-95	Vapor	746	762	8	31280,183	19,879
P-107	Vapor	746	762	8	31280,183	19,879
P-121	Vapor	746	762	8	31280,183	19,879
P-96	Vapor	746	762	8	33009,044	20,978
P-108	Vapor	746	762	8	33009,044	20,978
P-122	Vapor	746	762	8	33009,044	20,978
P-97	Líquido	161	168	3	254,704	3,475
P-109	Líquido	161	168	3	254,704	3,475
P-123	Líquido	161	168	3	254,704	3,475
P-98	Líquido	161	168	3	254,704	3,475
P-110	Líquido	161	168	3	254,704	3,475
P-124	Líquido	161	168	3	254,704	3,475
P-99	Líquido	161	168	3	249,610	3,406
P-111	Líquido	161	168	3	249,610	3,406
P-125	Líquido	161	168	3	249,610	3,406
P-100	Líquido	28	33	3	5,094	2,298
P-112	Líquido	28	33	3	5,094	2,298
P-126	Líquido	28	33	3	5,094	2,298
P-101	Líquido	43	48	3	16,202	3,099
P-114	Líquido	43	48	3	16,202	3,099
P-130	Líquido	43	48	3	16,202	3,099
P-113	Líquido	37	42	3	10,188	2,632
P-115	Líquido	63	73	5	32,405	2,888
P-127	Líquido	43	48	3	15,282	2,923
P-128	Líquido	21	27	3	3,973	3,186
P-129	Líquido	37	42	3	11,309	2,922
P-131	Líquido	79	89	5	48,607	2,755
P-132	Líquido	37	42	3	11,323	2,925
P-133	Líquido	67	73	3	37,284	2,937
P-134	Líquido	79	89	5	47,430	2,688
P-135	Líquido	79	89	5	47,430	2,688
P-136	Vapor	134	141	3	397,893	7,837

Tabla. MD. XXXI.bis. H. de datos: Red de tuberías. Flujo. (Cont. en pág. sig.)

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Memoria descriptiva

Designación	Fase	D <sub>i</sub> (mm)	D <sub>e</sub> (mm)	t (mm)	Caudal de flujo (m <sup>3</sup> /h)	V <sub>flujo</sub> (m/s)
P-137	Líquido	37	42	3	10,703	2,765
P-138	Líquido	67	73	3	36,797	2,899
P-139	Líquido	16	21	3	0,771	1,065
P-140	Líquido	67	73	3	36,026	2,838
P-141	Líquido	128	141	7	124,599	2,690
P-142	Líquido	67	73	3	31,150	2,454
P-143	Líquido	16	21	3	0,653	0,901
P-144	Líquido	114	127	6	111,793	3,042
P-145	Líquido	83	89	3	63,766	3,274
P-146	Líquido	315	324	5	894,809	3,189

Tabla. MD. XXXI.bis. H. de datos: Red de tuberías. Flujo. (Viene. de pág. ant.)

Se concluye con el recopilatorio de bombas:

Designación PFC	Casa	Designación comercial	Frecuencia (rpm)	Potencia (HP)
B-1	<i>Bell &amp; Gossett</i>	Serie 1510, 2G	1150	5
B-2	<i>Bell &amp; Gossett</i>	Serie 1510, 2G	1150	5
B-3	<i>Bell &amp; Gossett</i>	Serie 1510, 2G	1150	5
B-4	<i>Bell &amp; Gossett</i>	Serie 1510, 2G	1150	5
B-5	<i>Bell &amp; Gossett</i>	Serie 1510, 1-1/2 AC	1150	10
B-6	<i>Bell &amp; Gossett</i>	Serie 1510, 1-1/2 AC	1150	10
B-7	<i>Bell &amp; Gossett</i>	Serie 1510, 1-1/2 AC	1150	10
B-8	<i>Bell &amp; Gossett</i>	Serie 1510, 1-1/2 AC	1150	10
B-9	<i>Bell &amp; Gossett</i>	Serie 1510, 1-1/4 BC	3525	15
B-10	<i>Bell &amp; Gossett</i>	Serie 1510, 1-1/4 AC	3500	3
B-11	<i>Bell &amp; Gossett</i>	Serie 1510, 3 BC	3550	100
B-12	<i>Bell &amp; Gossett</i>	Serie 1510, 4 E	3550	125
B-13	<i>Hidromac</i>	Serie AZ, 11 A	3500	100
B-14	<i>Bell &amp; Gossett</i>	Serie 1510, 4 E	3550	100
B-15	<i>Bell &amp; Gossett</i>	Serie 1510, 2 E	3550	100
B-16	<i>Hidromac</i>	Serie AZ, 11 A	3500	100
B-17	<i>Hidromac</i>	Serie AZ, 11 A	3500	125
B-18	<i>Bell &amp; Gossett</i>	Serie 1510, 1-1/4 BC	3525	20
B-19	<i>Hidromac</i>	Serie AZ, 11 A	3500	100
B-20	<i>Hidromac</i>	Serie AZ, 11 A	3500	125
B-21	<i>Bell &amp; Gossett</i>	Serie 1510, 1-1/4 BC	3525	20
B-22	<i>Bell &amp; Gossett</i>	Serie 1510, 3 BC	3550	50
B-23	<i>Hidromac</i>	S. 2196, A30-MTO/LTO	3500	150
B-24	<i>Bell &amp; Gossett</i>	Serie 1510, 2G	1150	2
B-25	<i>Bell &amp; Gossett</i>	Serie 1510, 3 BC	3550	50
B-26	<i>Hidromac</i>	S. 2196, A30-MTO/LTO	3500	200
B-27	<i>Bell &amp; Gossett</i>	Serie 1510, 2G	1150	2
B-28	<i>Hidromac</i>	S. 2196, A30-MTO/LTO	3500	200

Tabla. MD. XXXII. Hoja de datos de bombas. (Cont. en pág. sig.)

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Memoria descriptiva

Designación PFC	Casa	Designación comercial	Frecuencia (rpm)	Potencia (HP)
B-29	<i>Hidromac</i>	S. 2196, A30-MTO/LTO	3500	200
B-30	<i>Hidromac</i>	S. 2196, A30-MTO/LTO	3500	200 x 6 bombas
B-31	<i>Bell &amp; Gossett</i>	Serie 1510, 1-1/4 BC	3525	20
B-32	<i>Hidromac</i>	S. 2196, A30-MTO/LTO	3500	200
B-33	<i>Hidromac</i>	S. 2196, A30-MTO/LTO	3500	200
B-34	<i>Hidromac</i>	S. 2196, A30-MTO/LTO	3500	200 x 6 bombas
B-35	<i>Bell &amp; Gossett</i>	Serie 1510, 1-1/4 BC	3525	20
B-36	<i>Hidromac</i>	S. 2196, A30-MTO/LTO	3500	200
B-37	<i>Hidromac</i>	S. 2196, A30-MTO/LTO	3500	200
B-38	<i>Hidromac</i>	S. 2196, A30-MTO/LTO	3500	200 x 6 bombas
B-39	<i>Bell &amp; Gossett</i>	Serie 1510, 1-1/4 BC	3525	20
B-40	<i>Bell &amp; Gossett</i>	Serie 1510, 1-1/4 BC	3525	10
B-41	<i>Bell &amp; Gossett</i>	Serie 1510, 2 BC	3550	20
B-42	<i>Hidromac</i>	Serie AZ, 11 A	3500	125
B-43	<i>Bell &amp; Gossett</i>	Serie 1510, 4 E	3550	75
B-44	<i>Bell &amp; Gossett</i>	Serie 1510, 4 E	3550	75

Tabla. MD. XXXII. Hoja de datos de bombas. (Viene de pág. ant.)

---

## **Capítulo MD.C8. Control de procesos**

La instrumentación y control de procesos es, junto al desarrollo en detalle de las redes de tuberías y la optimización de los trenes de intercambio de calor, uno de los elementos de la ingeniería de detalle de una planta de procesos, que involucra mayor carga de trabajo e interdisciplinariedad. No será objeto del PFC el diseño de lazos de control dado su carácter de pre-ingeniería básica. El desarrollo de las estrategias de control sucede a la fase de ingeniería básica como queda expresado

De esta forma, se dedica el presente capítulo a la descripción de los componentes de un sistema de control y la integración que el sistema de la planta tendría con respecto a la *Refinería Gibraltar-San Roque* donde se emplaza.

### **MD.C8.1. Sistemas de control**

Los sistemas de control son precisos para lograr un funcionamiento estable de los procesos. Se emplean al objeto de mantener unas determinadas variables de operación comprendidas dentro de unos valores de consigna, (o *set-points* en inglés), relacionados, bien con los objetivos de producción del proceso, bien para preservar la seguridad en la planta.

La estructura fundamental del sistema es el lazo de control que, *grosso modo*, estará integrado por los siguientes elementos: sensor, que mide una variable física cuyo valor desea mantenerse controlado por comparación con el valor de consigna; transmisor, que convierte la señal física, (bien sea presión, temperatura, caudal, etc.), en una señal eléctrica normalizada entre 4 y 20 mA; un procesador, que se ocupa de descifrar la señal eléctrica, aplicar un algoritmo previamente programado y generar otra respuesta eléctrica y el actuador que, como elemento final de control, interpreta la señal del procesador, la transforma en señal mecánica y actúa sobre el proceso siem-

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Memoria descriptiva

pre que la variable se aleje de su valor de consigna, logrando mantener el proceso en sus márgenes preconizados de operación.

Cada lazo de control debe integrarse en una arquitectura superior de control que permita la interacción hombre-máquina, de tal forma que un panelista pueda obtener información en tiempo real sobre el funcionamiento de los procesos.

### MD.C8.1.1. Nomenclatura de los instrumentos

Los instrumentos integrados en los lazos de control se representan, básicamente, por un círculo en cuyo interior se colocan las letras y números que designan el tipo de instrumento y la posición, dentro del diagrama de control del proceso, que ocupan. Los instrumentos correspondientes a un mismo lazo se identificarán con el mismo número.

La designación de los instrumentos se efectúa mediante dos o más letras, indicando la primera el tipo de variable medida, indicada, transmitida o controlada; la segunda, la función que desempeña el instrumento en cuestión en el lazo. Las variables y funciones más comunes se recogen en la siguiente tabla según nomenclatura ISA:

Letra	Primera letra	Segunda y sucesivas	Letra	Primera letra	Segunda y sucesivas
A	Análisis	Alarma	M	Humedad	Medio
C	Conductividad	Control	P	Presión	Punto
D	Densidad	-	R	Radiactividad	Registro o impresión
E	Voltaje	Elemento primario	S	Velocidad	Interruptor
F	Caudal	-	T	Temperatura	Transmisor
H	-	Alto	V	Viscosidad	Válvula
I	Intensidad	Indicador	W	Peso	-
K	Tiempo	Estación de control	Y	-	Calculador
L	Nivel	Bajo	Z	Posición	Servo

Tabla. MD. XXXIII. Nomenclatura ISA. (Viene de página anterior)

Si para un instrumento en concreto se tiene designación por una sola letra, su valor será el de la segunda columna. Si presenta más de una, el valor de la primera corresponderá al de la primera co-

---

lumna, mientras que el resto de las letras adquieren el significado de la segunda.

### MD.C8.1.2. Instrumentación

Independientemente de la estrategia de control elegida, la implementación física del sistema se concreta en la medición de datos del proceso, lo que requiere el concurso de los diversos instrumentos que, en líneas generales, pueden clasificarse en los siguientes tipos:

- Instrumentos de medida: Aquéllos dispositivos aplicados al recabado de datos físicos requeridos por el sistema de control.
- Actuadores: Aquéllos capaces de modificar las variables manipuladas del proceso en la dirección adecuada.
- Sistemas de transmisión de información: Aquéllos capaces de transportar las señales medidas a los controladores así como las señales de control a los actuadores.
- Controladores: Aquéllos capaces de determinar, a partir de una lógica programada, la actuación requerida para mantener el proceso controlado en función de las variables medidas.

El proceso de medida de una variable consiste en la comparación de ésta con una unidad patrón. En algunos casos, dicha comparación es directa, si bien en otras se realiza por la aplicación de algún principio físico-químico, que relaciona unas magnitudes de variable con otra. Los elementos que integran los instrumentos de medida son los que siguen:

- Elemento primario o sensor: Dispositivo en contacto con la variable de proceso que se mide. Sufre una excitación que es procesada por el siguiente elemento, (por ejemplo un sensor de presión de diafragma se contraerá en función del flujo en una conducción).

- Transductor: Elemento que modifica la excitación del sensor, convirtiéndola en una señal inteligible por los sistemas de control, (siguiendo el ejemplo, un piezoeléctrico unido al diafragma generará una tensión eléctrica en función de la compresión ejercida por el sensor).
- Transmisor: Dispositivo que convierte la señal del transductor en una eléctrica normalizada, compatible con cualquier instrumento de control.

Los medidores más comunes y extensamente aplicados en industria son los de temperatura, caudal, presión y nivel. Se dedicará un apartado a cada uno de ellos.

### MD.C8.1.3. Medidores de temperatura

Los medidores de temperatura tienen por objetivo el control de esta variable en el interior de equipos y conducciones. Su lectura permite tomar decisiones de control sobre el flujo de fluidos en conducciones. El esquema de control en que se insertan sería el siguiente:

- Elemento de medida: Sensor de temperatura de tipo termopar, apropiado al rango de temperaturas de operación, (cuanto menor es el rango seleccionado, tanto mayor precisión).
- Elemento de control: Controlador Proporcional Integral Derivativo, (PID) asociado.
- Elemento final: Válvula de control neumática para regulación de caudal.

Adicionalmente se incluirán sistemas de seguridad como alarmas de alta y baja temperatura. Cuando salta una alarma, la lógica de actuación indica las actuaciones que se seguirán. Por ejemplo, si se produjera una alarma de alto nivel de temperatura en la cabeza de una columna, la actuación consistiría en aumentar el reflujo abriendo la válvula de descarga del acumulador de reflujo correspondiente.

#### MD.C8.1.4. Medidores de presión

Los medidores de presión tienen por objetivo el control de esta variable en el interior de equipos y conducciones. Su lectura permite tomar decisiones de control sobre el alivio de fluidos de un sistema, tanto como salida normal como por desviación a antorcha. El esquema de control en que se insertan sería el siguiente:

- Elemento de medida: Sensor de presión de tipo membrana.
- Elemento de control: Controlador PID asociado.
- Elemento final: Válvula de control neumática para regulación de caudal y de compuerta para alivio a antorchas.

Adicionalmente se incluirán sistemas de seguridad como alarmas de alta y baja presión.

#### MD.C8.1.5. Medidores de caudal

Los medidores de caudal tienen por objetivo el control de la entrada o salida de fluidos de algún equipo o sección de un proceso. Su lectura permite tomar decisiones sobre el normal flujo de una corriente de proceso. El esquema de control en que se insertan sería el siguiente:

- Elemento de medida: Distintos tipos de medidores de caudal: de membrana, magnéticos, por efecto *Coriolis*, etc.
- Elemento de control: Controlador PID asociado.
- Elemento final: Válvula de control neumática.

Adicionalmente se incluirán sistemas de seguridad como alarmas de alto y bajo caudal.

### MD.C8.1.6. Medidores de nivel

Los medidores de nivel tienen por objetivo el control de la altura de los fluidos en los equipos de proceso. Su lectura permite tomar decisiones sobre el alivio de corrientes de equipos a fin de mantener controladas las condiciones de operación. El esquema de control en que se insertan sería el siguiente:

- Elemento de medida: Distintos tipos de medidores de caudal: por radar, ultrasonidos, capacitivo, etc.
- Elemento de control: Controlador PID asociado.
- Elemento final: Válvula de control neumática.

Adicionalmente se incluirán sistemas de seguridad como alarmas de alto y bajo nivel.

### MD.C8.1.7. Elementos finales de control

Para la planta químicas, el elemento de control típico es la válvula de control o regulación automática, cuya misión consiste en ejecutar las órdenes procedentes del procesador de control. La señal eléctrica de control se transforma en neumática normalizada, lo que, al penetrar en el cuerpo de la válvula la acciona permitiendo o negando el flujo en función de la actuación requerida.

## **MD.C8.2. Sistemas de control distribuido (SCD)**

Tras la presentación de los elementos fundamentales del control automático de procesos, debe indicarse la integración del proceso proyectado en el sistema de Refinería.

Por sistema de control distribuido se entiende el conjunto de componentes eléctricos, electrónicos, informáticos y mecánicos capaces de funcionar de forma coordinada a pesar de estar descentralizados. La siguiente figura ilustra los rudimentos de la arquitectura de control de una planta de procesos:

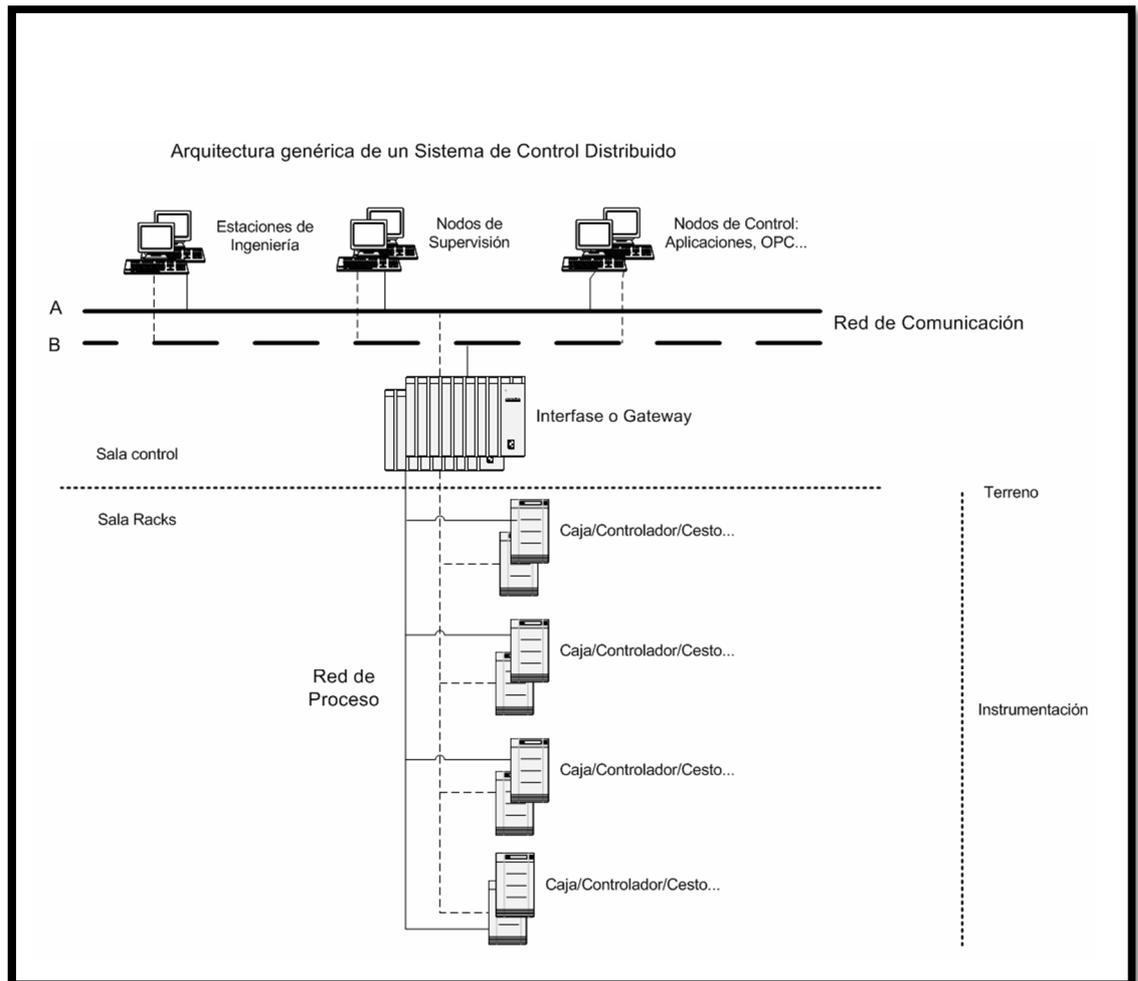


Figura. MD.39. Sistema de Control Distribuido. (CEPSA, 2011)

Los elementos del sistema son los siguientes:

- Terreno: Lugar físico donde se ubican los procesos y se sitúa la instrumentación de medición y actuación.
- Sala de control: Local donde se ubican las consolas de control de procesos, proporcionando información en tiempo real de los procesos.
- Sala de *rack*: Local donde converge la información de terreno, los controladores deciden las actuaciones, las cursan a terreno y afrontan la supervisión y modificación de la sala de control.

- Red de comunicación: Sistema descentralizado de información redundante. Permite el acceso provee de señal a la sala de control y transmite las órdenes de ésta a la de *rack*.

Básicamente, los instrumentos presentan dos cables: uno transmitiendo información de salida y otro de recepción de órdenes. Ambos cables parten del terreno, son aglutinados por un conductor mayor, (un multicable) y se dirigen, sobre los *racks* de tuberías, a la sala de *rack*.

En la sala de *rack*, los multicables se insertan en tarjetas de red conectadas a un ordenador capaz de correr distintas lógicas de control para las señales de diversos instrumentos de forma simultánea. El ordenador envía dos señales: una de salida a terreno ordenando las oportunas actuaciones y una digital que pasa por una interfase, (que la convierte en información inteligible por el ser humano) antes de dirigirse a la red coaxial de fibra óptica.

Esta red es redundante, de modo que si el sistema falla en algún punto, siempre puede conectarse a otro y recibir la información de los procesos en las consolas de control de los panelistas. Además permite el control remoto de procesos, puesto que a las estaciones de ingeniería y supervisión puede accederse a través de conexión a internet, lo que permitiría eventualmente controlar procesos a kilómetros de distancia.

A grandes rasgos éste es el funcionamiento del sistema de control de Refinería. Un nuevo proceso como es el objeto del PFC, podría insertarse en el SCD siguiendo las directrices indicadas.

Los cables de instrumentos se agrupan en multicables que discurrirán por el *rack* de tuberías diseñado hasta la sala de *rack*, que habría de ubicarse lo más cercana posible al proceso, a fin evitar el ruido en el transporte de la señal eléctrica de instrumentos. En la sala de *rack*, la información en tiempo real se vierte a la red coaxial, de modo que podrá seguirse la evolución de los procesos, garantizar el

cumplimiento de normativas de seguridad y ambientales y modificar los algoritmos de control y puntos de consigna desde las consolas ubicadas en la sala de control de la Refinería.



---

## **Capítulo MD.C9. Estudio de seguridad e higiene**

### **MD.C9.1. Introducción**

En el presente proyecto se realizará un estudio sobre seguridad e higiene en el trabajo, en el cual se realizará un breve análisis sobre los riesgos inherentes al proceso llevado a cabo en la planta. Con carácter previo al estudio se definirá el concepto de seguridad e higiene en el trabajo.

#### **- Seguridad en el trabajo**

Conjunto de conocimientos científicos y tecnológicos, organizados y aplicados al estudio, reconocimiento y evaluación de riesgos, al diseño de medios preventivos y al análisis y control de los trabajos o elementos que incidan en la generación de accidentes de trabajo, con el fin de impedir que se originen pérdidas y conseguir las mejores condiciones laborales.

Fue implantada tras la Medicina del Trabajo, y es la primera especialidad cuya acción va dirigida, de manera exclusiva y organizada, a prevenir accidentes de trabajo, ya que son éstos los que proporcionan los datos más cuantificables y ostensibles dentro de las estadísticas de la siniestralidad laboral. Además son los que dejan un mayor número de secuelas y tienen una mayor repercusión social, humana y económica. Por ello se ha convertido en la columna principal del entramado de la Salud Laboral.

#### **- Higiene en el trabajo**

Conjunto de conocimientos científicos y tecnológicos, organizados y aplicados al estudio, reconocimiento y evaluación de sustancias y factores ambientales derivados del trabajo, que incidan negativamente sobre la salud del trabajador, así como el diseño de los medios preventivos y al control de dichos factores, con la finalidad de evitar las enfermedades que puedan causar los riesgos originados por ellos, o las molestias que puedan afectar a la salud.

Tiene unos objetivos preventivos precisos y definidos. Se suele agrupar con la Seguridad en la denominación “Seguridad e Higiene en el Trabajo” (SHT).

Concluida la introducción se define el objeto del estudio.

### **MD.C9.2. Objeto del estudio**

El objeto del presente estudio es la evaluación de los principales riesgos existentes en el puesto de trabajo durante la operación de la planta proyectada, y el establecimiento en su caso de las medidas preventivas requeridas al objeto de eliminar o minimizar todos y cada uno de ellos.

### **MD.C9.3. Marco legal de la seguridad e higiene en el trabajo**

- Legislación general
  - o Constitución Española

En el ordenamiento jurídico nacional, la Seguridad e Higiene es un bien amparado por la Norma Suprema, la Constitución Española, en sus artículos 15 y 40, en los que se establece el derecho del trabajador a la integridad física y a la obligación del Estado a velar por la Seguridad e Higiene:

*Artículo 15: Todos tienen derecho a la vida y a la integridad física y moral, sin que, en ningún caso, puedan ser sometidos a tortura ni a penas o tratos inhumanos o degradantes.*

Este derecho es aplicable al colectivo de trabajadores y establece que al trabajador le asiste el derecho a que se garantice en su puesto de trabajo las condiciones suficientes para conservar y preservar su salud. En una sentencia del Tribunal Constitucional de 1985, se clarifica: “la celebración de un contrato de trabajo no implica en modo alguno la privación para el trabajador de los derechos que la Constitución le reconoce como ciudadano “.

---

*Artículo 40, punto 2: Los poderes públicos fomentarán una política que garantice la formación y readaptación profesional y velarán por la Seguridad e Higiene en el trabajo.*

Es por tanto, uno de los principios rectores de la política social y económica. La vinculación de los poderes públicos les obliga a emanar la legislación conducente a alcanzar los objetivos marcados y les prohíbe legislar en sentido contrario.

- Estatuto de los Trabajadores

Una de las primeras consecuencias de la obligación constitucional de velar por la Seguridad e Higiene Industrial fue la consideración de varios preceptos en la Ley del Estatuto de los Trabajadores de 10 de marzo de 1980: en los artículos 4 y 5 se tratan los derechos y obligaciones básicas laborales; el artículo 64 se refiere a las competencias de los delegados de personal y comités de empresa; y el artículo 19 se dedica íntegramente a la Seguridad e Higiene.

*Artículos 4 Y 5: El trabajador, durante el desarrollo de su trabajo, tiene derecho a su integridad física y a una adecuada política de Seguridad e Higiene.*

*Es deber básico del trabajador el observar las medidas de Seguridad e Higiene que se adopten.*

El artículo 19 está dedicado íntegramente a la Seguridad e Higiene, contiene 5 apartados:

1º Derecho del trabajador a una protección eficaz.

2º Deber correlativo del trabajador a observar las medidas de Seguridad e Higiene.

3º Derecho del trabajador a participar en la inspección y control de las medidas de Seguridad e Higiene.

4º Obligación empresarial de facilitar al trabajador la formación adecuada en materias preventivas.

5º Arbitra el procedimiento a seguir para la paralización y suspensión de actividades en los supuestos de riesgo grave o inminente de accidente.

*Artículo 64:* sobre las competencias del comité de Empresa:

Conocer trimestralmente las estadísticas sobre el índice de absentismo, los accidentes de trabajo y enfermedades profesionales y sus consecuencias, los índices de siniestralidad, los estudios del medio ambiente laboral y los mecanismos de prevención que se utilizan, ejercer una labor de vigilancia y control de las condiciones de Seguridad e Higiene en el desarrollo del trabajo de la empresa.

- Ley General de la Seguridad Social

La Ley general de la Seguridad Social de 20 de Junio de 1994 contiene partes importantes que atañen muy directamente a la Seguridad e Higiene:

*Artículos 115, 116 Y 117:* Definen, respectivamente, el accidente de trabajo, las enfermedades profesionales, y los accidentes no laborales y enfermedades comunes.

*Artículo 123:* Establece un recargo (30-50%) de todas las prestaciones económicas que tengan su causa en accidentes de trabajo o enfermedades no laborales por falta de medidas de seguridad.

*Artículos 196 Y 197:* Establecen reconocimientos médicos preceptivos para puestos de trabajo con riesgos de enfermedades profesionales.

- Legislación específica

La legislación española, específica en materia de Seguridad e Higiene, es muy abundante, notablemente profusa y carente de un criterio inspirador, debido a los avatares políticos y a la dispersión de competencias de la Seguridad e Higiene en varios ministerios: Trabajo y Seguridad Social, Industria, Agricultura, Obras Públicas y Transportes, Comercio, Medio Ambiente, etc.

Hay preceptos no sólo en reglamentos especiales de carácter técnico sino también en legislación de contenido social como las relativas a la contratación laboral, convenios colectivos, etc. Esta proliferación de normativa se ha visto incrementada con la adaptación de la legislación española a la UE.

- Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo

Es una Orden Ministerial del Ministerio de Trabajo, con fecha 9 de marzo de 1971. Pretendía regular en un texto unitario las condiciones de Seguridad e Higiene que debían reunir los lugares de trabajo.

- Ley de Prevención de Riesgos Laborales

La ley 31/1995 de 8 de noviembre de Prevención de Riesgos Laborales (BOE 10 de noviembre) es el resultado de la obligada transposición de la Directiva-marco 89/391/CEE de Seguridad y Salud Laboral. El primer borrador se hizo público en 1991 y desde entonces hasta su publicación oficial siguió un proceso de negociación entre el Gobierno, asociaciones empresariales y sindicales.

- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo

El Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT) es el órgano Científico-Técnico especializado de la Administración General del Estado que tiene como misión el análisis y estudio de las Condiciones de Seguridad y Salud en el Trabajo, así como la promoción y apoyo a la mejora de las mismas. Para ello establece

la cooperación necesaria con los órganos de las Comunidades Autónomas en la materia.

El artículo 8.1 de la Ley 31/1995 describe las funciones del INSHT:

- Asistencia técnica.
- Estudio/Investigación.
- Formación.
- Promoción/Información/Divulgación.
- Desarrollo Normativo/Normalización.
- Ensayo/Certificación de equipos de protección y de máquinas.
- Cooperación técnica.
- Secretariado de la Comisión Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo.

#### **MD.C9.4. Evaluación de riesgos en el presente proyecto**

Un análisis en profundidad de la planta una vez realizada la memoria descriptiva del presente proyecto, lleva a plantear la existencia de los siguientes riesgos:

- Riesgo químico.
- Riesgo de explosión e incendio.
- Riesgo físico.
- Riesgo eléctrico.
- Riesgo en la manipulación de maquinaria y herramientas de trabajo.
- Riesgos en el almacenamiento de sustancias químicas.

##### **MD.C9.4.1 Riesgo químico**

Se entiende por acción tóxica o toxicidad, la capacidad de una sustancia para ocasionar daños en los organismos vivos una vez ha alcanzado un punto del cuerpo susceptible a su acción. La toxicidad de una sustancia depende de múltiples factores relacionados con su

composición química, características físicas de presentación y circunstancias de exposición.

Se considera intoxicación a la absorción y presencia de un compuesto químico dentro del organismo. Su aparición y gravedad suelen guardar proporción con las dosis recibidas.

Los efectos de los tóxicos son muy variados. Una clasificación sintética permite distinguir los siguientes tipos:

- Efectos asfixiantes

La asfixia es la insuficiencia de aporte de oxígeno a los tejidos, con el resultado de su carencia en reacciones metabólicas imprescindibles para la vida. Pueden tener causa física o química:

En el primer caso, ocurren debido al desplazamiento del oxígeno por otros gases. Cuando el contenido de oxígeno en aire cae por debajo del 18% sobreviene la inconsciencia. Por debajo del 14% se produce la muerte.

En el segundo caso, distintas sustancias pueden interferir en el proceso de respiración. Se distinguen asfixias químicas de dos tipos: primarias, que impiden la absorción del oxígeno, (los gases irritantes cierran el paso del aire a los pulmones, por inflamación de los tejidos), y secundarias que originan un aprovechamiento defectuoso del oxígeno del aire.

Un ejemplo de ésta última son el monóxido de carbono, que, al fijarse a la hemoglobina sustituye al oxígeno, arruinando el normal transporte éste en sangre, y el cianuro de hidrógeno que inhibe la respiración celular en las mitocondrias.

- Efectos neumoconióticos

Son alteraciones del aparato respiratorio, en particular, en el tejido pulmonar. Son causados por las fibras y partículas sólidas que se respiran.

El efecto de estas partículas sobre el aparato respiratorio depende no sólo de su composición química sino también de su tamaño.

Las partículas mayores de 5  $\mu\text{m}$  quedan retenidas en el tracto respiratorio superior, y son deglutidas o expulsadas con la mucosidad. Causan generalmente irritación y tos.

Entre 5 y 0,1  $\mu\text{m}$ , se depositan en los alvéolos pulmonares produciendo daños en el tejido pulmonar, incluso siendo sustancias inertes y produciendo silicosis, asma o alveolitis.

Las partículas menores de 0,1  $\mu\text{m}$  pasan a la sangre a través de los alvéolos. Se comportan como gases y no causan efectos locales en el aparato respiratorio.

- Efectos irritantes

Se habla de irritantes cuando se producen alteraciones (generalmente inflamación) de los tejidos con los que entra en contacto pero sin daños irreversibles.

Los irritantes del aparato respiratorio se clasifican según la zona a la que afecten: las sustancias hidrosolubles (dióxido de azufre, amoníaco o formaldehído suelen afectar al tracto superior, mientras que las poco solubles (dióxido de nitrógeno o ácido sulfhídrico) penetran hasta el tejido pulmonar, causando su inflamación. En ambos casos, si la irritación es muy intensa, pueden bloquearse los conductos del aparato respiratorio, y junto con la continua tos, pueden provocar la asfixia.

Las afecciones de la piel (dermatosis) suponen la gran mayoría de las enfermedades provocadas por agentes químicos. Son procesos originados por contacto de la piel con agentes del medio laboral y se manifiestan sobre la misma piel. Los agentes químicos que causan dermatosis se clasifican en dos grupos: irritantes primarios y sensibilizadores.

Los irritantes primarios afectan a la mayoría de los sujetos expuestos. Son irritantes casi todos los ácidos y bases incluso a bajas concentraciones, y también la mayoría de los disolventes orgánicos.

Los sensibilizadores no producen irritación en el primer contacto pero después de exposición repetida desarrollan una reacción alérgica. No tiene por qué afectar a todos los sujetos.

- Efectos corrosivos

Las sustancias corrosivas destruyen los tejidos con los que entran en contacto. En general, son sustancias corrosivas las bases y ácidos moderados y fuertes, especialmente cuando están concentrados. También se clasifican dentro de las sustancias corrosivas aquellos compuestos que provocan una fuerte deshidratación de la piel, por cuanto ello supone su destrucción.

De forma general, el poder corrosivo de un ácido o una base aumenta al aumentar el carácter ácido o básico del mismo. En los casos de ácidos (y bases) débiles, la diferencia entre una irritación y una corrosión es difusa y puede deberse a factores como concentración o temperatura. En cualquier caso, debe indicarse que la irritación cesa al cesar la exposición al agente y la corrosión supone una destrucción de tejidos.

- Efectos carcinogénicos, mutagénicos y teratogénicos

Son alteraciones provocadas sobre el ADN, que contiene toda la información genética de las células. Si ocurre sobre células somáticas se producen desarrollos erróneos de éstas (carcinogénico); si

se produce sobre células germinales se procreará un ser con enfermedades genéticas (mutagénico); si afecta a un feto en desarrollo, provocarán malformaciones en éste (teratogénico). En estos casos, la época más crítica es la fase embrionaria (hasta las 10 primeras semanas). Si los efectos producidos son graves, pueden producirse abortos. En otros casos los niños nacen con malformaciones más o menos graves, desarrollo deficiente e incluso enfermedades diferidas (cuando llegan a adultos).

En general, es difícil su estudio debido al largo periodo de latencia para el desarrollo de las enfermedades. Se pueden hacer ensayos en animales de laboratorio, pero los resultados no siempre son extrapolables a seres humanos. También se obtiene valiosa información de estudios epidemiológicos.

En función de los estudios que se tengan acerca de los efectos de un determinado compuesto, se clasifica en categoría primera, segunda o tercera.

Corresponden a la primera categoría todos aquellos compuestos cuya relación entre la causa (la exposición al agente) y el efecto (la aparición de una enfermedad), en personas está probado.

En la segunda categoría la relación causa-efecto sólo está demostrada en animales. Probablemente sean sustancias carcinogénicas para el hombre, pero no hay datos concluyentes para demostrarlo.

Finalmente en tercera categoría se clasifican las sustancias sospechosas de producir efectos carcinogénicos, si bien, no hay datos suficientes para incluirlas en la 2ª categoría.

- Sustancias “tóxicas”, “muy tóxicas” y “nocivas” (según Nota Técnica de Prevención, NTP 108)

El principal recurso para establecer de modo experimental la toxicidad de los compuestos químicos, lo constituyen las pruebas de

toxicidad con animales. También la epidemiología aporta datos de importancia pero menos específicos y normalizables.

En las pruebas de toxicidad con animales se utilizan ejemplares que permitan una experimentación relativamente asequible y cuya respuesta general a los efectos de los tóxicos sea extrapolable al hombre.

Una de las pruebas más utilizadas consiste en determinar la dosis letal media para exposiciones agudas,  $DL_{50}$ , que es la dosis, expresada en miligramos de compuesto tóxico por kilogramo de peso del ejemplar, que administrada de una vez por vía oral a un grupo concreto de animales produce la muerte del 50% de los mismos en un período de 14 días tras el tratamiento.

Otra prueba importante consiste en determinar la concentración letal media,  $CL_{50}$ , que es la concentración del compuesto tóxico en aire que al ser inhalada durante un período de 4 horas, (en la versión principal de esta prueba), produce el fallecimiento del 50% de los animales, en un período de 14 días tras el tratamiento.

Estas determinaciones pueden realizarse con algunas variantes, ya sea modificando la duración o frecuencia de la exposición utilizando la vía de entrada dérmica, variando los animales de experimentación, o bien manteniendo un período de observación de los efectos más prolongado. En cualquier caso los valores  $DL_{50}$  y  $CL_{50}$ , con especificación de las condiciones en que han sido determinados, constituyen los índices de toxicidad más amplios de que se dispone, en base a los que algunos autores han propuesto la clasificación de los compuestos tóxicos en tres o cuatro grupos, exponentes del orden de severidad del efecto nocivo, como por ejemplo, sustancias muy tóxicas, tóxicas, nocivas y de baja peligrosidad, pero sin que exista hasta el momento un criterio unánime al respecto.

Los compuestos químicos presentes en el proceso son el butadieno, furfural, 1-buteno, cis-2-buteno, iso-buteno, iso-butano y n-butano.

Cada uno de estos compuestos tiene disponible una ficha de seguridad, que ha sido incluida en las últimas páginas del presente capítulo. Ésta será la referencia oficial, (se han tomado del INSHT), para verificar el riesgo químico presente en la línea de proceso.

#### MD.C9.4.2 Riesgo de explosión e incendio

El fuego es el resultado de una reacción química de oxidación fuertemente exotérmica, que se conoce con el nombre de combustión.

Analizando esta definición se encuentran cuatro aspectos fundamentales para conocer la naturaleza del fuego y, por consiguiente, las formas de luchar contra él. Estos cuatro aspectos es lo que se denomina tetraedro del fuego.

A fuer de reacción química existen reactivos y productos de reacción. Siendo una reacción de oxidación, los reactivos pueden identificarse como agentes oxidantes o comburentes y agentes reductores o combustibles.

Entre los agentes oxidantes, hay que destacar el oxígeno contenido en el aire, si bien existen otros (gas cloro, monóxido de carbono, etc.) que pueden actuar como tales en determinados procesos de combustión. Los productos de reacción son generalmente dióxido de carbono y vapor de agua, pero en función del combustible y de la mayor o menor disponibilidad de comburente, pueden formarse gases muy tóxicos como monóxido de carbono, cianuro de hidrógeno, amoníaco, etc.

Dependiendo de la velocidad de la reacción se tiene:

- Oxidación lenta: la oxidación del hierro. La energía desprendida se disipa en los alrededores.
- Combustión simple: combustión del papel, madera, etc. La reacción transcurre en cadena (radicales libres), que aumentan la velocidad de la reacción, con una velocidad de propagación menor a 1 m/s.
- Combustión deflagrante o deflagración: La velocidad de propagación es superior a 1 m/s e inferior a la velocidad del sonido.
- Combustión detonante o detonación: Velocidad de propagación superior a la velocidad del sonido.

Para que una reacción química se produzca, es necesario que las sustancias reaccionantes adquieran cierta energía en forma de calor, de forma que la colisión entre moléculas pueda llegar a romper los enlaces originales dando lugar a otros nuevos que constituirán los productos de la reacción.

La energía que es necesaria aportar para alcanzar el nivel que haga posible la reacción, se conoce como energía de activación ( $E_a$ ), que representa una barrera energética que debe salvarse para que la reacción se complete. El resultado inicial de la colisión de la molécula es un producto intermedio conocido como complejo activado.

La energía de activación sólo es necesaria aportarla para iniciar el fuego. Una vez que éste ha comenzado, el calor desprendido (la combustión es un proceso exotérmico), sirve para mantener la reacción sin necesidad de aportes energéticos externos.

El transcurso de la reacción química puede describirse adecuadamente mediante una secuencia de pasos intermedios conocida como mecanismo de reacción. En las combustiones, los mecanismos de reacción son siempre radicalarios, de tipo reacción en cadena.

En definitiva, el sostenimiento de un fuego requiere bien el aporte de calor que inicie la reacción, combustibles y comburentes

que participen en la reacción y un mecanismo de propagación. El ataque a cualquiera de los vértices del tetraedro, en función de las características del fuego, constituirá una estrategia en la lucha contra los incendios.

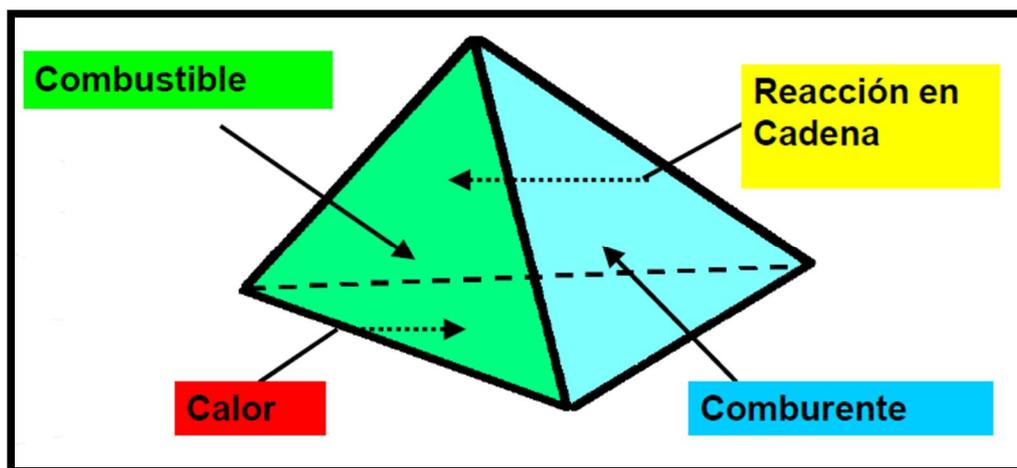


Figura. MD.40. Tetraedro del fuego. (CEPSA, 2011)

En términos amplios, una explosión es un fenómeno originado por un súbito cambio físico o químico en el estado de una masa que produce una gran liberación de energía y un aumento de volumen de un gas o vapor (aire, vapor de agua, gases de combustión, etc.) en un medio, recipiente, atmósfera, local, etc. que opone resistencia a dicho aumento

La implosión es otro término que aparece cuando se hace referencia a la deformación de un recipiente que sufre un vacío en su interior (p.ej. una bombilla). Si el recipiente se fracciona, seguidamente a la implosión se produce la proyección de los fragmentos del recipiente al exterior al rebotar dentro.

Según la forma de desarrollarse pueden ser: confinadas, cuando suceden dentro de un recipiente o recinto determinado, como la explosión de un reactor químico; o no confinadas, cuando suceden al aire libre y generalmente requieren una gran cantidad de masa com-

---

bustible para que sea significativo el aumento de presión, como sucede en la deflagración de una nube de vapor inflamable.

Atendiendo a su origen, las explosiones se pueden clasificar en explosiones químicas y explosiones físicas, según se deban a reacciones químicas o a cambios en las condiciones de presión y temperatura.

- Explosiones químicas

Son debidas a reacciones químicas violentas, tales como la combustión de una mezcla de aire y gas o polvo, la descomposición de una sustancia explosiva u otras formas de reacción de los compuestos consigo mismos (polimerización, descomposición).

Las explosiones químicas se clasifican en estos tres grandes grupos:

1. Explosiones por deflagración o detonación de gases o vapores:

Los gases o vapores combustibles pueden llegar a deflagrar o detonar, siempre que la concentración de combustible se encuentre entre determinados límites de composición. Será deflagración o detonación en función de la velocidad de propagación de la reacción, la cual a su vez depende de la naturaleza del gas y de las condiciones de presión y temperatura. En caso de deflagración, los aumentos de presión pueden alcanzar aproximadamente 8 veces la presión inicial. En las detonaciones, las presiones máximas son de mayor intensidad que las producidas por deflagraciones, pudiendo alcanzar hasta 100 veces la presión inicial

2. Explosiones por deflagración de polvos:

Cuando un sólido combustible arde, la velocidad de reacción suele estar limitada por la difusión de los reactivos en la interfase sólido-gas.

Cuando el sólido combustible está finamente dividido, la velocidad de reacción puede ser mucho mayor y darse el caso de una explosión. La naturaleza de estas explosiones responde al mismo principio que en el caso de gases, pero a diferencia de los gases, siempre son deflagraciones, y no detonan en ningún caso.

### 3. Explosiones de descomposición. Sustancias explosivas:

Son originadas por la reacción de descomposición de ciertas sustancias que, por sí solas o en condiciones especiales, sufren procesos rápidos y violentos. Tal es el caso de la reacción de descomposición del acetileno en carbono e hidrógeno, y ciertas azidas de metales. Igualmente, pueden darse descomposiciones explosivas de mezclas conteniendo el combustible y el oxígeno. Éstos se encuentran en general, en las sustancias llamadas explosivas, tales como la nitroglicerina, trinitrotolueno (TNT), etc., y pueden constituir sustancias preparadas, tal como la pólvora negra que es mezcla de carbono, azufre y nitrato.

La mayor parte de los explosivos se obtienen por nitración. Bien sea una nitración propiamente dicha, o una esterificación (de alcoholes con ácido nítrico).

#### - Explosiones Físicas

Las explosiones físicas consisten en un fenómeno de expansión de un fluido contenido en un recipiente, que genera una presión sobre sus paredes suficiente para provocar su rotura. Son consecuencia de cambios rápidos en las condiciones de presión y temperatura, que llevan a una sobrepresión capaz de romper las paredes del recipiente en que se contiene el sistema. Éste es el caso de la explosión en calderas, cilindros a presión u otros recipientes de proceso que estén sometidos a presión interna.

La causa de la expansión, más o menos rápida, del fluido es, generalmente, una vaporización masiva, bien por sobrecalentamiento

o por depresión. En otros casos, puede ser una expansión térmica de un gas o un líquido contenido en un recipiente.

El efecto es siempre una rotura violenta del recipiente y, como resultado de ésta se proyectan al exterior los trozos de material del recipiente destruido, con el consiguiente riesgo directo para las personas, e indirectamente por impacto en otros equipos, (incendio, explosión o destrucción).

A lo anterior debe añadirse el escape al exterior de la sustancia contenida, lo que a su vez implica diversos riesgos asociados a su naturaleza o a su estado físico (quemaduras en personas y fuente de calor para combustibles cercanos, explosión química, etc.).

En la línea de proceso del presente proyecto se encuentra un alto riesgo de incendio, ya que se trabaja con productos altamente inflamables, si bien, la operación en condiciones de presión y temperatura moderadas y bajas, limita el riesgo a una expresión menor de la que cabría esperar en una planta que trabajara en condiciones más severas.

No obstante, posteriormente se abordarán las medidas genéricas para minimizar al máximo los riesgos.

#### MD.C9.4.3 Riesgo físico

Dentro de los riesgos físicos se van diferenciarán tres categorías:

- Ruido.
- Ambiente térmico.
- Radiaciones.

## Ruido

El ruido puede definirse como "un sonido inarticulado y confuso, cuya intensidad varía generalmente con el tiempo". Otra definición que se puede utilizar es la de "un sonido no deseado".

No hay características físicas que distingan un sonido de un ruido. El sonido se transmite por una onda de presión, luego necesita un soporte material para propagarse.

El oído humano es capaz de detectar desde un sonido asociado a una onda de presión desde tan sólo 20  $\mu\text{Pa}$  hasta 10 millones de veces este valor (20 Pa). Por comodidad se emplea una escala logarítmica, que cubre todo el rango del oído humano con números pequeños. Así el umbral de audición es el  $L = 0$  y el umbral de dolor corresponde a 120 dB (20 Pa).

Los ruidos se clasifican en:

- Ruido de impacto: el Nivel de Presión Acústica, (NPA), decrece exponencialmente con el tiempo y las variaciones entre dos máximos consecutivos se efectúan en un tiempo superior a 1 s.
- Ruido continuo: el NPA se mantiene constante en el tiempo, y si tiene impulsos o picos, éstos se producen en intervalos inferiores a 1 segundo.

Los ruidos continuos a su vez se clasifican en:

- Ruido estable: el NPA se mantiene constante, con una variación inferior a 5 dB.
- Ruido fluctuante: el NPA oscila más de 5 dB.

En cuanto a las frecuencias, el oído humano capta sonidos desde 20 Hz hasta 20000 Hz. El efecto de los sonidos sobre el oído depende de la frecuencia. Para tener en cuenta las distintas sensibilidades del oído humano a las diversas frecuencias, los aparatos de

---

medida de ruido llevan incorporados unos filtros que ponderan las distintas frecuencias tal como lo hace el oído humano: dando mayor peso a las frecuencias centrales y menor a los graves y agudos.

Cuando se da el valor del ruido medido, se indica qué filtro se ha utilizado, por ejemplo 68 dB (A). El filtro A es el más usado por su equivalencia con el oído humano.

Los ruidos provocan sobre el organismo una serie de efectos negativos, especialmente en los casos de exposiciones a ruidos intensos o prolongados. Estos efectos se manifiestan de las siguientes formas:

- Aumento de la presión y ritmo cardíaco.
- Aumento de la tensión muscular.
- Aumento del metabolismo.
- Inhibición del aparato digestivo.
- Molestias psicológicas.

La normativa actual sobre el ruido en España está recogida en el RD 286/2006 y es más estricta que los valores anteriores, estableciendo como valores límites de exposición 87 dB(A) de “nivel diario equivalente” y los 140 dB(C) como pico, estableciendo distintas medidas de recomendación y obligación (en cuanto a protección del personal y realización de audiometrías periódicas) cuando se superasen los valores de 80 y 85 dB(A) y 135 y 137 dB(C).

En cualquier caso, los valores referidos anteriormente hacen referencia únicamente a los daños sobre el sistema auditivo (pérdida de capacidad auditiva). Sin embargo, no tienen en cuenta que valores inferiores a los calculados anteriormente pueden ser, aunque aceptables higiénicamente, muy molestos e incluso incapacitantes para aquellos trabajos que requieran cierta concentración. Se recomienda en estos casos que el ruido no sobrepase nunca un valor de 65 dB.

### Ambiente térmico

El ser humano es un organismo homeotermo, es decir, es capaz de regular su temperatura corporal en un valor constante (37 °C). Esta regulación se basa en un balance entre el calor que se genera en el interior del organismo como consecuencia de la actividad metabólica, y el intercambio de calor con el exterior (ganancia o pérdida, según los casos).

El balance de calor aplicado al cuerpo humano es:

$$A_c = M \pm R \pm C_v \pm C_d - E$$

Siendo  $A_c$  el calor acumulado,  $M$  el calor generado por el metabolismo,  $R$  el calor intercambiado por radiación,  $C_v$  el intercambiado por convección,  $C_d$  el intercambiado por conducción, (es despreciable en la mayoría de las situaciones, excepto en los casos de quemaduras por contacto), y  $E$  es el calor perdido por evaporación del sudor.

El signo positivo en  $M$  indica que siempre es una producción de calor (tanto mayor cuanto mayor es el trabajo físico realizado). El término de evaporación de sudor  $E$  es siempre negativo pues el sudor sobre la piel necesita absorber calor de ésta para evaporarse. Los otros tres términos de intercambio de calor  $R$ ,  $C_v$  y  $C_d$  serán positivos cuando se produzca una entrada neta o negativo si son de salida neta, según cada mecanismo de transmisión estudiado.

En las situaciones normales, el cuerpo humano es capaz de actuar sobre los términos  $M$  y  $E$  de forma que la acumulación de calor sea muy pequeña (en valor absoluto), y de esta forma se mantiene constante la temperatura. Sin embargo, cuando se somete el cuerpo a temperaturas extremas, el término de acumulación se hace grande en valor absoluto y el organismo no es capaz de compensar el balance. Acumulaciones positivas de calor provocan un aumento de la

temperatura corporal; acumulaciones negativas, un descenso de la misma.

En ambos casos, se habla de situación de estrés térmico y suceden problemas higiénicos, desde un simple malestar hasta graves problemas de salud. El frío presenta los siguientes efectos patológicos:

- Contracción de vasos sanguíneos periféricos.
- Falta de riego sanguíneo en las extremidades.
- Congelación de partes distales: orejas, nariz, dedos.
- Dificultad en el habla, pérdida de memoria y destreza manual.

Y el calor los que siguen:

- Síncope térmico o desvanecimiento: Aumento de circulación sanguínea, bajada de tensión, pérdida de conciencia.
- Deshidratación: Originada por una sudoración intensa. Viene acompañada de una pérdida de sales.
- Hipertermia: Aumento anormal de la temperatura intracorporal, acompañada por falta de sudoración.
- Golpe de calor: Se trata de un acceso de hipertermia agudo. Sus consecuencias de graves a fatales.

En el confort de una persona influyen el tipo de trabajo físico que esté realizando, la vestimenta que lleve y el ambiente térmico. En este último influyen cuatro parámetros físico-químicos: la temperatura y humedad del aire, la temperatura radiante y la velocidad del aire.

En zonas normales de trabajo basta con acondicionar el aire a unos valores que produzcan sensación de confort, y el cuerpo humano será capaz de autorregular el metabolismo y la sudoración para compensar ligeros desequilibrios del balance energético. En situaciones extremas con focos térmicos importantes, (fríos o calientes),

se han de tomar medidas higiénicas para preservar la salud de los trabajadores expuestos.

El RD 486/1997 sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo establece las condiciones mínimas ambientales que deben reunir los lugares de trabajo.

### Radiaciones

Dentro del grupo de las radiaciones se diferencian dos grupos principalmente: radiaciones ionizantes y no ionizantes.

#### - Radiaciones ionizantes

Con el nombre de radiaciones ionizantes (RI) se identifican todas aquéllas que al interaccionar con la materia alteran la estructura atómica originando partículas con carga eléctrica (iones), es decir, producen la ionización de los átomos. Las radiaciones ionizantes se clasifican según su naturaleza en particuladas o corpusculares y electromagnéticas u ondulatorias.

Entre las características de las RI cabe destacar:

- Actividad. La actividad (A) de un radionucleido se define como el número de transformaciones nucleares espontáneas que se suceden en el mismo en la unidad de tiempo, siendo su unidad de medida SI el Becquerelio (Bq), que corresponde a una desintegración por segundo.
- Periodo de semidesintegración. Es el tiempo necesario (T) para que la actividad de un radionucleido se reduzca a la mitad. Esta magnitud es muy variable de unos radionucleidos a otros.
- Nivel de energía. El nivel de energía de una radiación ionizante se mide en electronvoltios (eV). El electronvoltio corresponde a la energía que adquiere un electrón cuando se aplica, en el vacío, una diferencia de potencial de 1 voltio y equivale a  $1,6 \cdot 10^{-19}$  J.

- Dosis absorbida. Es la cantidad de energía (D) cedida por la radiación a la materia irradiada por unidad de masa. La unidad de medida SI es el Gray (Gy).
- Dosis equivalente. Es también una magnitud que considera la energía cedida por unidad de masa, pero considerando el daño biológico. Es el producto de la dosis absorbida (D) por un factor de ponderación de la radiación WR. La unidad de medida es el Sievert (Sv). No obstante el Sievert es una unidad muy grande para su utilización en protección radiológica y por esto se utilizan sus submúltiplos, el milisievert (mSv,  $10^{-3}$  Sv) y el microsievert ( $\mu$ Sv,  $10^{-6}$  Sv).

Los efectos biológicos producidos por las radiaciones ionizantes son la respuesta del organismo como consecuencia de la energía absorbida por la interacción con ellas. La energía depositada por las radiaciones ionizantes al atravesar las células vivas da lugar a iones y radicales libres que rompen los enlaces químicos y provocan cambios moleculares que dañan las células afectadas.

En principio, cualquier parte de la célula puede ser alterada por la radiación ionizante, si bien el ADN es el blanco biológico más crítico debido a la información genética que contiene. Las lesiones producidas por la radiación ionizante de naturaleza corpuscular (protones o partículas alfa) son, en general, menos reparables que las generadas por una radiación ionizante fotónica (rayos X o rayos gamma).

El daño en las moléculas de ADN que queda sin reparar o es mal reparado puede manifestarse en forma de mutaciones cuya frecuencia está en relación con la dosis recibida. En general, las RI afectan fundamentalmente a las células en división, siendo especialmente sensibles la médula ósea, el aparato digestivo, la piel y el aparato reproductor. También a los fetos en el útero de sus madres.

El RD 783/2001 por el que se aprueba el Reglamento de protección sanitaria contra radiaciones ionizantes es de aplicación a todas las prácticas que presenten un riesgo derivado de las mismas, tanto si su procedencia es de origen artificial como natural. Otro texto legal que aplica en relación a exposición a radiaciones ionizantes es el RD 413/1997, sobre protección operacional de los trabajadores externos con riesgo de exposición a radiaciones ionizantes por intervención en zona controlada.

Los efectos de las RI son de dos tipos: somáticos y hereditarios, según se manifiesten en el individuo receptor o en su descendencia, respectivamente. A su vez, los efectos somáticos pueden ser estocásticos (o aleatorios) y no estocásticos (o directos).

Los efectos estocásticos son aquéllos en los que la probabilidad de que aparezcan depende de la dosis recibida, pero el daño es independiente de ésta. El cáncer por ejemplo es un efecto somático y estocástico.

La gravedad de los efectos directos o no estocásticos sí depende de la dosis recibida según la regla: a mayor dosis, mayor daño. Existen por lo tanto valores umbrales, por encima de los que se darán efectos negativos. Un ejemplo de este tipo de efecto son las cataratas, que aparecen después de 2-3 años sometido a radiaciones superiores a 2 Gy.

Los efectos hereditarios se manifiestan en la descendencia del individuo. Puede ser porque las RI afecten a las células germinales (espermatozoides u óvulos), en cuyo caso se habla de efectos mutagénicos, o bien porque afecte a un feto en desarrollo dentro del útero de su madre, en cuyo caso se habla de efectos teratogénicos. Los efectos hereditarios son siempre de tipo estocástico.

- Radiaciones no ionizantes

Las radiaciones electromagnéticas son una forma particular de propagación de energía, que tienen su origen en cambios del nivel energético a nivel atómico o molecular. Todos los cuerpos emiten y absorben radiaciones, es decir, las radiaciones son capaces de interactuar con la materia.

Las no ionizantes son radiaciones del espectro electromagnético que no producen ionización en la materia. Incluyen las radiaciones de mayor longitud de onda y menor frecuencia: radiofrecuencias, IR, visible, UV.

Desde el punto de vista de la Higiene Industrial, las radiaciones no ionizantes más importantes son las microondas, infrarrojos y ultravioleta. La radiación visible es importante desde el punto de vista de la Ergonomía (iluminación adecuada al trabajo a realizar; adaptación del puesto de trabajo a los requerimientos del trabajador) y desde el punto de vista de la Seguridad (iluminación mínima para evitar accidentes).

La interacción de las radiaciones sobre el organismo humano ocasiona un efecto distinto según sea la frecuencia de la radiación. Las radiaciones de frecuencia extremadamente baja inducen corrientes eléctricas en el interior del organismo que pueden alterar la circulación de iones o provocar una estimulación directa de las células musculares y nerviosas. Las radiaciones de la banda de radiofrecuencias y microondas pueden ocasionar un calentamiento de la materia, debido a que la energía de la radiación se absorbe por las moléculas aumentando la cantidad de movimiento de las partículas atómicas. Las radiaciones visibles y UV, además de los efectos térmicos, pueden inducir reacciones químicas.

La mayor fuente de UV es el sol y puede producir irritaciones, quemaduras e incluso cáncer de piel según la sensibilidad del receptor. En el mundo industrial, las fuentes de UV son los arcos de descarga eléctrica y lámparas germicidas.

Los efectos de las radiaciones UV se producen sobre todo en la piel y el ojo. Entre los efectos de la piel el más conocido es el eritema, un enrojecimiento doloroso de la parte de piel expuesta que se manifiesta de forma casi inmediata a la exposición; en situaciones de exposición prolongada la piel puede quedar afectada de forma permanente con pérdida de elasticidad.

La exposición ocular genera una conjuntivitis muy dolorosa, que aparece entre 2 y 24 horas después de la exposición, tiene una duración de entre 4 y 6 días y no suele dejar secuelas.

A largo plazo el efecto más grave de las radiaciones UV es su incidencia en la aparición de cáncer de piel.

La radiación UV es fácilmente absorbida por cualquier material. Los apantallamientos y cerramientos de las fuentes son la solución más habitual cuando no sea necesario ver la fuente. La protección de la piel de los trabajadores expuestos también se consigue prácticamente con cualquier ropa de trabajo. Si es necesario tener visibilidad de la zona de operación se pueden instalar vidrios especiales que absorben las radiaciones UV, o bien utilizar gafas o viseras con oculares absorbentes de la radiación.

Los efectos de la radiación visible e infrarroja sobre el cuerpo son fundamentalmente de tipo térmico (calentamiento de la superficie irradiada) y oculares (lesiones de la córnea y la retina).

Los rayos infrarrojos de mayor longitud de onda pueden causar lesiones de origen térmico en la córnea. A medida que la longitud de onda disminuye, la radiación puede llegar hasta zonas más internas del ojo y causar daños en el cristalino (cataratas) y en la retina.

El ojo es un órgano con una capacidad de autoprotección frente a la luz visible muy elevada, no obstante, las radiaciones del IR próximo pueden alcanzar la retina, y los mecanismos de autodefensa no son eficaces en esta región del espectro.

En el caso de la radiación visible se presentan además una serie de efectos no fisiológicos como fatiga visual, dificultad de acomodación a la tarea, etc, relacionados con la iluminación del puesto de trabajo, que son objeto de estudio de la Ergonomía.

La radiación IR se utiliza industrialmente para calentar metales, secado de pinturas, deshidratación de telas, papel, etc. Dada la moderada peligrosidad de las radiaciones visible e IR no es común encontrar puestos de trabajo en los que las exposiciones constituyan un riesgo y, en todo caso, el uso de apantallamientos de las fuentes de luz, para evitar la visión directa, y de oculares de protección son los procedimientos más eficaces para reducir las exposiciones hasta límites seguros.

Finalmente, las microondas y ondas de radio tienen aplicaciones en el campo de las telecomunicaciones. Además, las microondas tienen una amplia aplicación como fuente de calor y se utilizan en soldadura, endurecimiento de resinas, operaciones de recocido, secado de materiales, etc. Las exposiciones laborales se pueden presentar en los trabajos relacionados con las telecomunicaciones y la defensa (instalación y mantenimiento de antenas emisoras o de radar), y la operación de hornos industriales de materiales.

Los efectos son de tipo térmico, aumentando la temperatura de órganos internos y no sólo superficialmente.

Por las características del proceso llevado a cabo en la planta, el único riesgo físico destacable de la misma es el ruido, fundamentalmente producido por los motores de las bombas centrífugas. No son de esperar riesgos de índole térmica ni, en absoluto, radiactiva.

#### MD.C9.4.4 Riesgo eléctrico

Aunque el número registrado de accidentes eléctricos es reducido, la probabilidad de que sean graves o mortales es elevada.

Es precisamente este hecho el que motiva un tratamiento cuando menos superficial del problema.

El riesgo eléctrico puede definirse como la posibilidad de circulación de una corriente eléctrica a través del cuerpo humano.

En general, para que exista la posibilidad de circulación de corriente eléctrica, es necesario que se verifiquen simultáneamente las siguientes condiciones:

- Existencia de un circuito eléctrico formado por elementos conductores.
- Posibilidad de cierre del circuito.
- Existencia de una diferencia de potencial.

Así, existirá la posibilidad de circulación de corriente eléctrica por el cuerpo humano cuando:

- Éste sea conductor.
- Forme parte de un circuito eléctrico.
- Exista entre los puntos de entrada y salida de la corriente eléctrica en el cuerpo una diferencia de potencial.

Se entiende por contacto directo el aquél que se produce de personas con partes activas de los materiales y equipos. Los elementos activos están concebidos para que por ellos circule la electricidad. Si se contactan, se recibirá descarga y se producirán daños.

Se entiende por contacto indirecto, el contacto de personas con masas puestas accidentalmente en tensión. Ocurre cuando una persona toca un elemento de la instalación por el que no debe circular electricidad, pero que debido a un fallo, está sometido a tensión.

Cuando se entra en contacto con ese elemento, la corriente se descarga a tierra circulando a través del cuerpo y se producen daños.

La corriente eléctrica circulando por el cuerpo humano puede causar daños por dos motivos:

- La corriente eléctrica altera los estímulos nerviosos, (a su vez corrientes eléctricas, de muy baja intensidad), que gobiernan el funcionamiento de los distintos órganos y aparatos del cuerpo. En especial, se producen contracciones involuntarias de los músculos (tétanos) que pueden afectar muy negativamente a dos funciones vitales para la supervivencia: la respiración y el ritmo cardíaco.
- La circulación de corriente a través del cuerpo humano produce, como en todo soporte material, un desprendimiento de calor, conocido como efecto Joule. Ello se traduce en quemaduras, que varían desde la afectación superficial en los puntos de entrada y salida de la corriente, hasta quemaduras profundas e incluso carbonización de tejidos.

Además, en el caso específico de la corriente continua, puede producirse la electrólisis de los fluidos corporales, en especial de la sangre. Esta electrólisis provoca la aparición de burbujas gaseosas en los vasos sanguíneos, que los obstruyen, (embolia).

Además de estos efectos, que están causados directamente por la circulación de la corriente eléctrica en el cuerpo humano, habitualmente aparecen en los accidentes eléctricos una serie de efectos indirectos: el contacto eléctrico provoca en muchas ocasiones un efecto de “choque” que despide a la persona (debido a la contracción involuntaria de los músculos), haciéndola caer y produciéndole otras lesiones indirectas (fracturas, golpes, etc.). En los casos en los que se produce una descarga en forma de arco eléctrico, éste viene acompañado por un fuerte destello que suele causar daños oculares y auditivos. Los efectos producidos en el cuerpo humano dependen fundamentalmente de 3 factores:

1. El tipo de corriente (alterna o continua): A igualdad de los demás factores, la corriente alterna es más dañina que la corriente continua. Dentro de la corriente alterna, la que causa más daños es precisamente la más habitual (50-60Hz).
2. La trayectoria de la corriente: No todo el cuerpo presenta igual resistencia eléctrica. Ésta es mayor en las extremidades y menor en el abdomen (fundamentalmente por la mayor vascularización). Ello se traduce en una mayor intensidad circulante cuando la trayectoria de la corriente es mano-pie (o viceversa) que pie-pie o mano-mano. Además hay que tener en cuenta que el corazón se encuentra en el lado izquierdo del cuerpo, por lo que aquellos contactos que impliquen el brazo izquierdo probablemente provoquen circulación eléctrica a través del corazón, con grave riesgo de fibrilación cardíaca e incluso parada.
3. La relación intensidad circulante-tiempo de paso: El ser humano puede estar sometido a un alto potencial eléctrico sin sufrir graves daños, siempre que sea pequeña la cantidad de corriente que circula por su cuerpo. Por el contrario, si circula una gran cantidad de carga eléctrica es muy probable que sufra daños. La intensidad se define como la cantidad de carga que circula por unidad de tiempo, lo que muestra claramente que el factor fundamental que se debe tener en cuenta para evitar daños por electricidad, es la relación entre la intensidad y el tiempo de paso.

Dentro del presente proyecto se prevén equipos eléctricos, como son la instrumentación de control o motores, así como líneas eléctricas que llevan la electricidad a los mismos, por lo tanto habrá que considerar el riesgo eléctrico.

---

#### MD.C9.4.5. Riesgo en la manipulación de máquinas y herramientas

Los riesgos derivados del empleo de máquinas y herramientas en los lugares de trabajo son debidos generalmente a la propia naturaleza de la máquina que se esté usando o al uso que se le esté dando a la misma.

Las lesiones más frecuentes suelen ser hematomas, fracturas, amputaciones, heridas, cortes y quemaduras. La ley de prevención de riesgos laborales en su artículo 41 dictamina que los fabricantes, importadores y suministradores de maquinaria, equipos, productos y útiles de trabajo tienen la obligación de asegurar que éstos no constituyen una fuente de peligro para el trabajador siempre que estén instalados y sean usados en las condiciones, formas y para los fines recomendados por ellos.

#### MD.C9.4.6. Riesgo en el almacenamiento de sustancias químicas

Se entiende por almacenamiento: el conjunto de recipientes de todo tipo que contengan o puedan contener productos químicos. Si están ubicados en el exterior, se considerará también el área que incluye los tanques y depósitos, sus cubetos de retención, las calles intermedias de circulación y separación, las tuberías de conexión y las zonas e instalaciones de carga, descarga y tránsito anexas.

La reglamentación española sobre almacenamiento de productos químicos está recogida en el R.D. 379/2001 y sus instrucciones técnicas complementarias MIE-APQ-1, MIE-APQ-2, MIE-APQ-3, MIE-APQ-4, MIE-APQ-5, MIE-APQ-6 y MIE-APQ-7.

Los riesgos potenciales de los almacenamientos son los siguientes:

- Explosión: química, física, BLEVE, etc.
- Incendio.
- Liberación de vapores y gases tóxicos.
- Derrames de producto.

- Reacciones violentas.

Como consecuencia de estos riesgos se podrán derivar:

- Lesiones personales
  - o Intoxicación: por inhalación, ingestión o contacto.
  - o Asfixia y sofocación.
  - o Quemaduras: por incendio, por contacto (sustancias corrosivas).
  - o Traumatismos: por explosión, por deslizamientos y caídas.
- Daños materiales a instalaciones y productos
  - o Contaminación de productos.
  - o Merma de productos.
  - o Solidificación de productos.
  - o Corrosión.
- Contaminación ambiental
  - o Fugas de gases y vapores.
  - o Derrames de líquidos y sólidos.
  - o Humos tóxicos por incendio.
  - o Consumo de ingentes cantidades de agua de extinción de incendios.

### **MD.C9.5. Medidas preventivas**

En este apartado se mencionarán las medidas que se aplicarán para minimizar cada uno de los riesgos considerados hasta este punto.

#### **MD.C9.5.1. Medidas preventivas para riesgo químico**

Las medidas genéricas que se adoptarán son las mostradas a continuación.

Para corrientes líquidas:

- 
- Creación y utilización de procedimientos de trabajo, controles técnicos y equipos y materiales que permitan en lo posible evitar o reducir al mínimo, cualquier escape o difusión al medio o cualquier contacto directo con el trabajador que suponga un riesgo para su seguridad o salud.
  - Instalación de respiraderos en los tanques de manera que se eviten acumulaciones de productos nocivos.
  - Uso de medidas de protección individuales para cada trabajador que pueda llegar a estar en contacto con sustancias nocivas.
  - Colocación de señales que indiquen el peligro que supone las sustancias presentes, ya sea circulando por una tubería o almacenada en un tanque.
  - Manipulación de las sustancias nocivas únicamente por personal cualificado.

Para corrientes gaseosas:

- Reducir al mínimo posible cualquier escape o fuga que pueda originarse en las líneas de proceso.
- Uso de equipos de respiración autónoma en el caso de estar realizando operaciones de mantenimiento en el proceso.
- Evitar la presencia de fuentes de ignición en las zonas con mayor riesgo de fuga, en particular, durante la realización de trabajos en caliente, (soldaduras por ejemplo).

Sin perjuicio de las anteriores, debe señalarse que el butadieno y el furfural son sustancias sospechosas de producir cáncer. La manipulación de muestras de campo, limpieza de equipos y demás actividades que expongan a los operarios a concentraciones elevadas en aire de estas sustancias, obligará a establecer un protocolo específico de actuación.

### MD.C9.5.2. Medidas preventivas para minimizar el riesgo de explosión e incendio

Las principales medidas que deberán observarse para evitar estos riesgos son:

- Impedir y evitar en la medida de lo posible, la presencia de atmósferas explosivas, así como el contacto de los mismos con aquellos compuestos con los que se podría provocar una reacción violenta que lleve a una consecuente explosión. Esto se llevará a término mediante los convenientes sistemas de seguridad presentes en la planta, (válvulas de seguridad con disco de ruptura que descarguen a la red de antorchas).
- Situar las unidades de operación a una distancia de seguridad entre ellas. Un esbozo de esta medida se ha practicado en el capítulo quinto de la presente memoria descriptiva.
- En caso de derrame o fuga de los líquidos del proceso, se eliminará toda fuente de ignición y se procederá a recoger en la medida de lo posible el líquido derramado, introduciéndolo en recipientes herméticos. El sobrante se absorberá en arena, u otro elemento absorbente inerte, para proceder a su gestión como residuo.
- Se comprobará para cada equipo instalado que es segura su utilización en presencia de atmosferas explosivas.
- Se dispondrá de señales acústicas y luminosas que alerten a los trabajadores de un posible riesgo de explosión, para que se proceda a su evacuación hasta lugar seguro, (la Refinería cuenta con un sistema de megafonía dedicado a tales menesteres).
- Se creará un plan de emergencias y evacuación que permita desarrollar el proceso con la máxima seguridad y el mínimo riesgo para la salud de los trabajadores. Adicionalmente se formará a los trabajadores en los riesgos

específicos de la planta proyectada, y se realizarán simulacros frecuentes de actuación frente a alarmas de distinto nivel.

En el caso de que se haya producido un incendio se emplearán los siguientes sistemas de acuerdo con el RD 2267/2004 de 3 de diciembre, por el que se aprueba el reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales:

- Extintores: Estarán distribuidos a lo largo de la planta en número suficiente para que el recorrido real desde cualquier origen de evacuación hasta un extintor no supere los 15 metros de distancia.
- Pulsadores de alarma de incendios: Se dispondrá un pulsador junto a cada salida del área de incendios, de forma que la distancia máxima que separe cualquier punto de un pulsador, no exceda los 25 metros.
- Sistema de alarmas: se diseñan de forma que la señal acústica transmitida por el sistema de comunicación de alarma permita diferenciar el grado de emergencia de la alarma.
- Instalación de tomas de aguas contra incendios: Se localizarán de forma que la zona protegida por cada una sea la cubierta por un radio de 40 metros, medidos horizontalmente desde el emplazamiento de la misma.
- El caudal requerido y la autonomía del punto, será de 3500 litros por minuto y 90 minutos respectivamente. La presión mínima de salida del agua será de 5 bares cuando se descargue el caudal máximo.

#### MD.C9.5.3. Medidas preventivas para minimizar riesgos físicos

Para evitar en la medida de lo posible los riesgos debidos al ruido se adoptarán las siguientes medidas:

- Aislar acústicamente la fuente del ruido.

- Llevar a cabo un mantenimiento de óptimo de aquellas unidades generadoras de ruido, prestando especial atención a aquéllas cuyo ruido se aleje de lo habitual.
- Uso por parte del personal de trabajo de protecciones auditivas en las zonas con mayor índice de ruido.
- Realizar rotaciones del personal para reducir el tiempo de exposición a los ruidos.

#### MD.C9.5.4. Medidas preventivas para minimizar el riesgo eléctrico

Para evitar en la medida de lo posible el riesgo eléctrico se adoptarán las siguientes medidas:

- Restricción de paso a personal no autorizado en las subestaciones eléctricas.
- Aislamiento eléctrico de las partes activas de los equipos, máquinas y herramientas.
- Desconexión de la red eléctrica de cualquier equipo sobre el que se vaya a realizar una tarea. Conexión a tierra de los elementos metálicos para derivar cualquier corriente residual a tierra.
- Comprobación de ausencia de tensión antes de realizar un trabajo sobre un equipo.
- Disposición de elementos de seguridad tales como diferenciales de intensidad o magnetotérmicos que permitan cortar el suministro de la corriente en caso de que aumente de forma elevada la intensidad de corriente que circula por el sistema.

#### MD.C9.5.5. Medidas preventivas para minimizar el riesgo en la manipulación de máquinas y herramientas

Las medidas que se adoptarán son las siguientes:

- Se proveerá de un manual de uso correcto de cada máquina o herramienta.

- 
- Cada trabajador dispondrá según su especialidad de las herramientas y máquinas que requiera para el correcto desempeño de su trabajo.
  - Se elaborará un inventario de las herramientas y máquinas disponibles en el que figurará el estado en que se encuentran.
  - Las máquinas solo podrán ser usadas por personal cualificado para ello.
  - La reparación de las máquinas o herramientas se llevará a término en un taller de mantenimiento.
  - Las zonas de trabajo con maquinaria estarán perfectamente iluminadas para el correcto desempeño del trabajo que se esté llevando a cabo.

#### MD.C9.5.6. Medidas preventivas para minimizar el riesgo en el almacenamiento de sustancias químicas

Las medidas que se adoptarán son las citadas a continuación.

- Se dispondrá de señalización normalizada en el almacenamiento y en las conducciones de la planta, indicando con claridad el fluido que circula por su interior.
- La zona de almacenamiento estará convenientemente iluminada.
- La zona de tanques quedará dentro de un cubeto que evite derrames en caso de fisuras en un tanque.
- Los tanques llevarán integrado un sistema de venteo.
- Se prevendrán las reacciones de oxidación y polimerización en “palomita de maíz” del butadieno, eliminando la presencia de aire en el tanque esférico.
- Se prevendrá también el contacto del extractante con el aire, puesto que sufre reacciones de descomposición.

Se presentan seguidamente las Fichas de Seguridad, (FDS), de las sustancias involucradas en el presente PFC, tomadas de INSHT.

**BUTA-1,3-DIENO**

**ICSC: 0017**

Abril 2000

CAS: 106-99-0 Divinilo  
 RTECS: EI9275000 Viniletileno  
 NU: 1010 (estabilizado)  $C_4H_6 / CH_2=(CH)_2=CH_2$   
 CE Índice Anexo I: 601-013-00-X Masa molecular: 54.1  
 CE / EINECS: 203-450-8



TIPO DE PELIGRO / EXPOSICIÓN	PELIGROS AGUDOS / SÍNTOMAS	PREVENCIÓN	PRIMEROS AUXILIOS / LUCHA CONTRA INCENDIOS
<b>INCENDIO</b>	Extremadamente inflamable.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar.	Cortar el suministro; si no es posible y no existe riesgo para el entorno próximo, dejar que el incendio se extinga por sí mismo; en otros casos apagar con agua pulverizada, polvo, o dióxido de carbono.
<b>EXPLOSIÓN</b>	Las mezclas gas/aire son explosivas.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión. Evitar la generación de cargas electrostáticas (por ejemplo, mediante conexión a tierra) si aparece en estado líquido.	En caso de incendio: mantener fría la botella rociando con agua.
<b>EXPOSICIÓN</b>		<b>¡EVITAR TODO CONTACTO! ¡EVITAR LA EXPOSICIÓN DE MUJERES (EMBARAZADAS)!</b>	
<b>Inhalación</b>	Tos. Dolor de garganta. Vértigo. Dolor de cabeza. Somnolencia. Sudoración. Visión borrosa. Náuseas. Pérdida del conocimiento.	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo. Proporcionar asistencia médica.
<b>Piel</b>	EN CONTACTO CON LÍQUIDO: CONGELACION.	Guantes aislantes del frío.	EN CASO DE CONGELACION: aclarar con agua abundante, NO quitar la ropa. Proporcionar asistencia médica.
<b>Ojos</b>	Enrojecimiento. Dolor. Visión borrosa. Véase Piel.	Gafas ajustadas de seguridad,	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica.
<b>Ingestión</b>		No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo.	

DERRAMES Y FUGAS	ENVASADO Y ETIQUETADO
Evacuar la zona de peligro. Consultar a un experto. Ventilar. NO verter NUNCA chorros de agua sobre el líquido. Eliminar toda fuente de ignición. Traje de protección química, incluyendo equipo autónomo de respiración.	No transportar con alimentos y piensos. Clasificación UE Símbolo: F+, T R: 45-46-12 S: 53-45 Nota: D Clasificación NU Clasificación de Peligros NU: 2.1
RESPUESTA DE EMERGENCIA	ALMACENAMIENTO
Ficha de emergencia de transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-20S1010 Código NFPA: H 2; F 4; R 2;	A prueba de incendio. Mantener en lugar fresco. Separado de alimentos y piensos.

**IPCS**  
 International Programme on Chemical Safety

Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión Europea © CE, IPCS, 2005



BUTA-1,3-DIENO

ICSC: 0017

## DATOS IMPORTANTES

## ESTADO FÍSICO; ASPECTO

Gas licuado comprimido incoloro, o de olor característico.

## PELIGROS FÍSICOS

El gas es más denso que el aire y puede extenderse a ras del suelo; posible ignición en punto distante. Como resultado del flujo, agitación, etc., se pueden generar cargas electrostáticas. Los vapores están no estabilizados y pueden formar polímeros en válvulas o cortallamas de tanques de almacenamiento, bloqueando las válvulas.

## PELIGROS QUÍMICOS

La sustancia puede formar peróxidos en circunstancias específicas, (contacto con el aire) iniciando una polimerización explosiva. La sustancia puede polimerizar debido al calentamiento suave con peligro de incendio o explosión. Se forman compuestos inestables frente al choque con cobre y sus aleaciones (véanse notas). La sustancia se descompone de forma explosiva al calentarla rápidamente bajo presión. Reacciona violentamente con oxidantes y muchas otras sustancias, originando peligro de incendio y explosión.

## LÍMITES DE EXPOSICIÓN

TLV: (como TWA) 2 ppm; A2 (ACGIH 2004).  
MAK: Cancerígeno: categoría 1, Mutágeno: categoría 2 (DFG 2004).

## VÍAS DE EXPOSICIÓN

La sustancia se puede absorber por inhalación.

## RIESGO DE INHALACIÓN

Al producirse una pérdida de gas se alcanza muy rápidamente una concentración nociva de éste en el aire.

## EFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN

La sustancia irrita los ojos y el tracto respiratorio. La evaporación rápida del líquido puede producir congelación. La sustancia puede causar efectos en el sistema nervioso central, dando lugar a disminución del estado de alerta.

## EFECTOS DE EXPOSICIÓN PROLONGADA O REPETIDA

La sustancia puede afectar a la médula ósea, dando lugar a leucemia. Esta sustancia es probablemente carcinógena para los seres humanos. Puede originar lesión genética de carácter hereditario en los seres humanos. La experimentación animal muestra que esta sustancia posiblemente cause efectos tóxicos en la reproducción humana.

## PROPIEDADES FÍSICAS

Punto de ebullición: -4°C  
Punto de fusión: -109°C  
Densidad relativa (agua = 1): 0.6  
Solubilidad en agua: ninguna (0.1 g/100 ml)  
Presión de vapor, kPa a 20°C: 245  
Densidad relativa de vapor (aire = 1): 1.9

Punto de inflamación: -76°C  
Temperatura de autoignición: 414°C  
Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 1.1-16.3  
Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: 1.99

## DATOS AMBIENTALES

## NOTAS

El material de conducción de este gas no debe contener más del 63% de cobre. El consumo de bebidas alcohólicas aumenta el efecto nocivo. La alerta por el olor es insuficiente. Esta ficha ha sido parcialmente actualizada en abril de 2005: ver Límites de exposición y Clasificación UE.

## INFORMACIÓN ADICIONAL

Límites de exposición profesional (INSHT 2011):

VLA-ED: 2 ppm; 4,5 mg/m<sup>3</sup>

C1A (Sustancia carcinogénica de categoría 1A). M1B (Sustancia mutagénica de categoría 1B).

Notas: Esta sustancia tiene establecidas restricciones a la fabricación, comercialización o al uso especificadas en el Reglamento REACH.

VLB: 2,5 mg/L en orina de ácido 1,2-dihidroxiutilmercaptúrico; notas S, F. 2,5 pmol/g Hb en sangre de mezcla de 1-N y 2-N-(hidroxibutenil) valina aductos de hemoglobina; nota S.

## NOTA LEGAL

Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. Su posible uso no es responsabilidad de la CE, el IPCS, sus representantes o el INSHT, autor de la versión española.

## 2-FURALDEHIDO

ICSC: 0276



2-FURALDEHIDO  
Furfural  
2-Furancarboxialdehído  
C<sub>4</sub>H<sub>3</sub>OCHO  
Masa molecular: 96.1

Nº CAS 98-01-1  
Nº RTECS LT7000000  
Nº ICSC 0276  
Nº NU 1199  
Nº CE 605-010-00-4



TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION	PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS	PREVENCION	PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS
<b>INCENDIO</b>	Combustible.	Evitar las llamas.	Polvo, espuma resistente al alcohol, agua pulverizada, dióxido de carbono.
<b>EXPLOSION</b>	Por encima de 60°C: pueden formarse mezclas explosivas vapor/ aire.	Por encima de 60°C: sistema cerrado, ventilación y equipo eléctrico a prueba de explosiones.	
<b>EXPOSICION</b>			
• <b>INHALACION</b>	Tos, dolor de cabeza, dificultad respiratoria, jadeo, dolor de garganta.	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo y proporcionar asistencia médica.
• <b>PIEL</b>	¡PUEDE ABSORBERSE! Enrojecimiento, dolor.	Traje de protección.	Quitar las ropas contaminadas, aclarar la piel con agua abundante o ducharse y proporcionar asistencia médica.
• <b>OJOS</b>	Enrojecimiento, dolor.	Pantalla facial.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad) y proporcionar asistencia médica.
• <b>INGESTION</b>	Dolor abdominal, diarrea, dolor de cabeza, dolor de garganta, vómitos.	No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo.	Enjuagar la boca, dar a beber agua abundante y proporcionar asistencia médica.

DERRAMAS Y FUGAS	ALMACENAMIENTO	ENVASADO Y ETIQUETADO
Recoger el líquido procedente de la fuga en recipientes herméticos, absorber el líquido residual en arena o absorbente inerte y trasladarlo a un lugar seguro. (Protección personal adicional: equipo autónomo de respiración).	Separado de bases fuertes, ácidos fuertes, oxidantes fuertes. Mantener en la oscuridad y bien cerrado. Ventilación a ras del suelo.	símbolo T R: 21-23/25-36/37-40 S: (1/2-)26-36/37/39-45 Clasificación de Peligros NU: 3 Grupo de Envasado NU: III CE: 

**VEASE AL DORSO INFORMACION IMPORTANTE**

ICSC: 0276

Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión de las Comunidades Europeas © CCE, IPCS, 1994

## 2-FURALDEHIDO

ICSC: 0276

<b>D A T O S  I M P O R T A N T E S</b>	<p><b>ESTADO FISICO; ASPECTO</b> Líquido entre incoloro y amarillo, de olor característico. Vira a rojo-marrón por exposición al aire y a la luz.</p> <p><b>PELIGROS FISICOS</b> El vapor es más denso que el aire.</p> <p><b>PELIGROS QUIMICOS</b> La sustancia polimeriza bajo la influencia de ácidos o bases, con peligro de incendio o explosión. Reacciona violentamente con oxidantes. Ataca a muchos plásticos.</p> <p><b>LIMITES DE EXPOSICION</b> TLV (como TWA): 2 ppm; 7.9 mg/m<sup>3</sup> (piel) (ACGIH 1993-1994).</p>	<p><b>VIAS DE EXPOSICION</b> La sustancia se puede absorber por inhalación, a través de la piel y por ingestión.</p> <p><b>RIESGO DE INHALACION</b></p> <p><b>EFFECTOS DE EXPOSICION DE CORTA DURACION</b> La sustancia irrita los ojos, la piel y el tracto respiratorio.</p> <p><b>EFFECTOS DE EXPOSICION PROLONGADA O REPETIDA</b> El líquido desengrasa la piel. La sustancia puede afectar al hígado.</p>
---	---	--

<b>PROPIEDADES FISICAS</b>	<p>Punto de ebullición: 162°C Punto de fusión: -36.5°C Densidad relativa (agua = 1): 1.16 Solubilidad en agua, g/100 ml a 20°C: 8.3 Presión de vapor, kPa a 20°C: 0.144</p>	<p>Densidad relativa de vapor (aire = 1): 3.31 Punto de inflamación: 60°C (c.c.) Temperatura de autoignición: 315°C Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 2.1-19.3 Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: 0.41</p>
----------------------------	---	---

<b>DATOS AMBIENTALES</b>	<p>Esta sustancia puede ser peligrosa para el ambiente; debería prestarse atención especial a los organismos acuáticos.</p>	
--------------------------	---	---

**NOTAS**

<p>La alerta por el olor es insuficiente.</p>	<p>Ficha de emergencia de transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-84 Código NFPA: H 2; F 2; R 0;</p>
---	---

**INFORMACION ADICIONAL**

<p>FISQ: 3-124 2-FURALDEHIDO</p>	
----------------------------------	--

<p><b>ICSC: 0276</b></p>	<p>© CCE, IPCS, 1994</p>	<p><b>2-FURALDEHIDO</b></p>
--------------------------	--------------------------	-----------------------------

<b>NOTA LEGAL IMPORTANTE:</b>	<p>Ni la CCE ni la IPCS ni sus representantes son responsables del posible uso de esta información. Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. La versión española incluye el etiquetado asignado por la clasificación europea, actualizado a la vigésima adaptación de la Directiva 67/548/CEE traspuesta a la legislación española por el Real Decreto 363/95 (BOE 5.6.95).</p>
-------------------------------	---

# Fichas Internacionales de Seguridad Química

**BUT-1-ENO**

ICSC: 0396



BUT-1-ENO  
 n-Buteno  
 1-Buteno  
 1-Butileno  
 (botella)  
 $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}=\text{CH}_2$   
 Masa molecular: 56.1

Nº CAS 106-98-9  
 Nº RTECS EM2893000  
 Nº ICSC 0396  
 Nº NU 1012  
 Nº CE: 601-012-00-4



TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION	PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS	PREVENCION	PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS
<b>INCENDIO</b>	Gas inflamable.	Evitar llama abierta, NO producir chispas y NO fumar.	Polvos, dióxido de carbono. Cortar el suministro; si no es posible y no existe riesgo para el entorno próximo, deje que el incendio se extinga por sí mismo.
<b>EXPLOSION</b>	Las mezclas gas/aire son explosivas.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosiones.	En caso de incendio: mantener fría la botella por pulverización con agua. Los bomberos deberían emplear indumentaria completa de protección incluyendo equipo autónomo de respiración.
<b>EXPOSICION</b>			
• <b>INHALACION</b>	Vértigo, dificultad respiratoria.	Ventilación.	Aire limpio, reposo, respiración artificial si estuviera indicado y someter a atención médica.
• <b>PIEL</b>	EN CONTACTO CON LIQUIDO: CONGELACION.		EN CASO DE CONGELACION: Aclarar con agua abundante, NO quitar la ropa y solicitar atención médica.
• <b>OJOS</b>	EN CONTACTO CON EL LIQUIDO: CONGELACION		Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después consultar a un médico.
• <b>INGESTION</b>		No comer, beber ni fumar durante el trabajo.	

DERRAMAS Y FUGAS	ALMACENAMIENTO	ENVASADO Y ETIQUETADO
------------------	----------------	-----------------------

Evacuar la zona de peligro, consultar a un experto. Ventilación. Retirar todas las fuentes de ignición. (Protección personal adicional: traje de protección completa incluyendo equipo autónomo de respiración).

A prueba de incendio. Almacenar al aire libre o en edificio bien ventilado. Separado de oxidantes fuertes. Mantener en lugar frío.

símbolo F+  
R: 12  
S: (2-)9-16-33  
Nota: C  
Clasificación de Peligros NU: 2  
Riesgos Subsidiarios NU: 3  
CE:



**VEASE AL DORSO INFORMACION IMPORTANTE**

ICSC: 0396

Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión de las Comunidades Europeas © CCE, IPCS, 1994

## Fichas Internacionales de Seguridad Química

**BUT-1-ENO**

ICSC: 0396

D  
A  
T  
O  
S  
I  
M  
P  
O  
R  
T  
A  
N  
T  
E  
S

**ESTADO FISICO; ASPECTO**

Gas licuado comprimido, incoloro e inodoro.

**PELIGROS FISICOS**

El gas es más denso que el aire y puede extenderse a ras del suelo; posible ignición en punto distante.

**PELIGROS QUIMICOS**

La sustancia puede polimerizarse. Puede estallar por calentamiento intenso. Reacciona violentamente con oxígeno y oxidantes, originando riesgo de incendio y explosión.

**LIMITES DE EXPOSICION**

TLV no establecido.  
MAK no establecido.

**VIAS DE EXPOSICION**

La sustancia se puede absorber por inhalación.

**RIESGO DE INHALACION**

Al producirse pérdidas en zonas confinadas este gas puede originar asfixia por disminución del contenido de oxígeno del aire.

**EFFECTOS DE EXPOSICION DE CORTA DURACION**

El líquido puede producir congelación. La exposición a concentraciones extremadamente altas podría causar disminución de la consciencia.

**EFFECTOS DE EXPOSICION PROLONGADA O REPETIDA**

**PROPIEDADES FISICAS**

Punto de ebullición: -6°C  
Punto de fusión: -185°C  
Densidad relativa (agua = 1): 0.595 at 20°C (líquido)  
Solubilidad en agua: Ninguna

Densidad relativa de vapor (aire = 1): 1.9  
Punto de inflamación: gas inflamable  
Temperatura de autoignición: 371-385°C  
Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 1.6-10.0

**DATOS AMBIENTALES**

**NOTAS**

Altas concentraciones en el aire producen una deficiencia de oxígeno con riesgo de pérdida de conocimiento o muerte.

Ficha de emergencia de transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-500  
Código NFPA: H 1; F 4; R 0;

**INFORMACION ADICIONAL**

FISQ: 2-032  
BUT-1-ENO

**ICSC: 0396**

**BUT-1-ENO**

© CCE, IPCS, 1994

**NOTA LEGAL  
IMPORTANTE:**

Ni la CCE ni la IPCS ni sus representantes son responsables del posible uso de esta información. Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. La versión española incluye el etiquetado asignado por la clasificación europea, actualizado a la vigésima adaptación de la Directiva 67/548/CEE traspuesta a la legislación española por el Real Decreto 363/95 (BOE 5.6.95).

© INSHT

# Fichas Internacionales de Seguridad Química

**(Z)-BUT-2-ENO**

ICSC: 0397



(Z)-BUT-2-ENO  
 cis-2-Buteno  
 cis-dimetiletileno  
 cis-2-butileno  
 botella  
 $C_4H_8/CH_3-HC=CH-CH_3$   
 Masa molecular: 56.1

Nº CAS 590-18-1  
 Nº RTECS EM2890500  
 Nº ICSC 0397  
 Nº NU 1012  
 Nº CE 601-012-00-4



TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION	PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS	PREVENCION	PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS
<b>INCENDIO</b>	Gas inflamable.	Evitar llama abierta, NO producir chispas y NO fumar.	Polvos, dióxido de carbono. Cortar el suministro; si no es posible y no existe riesgo para el entorno próximo, deje que el incendio se extinga por sí mismo.
<b>EXPLOSION</b>	Las mezclas gas/aire son explosivas. Riesgo de incendio y explosión como resultado de un calentamiento intenso de las botellas.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosiones. Evitar la generación de cargas electrostáticas (por ejemplo, mediante conexión a tierra). Utilícense herramientas manuales de no generación de chispas. Dispositivo antiretorno de llama desde el quemador a la botella.	En caso de incendio: mantener fría la botella por pulverización con agua. Los bomberos deberían emplear indumentaria de protección completa incluyendo equipo autónomo de respiración.
<b>EXPOSICION</b>			
• <b>INHALACION</b>	Vértigo, pérdida de conocimiento.	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo y someter a atención médica.
• <b>PIEL</b>	EN CONTACTO CON LIQUIDO: CONGELACION.	Guantes aislantes del frío.	EN CASO DE CONGELACION: Aclarar con agua abundante, NO quitar la ropa y solicitar atención médica.
• <b>OJOS</b>	(Véase piel).	Pantalla facial.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después consultar a un médico.
• <b>INGESTION</b>			

**DERRAMAS Y FUGAS**

**ALMACENAMIENTO**

**ENVASADO Y ETIQUETADO**

Evacuar la zona de peligro, consultar a un experto. Ventilación. (Protección personal adicional: traje de protección completa incluyendo equipo autónomo de respiración).

Almacenar al aire libre o en edificio bien ventilado. Separado de oxidantes fuertes. Mantener en lugar frío.

símbolo F+  
R: 12  
S: (2-)9-16-33  
Nota: C  
Clasificación de Peligros NU: 2  
Riesgos Subsidiarios NU: 3  
CE:



**VEASE AL DORSO INFORMACION IMPORTANTE**

ICSC: 0397

Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión de las Comunidades Europeas © CCE, IPCS, 1994

## Fichas Internacionales de Seguridad Química

### (Z)-BUT-2-ENO

ICSC: 0397

D  
A  
T  
O  
S  
I  
M  
P  
O  
R  
T  
A  
N  
T  
E  
S

**ESTADO FISICO; ASPECTO**

Gas licuado comprimido, incoloro.

**PELIGROS FISICOS**

El gas es más denso que el aire y puede extenderse a ras del suelo; posible ignición en punto distante y puede acumularse en los lugares excavados produciendo una deficiencia de oxígeno. Como resultado del flujo, agitación, etc., se pueden generar cargas electrostáticas.

**PELIGROS QUIMICOS**

**LIMITES DE EXPOSICION**

TLV no establecido.  
PDK: 100 mg/m<sup>3</sup> (URSS 1971).

**VIAS DE EXPOSICION**

La sustancia se puede absorber por inhalación.

**RIESGO DE INHALACION**

Al producirse pérdidas en zonas confinadas este líquido se evapora muy rápidamente originando una saturación total del aire con grave riesgo de asfixia.

**EFFECTOS DE EXPOSICION DE CORTA DURACION**

La evaporación rápida del líquido puede producir congelación. La exposición puede producir pérdida de conocimiento.

**EFFECTOS DE EXPOSICION PROLONGADA O REPETIDA**

**PROPIEDADES FISICAS**

Punto de ebullición: 3.7°C  
Punto de ebullición a 101 kPa: 3.7°C  
Punto de fusión: -139°C  
Densidad relativa (agua = 1): 0.62  
Presión de vapor, kPa a 21°C: 188

Densidad relativa de vapor (aire = 1): 1.94  
Punto de inflamación: gas inflamable  
Temperatura de autoignición: 324°C  
Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 1.7%-9%

**DATOS AMBIENTALES**

**NOTAS**

Altas concentraciones en el aire producen una deficiencia de oxígeno con riesgo de pérdida de conocimiento o muerte. Comprobar el contenido de oxígeno antes de entrar en la zona. Aplicar también las recomendaciones de esta ficha a trans-2-buteno.

Ficha de emergencia de transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-500  
Código NFPA: H 1; F 4; R 1;

**INFORMACION ADICIONAL**

FISQ: 2-034  
(Z)-BUT-2-ENO

**ICSC: 0397**

**(Z)-BUT-2-ENO**

© CCE, IPCS, 1994

**NOTA LEGAL  
IMPORTANTE:**

Ni la CCE ni la IPCS ni sus representantes son responsables del posible uso de esta información. Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. La versión española incluye el etiquetado asignado por la clasificación europea, actualizado a la vigésima adaptación de la Directiva 67/548/CEE traspuesta a la legislación española por el Real Decreto 363/95 (BOE 5.6.95).

© INSHT

# Fichas Internacionales de Seguridad Química

## BUTANO (gas licuado)

ICSC: 0232



n-Butano (gas licuado)



Masa molecular: 58.1  
(licuado)  
(botella)

Nº ICSC 0232  
Nº CAS 106-97-8  
Nº RTECS EJ4200000  
Nº NU 1011  
Nº CE 601-004-00-0



TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION	PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS	PREVENCION	PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS
<b>INCENDIO</b>	Extremadamente inflamable.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar.	Cortar el suministro; si no es posible y no existe riesgo para el entorno próximo, dejar que el incendio se extinga por sí mismo; en otros casos apagar con polvo, dióxido de carbono.
<b>EXPLOSION</b>	Las mezclas gas/aire son explosivas.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión. Evitar la generación de cargas electrostáticas (por ejemplo, mediante conexión a tierra) si aparece en estado líquido. Utilícense herramientas manuales no generadoras de chispas.	En caso de incendio: mantener fría la botella rociando con agua. Combatir el incendio desde un lugar protegido.
<b>EXPOSICION</b>			
• <b>INHALACION</b>	Somnolencia. Pérdida del conocimiento.	Sistema cerrado y ventilación.	Aire limpio, reposo. Respiración artificial si estuviera indicada. Proporcionar asistencia médica.
• <b>PIEL</b>	EN CONTACTO CON LIQUIDO: CONGELACION.	Guantes aislantes del frío. Traje de protección.	EN CASO DE CONGELACION: aclarar con agua abundante, NO quitar la ropa. Proporcionar asistencia médica.
• <b>OJOS</b>	EN CONTACTO CON LIQUIDO: CONGELACION.	Pantalla facial.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica.
• <b>INGESTION</b>			

**DERRAMES Y FUGAS**

**ALMACENAMIENTO**

**ENVASADO Y ETIQUETADO**

Evacuar la zona de peligro. Consultar a un experto. Eliminar toda fuente de ignición  
Ventilar. NO verter NUNCA chorros de agua sobre el líquido. (Protección personal adicional: equipo autónomo de respiración).

A prueba de incendio. Mantener en lugar fresco.

Nu (transporte): Ver pictogramas en cabecera.  
Clasificación de Peligros NU: 2.1  
CE:  
Nota: C  
símbolo F+  
R: 12  
S: 2-9-16-33



VEASE AL DORSO INFORMACION IMPORTANTE

ICSC: 0232

Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión Europea © CE, IPCS, 2003

## Fichas Internacionales de Seguridad Química

### BUTANO (gas licuado)

ICSC: 0232

D  
A  
T  
O  
S  
I  
M  
P  
O  
R  
T  
A  
N  
T  
E  
S

#### ESTADO FISICO: ASPECTO:

Gas licuado comprimido inodoro, incoloro.

#### PELIGROS FISICOS:

El gas es más denso que el aire y puede extenderse a ras del suelo; posible ignición en punto distante. Puede acumularse en las zonas más bajas produciendo una deficiencia de oxígeno. Como resultado del flujo, agitación, etc., se pueden generar cargas electrostáticas.

#### LIMITES DE EXPOSICION:

TLV: 800 ppm como TWA; (ACGIH 2003).  
MAK: 1000 ppm, 2400 mg/m<sup>3</sup>;  
Categoría de limitación de pico: II(4); IIc: No clasificado en cuanto a riesgo para el embarazo. (DFG 2003).

#### VIAS DE EXPOSICION:

La sustancia se puede absorber por inhalación.

#### RIESGO DE INHALACION:

Al producirse pérdidas en zonas confinadas, este líquido se evapora muy rápidamente originando una saturación total del aire con grave riesgo de asfixia.

#### EFFECTOS DE EXPOSICION DE CORTA DURACION:

La evaporación rápida del líquido puede producir congelación. La sustancia puede afectar al sistema nervioso central.

#### PROPIEDADES FISICAS

Punto de ebullición: -0.5°C  
Punto de fusión: -138°C  
Densidad relativa (agua = 1): 0.6  
Solubilidad en agua, g/100 ml a 20°C: 0.0061  
Presión de vapor, kPa a 21.1°C: 213.7  
Densidad relativa de vapor (aire = 1): 2.1

Punto de inflamación: -60°C  
Temperatura de autoignición: 287°C  
Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 1.8-8.4  
Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: 2.89

#### DATOS AMBIENTALES

### NOTAS

Comprobar el contenido de oxígeno antes de entrar en la zona. Con el fin de evitar la fuga de gas en estado líquido, girar la botella que tenga un escape manteniendo arriba el punto de escape. La información excepto propiedades físicas también pueden aplicarse para el Isobutano (CAS 75-28-5). Altas concentraciones en el aire producen una deficiencia de oxígeno con riesgo de pérdida de conocimiento o muerte.

Ficha de emergencia de transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-20S1011  
Código NFPA: H 1; F 4; R 0;

## INFORMACION ADICIONAL

Los valores LEP pueden consultarse en línea en la siguiente dirección: <http://www.mtas.es/insht/practice/vlas.htm>

Última revisión IPCS: 2003  
Traducción al español y actualización de valores límite y etiquetado:  
2003  
FISQ: 1-046

**ICSC: 0232**

**BUTANO (gas licuado)**

© CE, IPCS, 2003

### **NOTA LEGAL IMPORTANTE:**

Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. Su posible uso no es responsabilidad de la CE, el IPCS, sus representantes o el INSHT, autor de la versión española.

# Fichas Internacionales de Seguridad Química

<b>ISOBUTANO</b>		<b>ICSC: 0901</b>	
		<b>Noviembre 1998</b>	
	2-Metilpropano	1,1-Dimetiletano	Trimetilmetano
<b>CAS:</b>	75-28-5	<b>C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> / (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>CHCH<sub>3</sub></b>	
<b>RTECS:</b>	TZ4300000	<b>Masa molecular: 58.1</b>	
<b>NU:</b>	1969		
<b>CE Índice Anexo I:</b>	601-004-00-0		
<b>CE / EINECS:</b>	200-857-2		

TIPO DE PELIGRO / EXPOSICIÓN	PELIGROS AGUDOS / SÍNTOMAS	PREVENCIÓN	PRIMEROS AUXILIOS / LUCHA CONTRA INCENDIOS
<b>INCENDIO</b>	Extremadamente inflamable.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar.	Cortar el suministro; si no es posible y no existe riesgo para el entorno próximo, dejar que el incendio se extinga por sí mismo; en otros casos apagar con agua pulverizada.
<b>EXPLOSIÓN</b>	Las mezclas gas/aire son explosivas.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión. Evitar la generación de cargas electrostáticas (por ejemplo, mediante conexión a tierra) si está en estado líquido.	En caso de incendio: mantener fría la botella rociando con agua. Combatir el incendio desde un lugar protegido.

EXPOSICIÓN			
<b>Inhalación</b>	Jadeo. Asfixia.	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo. Proporcionar asistencia médica.
<b>Piel</b>	EN CONTACTO CON LIQUIDO: CONGELACION.	Guantes aislantes del frío. Traje de protección.	EN CASO DE CONGELACION: aclarar con agua abundante, NO quitar la ropa. Proporcionar asistencia médica.
<b>Ojos</b>		Gafas ajustadas de seguridad, pantalla facial.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica.
<b>Ingestión</b>		No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo.	

DERRAMES Y FUGAS	ENVASADO Y ETIQUETADO
Evacuar la zona de peligro. Consultar a un experto. Ventilar. Protección personal: filtro para gases y vapores orgánicos de bajo punto de ebullición adaptado a la concentración de la sustancia en el aire. Eliminar toda fuente de ignición NO verter NUNCA chorros de agua sobre el líquido.	Nota: C <b>Clasificación UE</b> Símbolo: F+ R: 12; S: (2-)9-16 <b>Clasificación NU</b> Clasificación de Peligros NU: 2.1
RESPUESTA DE EMERGENCIA	ALMACENAMIENTO
Ficha de emergencia de transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-501 Código NFPA: H 1; F 4; R 0;	A prueba de incendio. Mantener en lugar fresco.

**IPCS**  
International Programme on Chemical Safety









MINISTERIO DE TRABAJO E INMIGRACIÓN



INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO

Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión Europea © IPCS, CE 2005

**VÉASE INFORMACIÓN IMPORTANTE AL DORSO**

# Fichas Internacionales de Seguridad Química

**ISOBUTANO****ICSC: 0901**

## DATOS IMPORTANTES

**ESTADO FÍSICO; ASPECTO:**

Gas licuado comprimido incoloro, de olor característico.

**PELIGROS FÍSICOS:**

El gas es más denso que el aire y puede extenderse a ras del suelo; posible ignición en punto distante. Como resultado del flujo, agitación, etc., se pueden generar cargas electrostáticas.

**PELIGROS QUÍMICOS:**

Reacciona con oxidantes fuertes, acetileno, halógenos y óxidos de nitrógeno, originando peligro de incendio y explosión.

**LÍMITES DE EXPOSICIÓN:**

TLV: (Hidrocarburos alifáticos alcanos (C1-C4), gases) 1000 ppm como TWA (ACGIH 2006).

MAK: 1000 ppm; 2400 mg/m<sup>3</sup>; Categoría de limitación de pico: II(4); Riesgo para el embarazo: grupo D (DFG 2008).

**VÍAS DE EXPOSICIÓN:**

La sustancia se puede absorber por inhalación.

**RIESGO DE INHALACIÓN:**

Al producirse una pérdida de gas, se alcanza muy rápidamente una concentración nociva de éste en el aire.

**EFFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN:**

La evaporación rápida del líquido puede producir congelación. La sustancia puede afectar al sistema cardiovascular, dando lugar a disfunciones y fallo respiratorio. La exposición a altas concentraciones puede producir la muerte.

## PROPIEDADES FÍSICAS

Punto de ebullición: -12°C

Punto de fusión: -160°C

Densidad relativa (agua = 1): 0.6 (cuando está líquido)

Solubilidad en agua, g/100 ml a 25°C: 0.0049 (muy escasa)

Presión de vapor, kPa a 20°C: 304

Densidad relativa de vapor (aire = 1): 2

Punto de inflamación: gas inflamable

Temperatura de autoignición: 460°C

Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 1.8-8.4

Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: 2.8

## DATOS AMBIENTALES

## NOTAS

Con el fin de evitar la fuga de gas en estado líquido, girar la botella que tenga un escape manteniendo arriba el punto de escape. Las medidas mencionadas en la Sección PREVENCIÓN son aplicables a la producción, llenado de botellas y almacenamiento del gas. Esta ficha ha sido parcialmente actualizada en noviembre de 2008: ver Límites de exposición, y en abril de 2010: ver Propiedades físicas

## INFORMACIÓN ADICIONAL

Límites de exposición profesional (INSHT 2011):

VLA-ED: (Hidrocarburos alifáticos alcanos (C1-C4) y sus mezclas, gases) 1000 ppm.

**Nota legal**

Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. Su posible uso no es responsabilidad de la CE, el IPCS, sus representantes o el INSHT, autor de la versión española.

## 2-METILPROPENO (licuado)

ICSC: 1027



2-METILPROPENO (licuado)

Isobuteno

Isobutileno

(botella)

$C_4H_8/CH_2=C(CH_3)_2$

Masa molecular: 56.1

Nº CAS 115-11-7

Nº RTECS UD0890000

Nº ICSC 1027

Nº NU 1055

Nº CE 601-012-00-4



TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION	PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS	PREVENCION	PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS														
<b>INCENDIO</b>	Extremadamente inflamable.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar. NO poner en contacto con materiales oxidantes.	<p>Cortar el suministro; si no es posible y no existe riesgo para el entorno próximo, dejar que el incendio se extinga por sí mismo; en otros casos apagar con tierra, polvo, dióxido de carbono.</p> <table border="0" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="background-color: #f08080; width: 20%; text-align: center; vertical-align: middle;"><b>EXPLOSION</b></td> <td style="width: 25%;">Las mezclas gas/aire son explosivas. Riesgo de incendio y explosión en contacto con oxidantes, halógenos (véanse Peligros químicos).</td> <td style="width: 25%;">Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión. Evitar la generación de cargas electrostáticas (por ejemplo, mediante conexión a tierra). Utilícense herramientas manuales no generadoras de chispas.</td> <td style="width: 30%;">En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua. Combatir el incendio desde un lugar protegido.</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #f08080; text-align: center; vertical-align: middle;"><b>EXPOSICION</b></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="background-color: #f08080; text-align: center; vertical-align: middle;"><b>• INHALACION</b></td> <td>Vértigo, somnolencia, embotamiento, náuseas, vómitos, pérdida del conocimiento.</td> <td>Sistema cerrado y ventilación.</td> <td>Aire limpio, reposo, respiración artificial si estuviera indicada y proporcionar asistencia médica.</td> </tr> </table>			<b>EXPLOSION</b>	Las mezclas gas/aire son explosivas. Riesgo de incendio y explosión en contacto con oxidantes, halógenos (véanse Peligros químicos).	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión. Evitar la generación de cargas electrostáticas (por ejemplo, mediante conexión a tierra). Utilícense herramientas manuales no generadoras de chispas.	En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua. Combatir el incendio desde un lugar protegido.	<b>EXPOSICION</b>				<b>• INHALACION</b>	Vértigo, somnolencia, embotamiento, náuseas, vómitos, pérdida del conocimiento.	Sistema cerrado y ventilación.	Aire limpio, reposo, respiración artificial si estuviera indicada y proporcionar asistencia médica.
<b>EXPLOSION</b>	Las mezclas gas/aire son explosivas. Riesgo de incendio y explosión en contacto con oxidantes, halógenos (véanse Peligros químicos).	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión. Evitar la generación de cargas electrostáticas (por ejemplo, mediante conexión a tierra). Utilícense herramientas manuales no generadoras de chispas.	En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua. Combatir el incendio desde un lugar protegido.														
<b>EXPOSICION</b>																	
<b>• INHALACION</b>	Vértigo, somnolencia, embotamiento, náuseas, vómitos, pérdida del conocimiento.	Sistema cerrado y ventilación.	Aire limpio, reposo, respiración artificial si estuviera indicada y proporcionar asistencia médica.														

	<p>• <b>PIEL</b></p>	<p>EN CONTACTO CON LIQUIDO: Guantes aislantes del CONGELACION. frío.</p>	<p>EN CASO DE CONGELACION: aclarar con agua abundante, NO quitar la ropa y proporcionar asistencia médica.</p>
	<p>• <b>OJOS</b></p>	<p>Congelación. Pantalla facial o protección ocular combinada con la protección respiratoria.</p>	<p>Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad) y proporcionar asistencia médica.</p>
	<p>• <b>INGESTION</b></p>		
	<p><b>DERRAMAS Y FUGAS</b></p>	<p><b>ALMACENAMIENTO</b></p>	<p><b>ENVASADO Y ETIQUETADO</b></p>
	<p>Evacuar la zona de peligro. Consultar a un experto. Ventilar. Eliminar todas las fuentes de ignición. NO verterlo al alcantarillado, NO verter NUNCA chorros de agua sobre el líquido. (Protección personal adicional: equipo autónomo de respiración).</p>	<p>A prueba de incendio. Separado de sustancias incompatibles (véanse Peligros químicos). Mantener en lugar fresco.</p>	<p>símbolo F+ R: 12 S: (2)-9-16-33 Nota: C Clasificación de Peligros NU: 2.1 CE:</p> 
	<p><b>VEASE AL DORSO INFORMACION IMPORTANTE</b></p>		
	<p><b>ICSC: 1027</b></p>	<p>Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión de las Comunidades Europeas © CCE, IPCS, 1994</p>	

## Fichas Internacionales de Seguridad Química

### 2-METILPROPENO (licuado)

**ICSC: 1027**

<p><b>D A T O S I M P O R T</b></p>	<p><b>ESTADO FISICO; ASPECTO</b> Gas licuado comprimido, incoloro o líquido incoloro volátil, de olor característico.</p> <p><b>PELIGROS FISICOS</b> El gas es más denso que el aire y puede extenderse a ras del suelo; posible ignición en punto distante y puede acumularse en las zonas más bajas produciendo una deficiencia de oxígeno. Como resultado del flujo, agitación, etc., se pueden generar cargas electrostáticas.</p> <p><b>PELIGROS QUIMICOS</b> La sustancia probablemente pueda formar peróxidos explosivos. La sustancia puede polimerizar con peligro de incendio y explosión. Reacciona violentamente con oxidantes, cloro, flúor, óxidos de nitrógeno, cloruro de hidrógeno, bromuro de hidrógeno, originando peligro de incendio y explosión. Ataca a algunos plásticos y al caucho.</p>	<p><b>VIAS DE EXPOSICION</b> La sustancia se puede absorber por inhalación.</p> <p><b>RIESGO DE INHALACION</b> Al producirse pérdidas en zonas confinadas este líquido se evapora muy rápidamente originando una saturación total del aire con grave riesgo de asfixia. Por evaporación de esta sustancia a 20°C se puede alcanzar muy rápidamente una concentración nociva en el aire.</p> <p><b>EFFECTOS DE EXPOSICION DE CORTA DURACION</b> La evaporación rápida del líquido puede producir congelación. La sustancia puede causar efectos en el sistema nervioso central. La exposición puede producir la muerte. Se recomienda vigilancia médica.</p> <p><b>EFFECTOS DE EXPOSICION PROLONGADA O REPETIDA</b></p>
---	---	--

<b>A N T E S</b>	<b>LIMITES DE EXPOSICION</b> TLV: no establecido. MAK: no establecido.
----------------------------------	--

<b>PROPIEDADES FISICAS</b>	Punto de ebullición: -6.9°C Punto de fusión: -140.3°C Densidad relativa (agua = 1): 0.59 Solubilidad en agua: Insoluble Presión de vapor, kPa a 20°C: 1976	Densidad relativa de vapor (aire = 1): 1.94 Punto de inflamación: Inflamable Temperatura de autoignición: 465°C Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 1.8-9.6%
----------------------------	--	---

<b>DATOS AMBIENTALES</b>
--------------------------

<b>NOTAS</b>
--------------

Densidad del líquido en el punto de ebullición: 0.605 kg/l. Altas concentraciones en el aire producen una deficiencia de oxígeno con riesgo de pérdida de conocimiento o muerte. Comprobar el contenido de oxígeno antes de entrar en la zona. Con el fin de evitar la fuga de gas en estado líquido, colocar la botella con el punto de escape hacia arriba.

Ficha de emergencia de transporte (Transport Emergency Card):  
 TEC (R)-502  
 Código NFPA: H 1;  
 F 4; R 0;

<b>INFORMACION ADICIONAL</b>
------------------------------

FISQ: 4-147  
 2-METILPROPENO (licuado)

<b>ICSC: 1027</b>	<b>2-METILPROPENO (licuado)</b>
© CCE, IPCS, 1994	

<b>NOTA LEGAL IMPORTANTE:</b>	Ni la CCE ni la IPCS ni sus representantes son responsables del posible uso de esta información. Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. La versión española incluye el etiquetado asignado por la clasificación europea, actualizado a la vigésima adaptación de la Directiva 67/548/CEE traspuesta a la legislación española por el Real Decreto 363/95 (BOE 5.6.95).
-------------------------------	--



---

## **Capítulo MD.C10. Evaluación de impacto ambiental**

### **MD.C10.1 Introducción**

El término impacto se aplica a la alteración que introduce una actividad humana en su entorno; este concepto identifica la parte del medio ambiente afectada por la actividad, o más ampliamente, que interacciona con ella. Por tanto el impacto ambiental se origina en una acción humana y se manifiesta según tres facetas sucesivas:

- La modificación de alguno de los factores ambientales o del conjunto del sistema ambiental.
- La modificación del valor del factor alterado o del conjunto del sistema ambiental.
- La interpretación o significado ambiental de dichas modificaciones, y en último término, para la salud y bienestar humano. Esta tercera faceta está íntimamente relacionada con la anterior ya que el significado ambiental de la modificación del valor no puede desligarse del significado ambiental del valor que se parte.

Por tanto, las evaluaciones de impacto ambiental son estudios realizados para identificar, predecir e interpretar, así como para prevenir, las consecuencias o efectos ambientales que determinadas acciones, planes, programas o proyectos pueden causar a la salud y al bienestar humano, y al entorno.

#### **MD.C10.1.1. Metodología en la elaboración del estudio de Impacto Ambiental**

Este proceso queda recogido en el RDL 9/2000, en el que se hace referencia a la necesidad de evaluar el impacto ambiental en un grupo de proyectos, englobados en dos anexos. La planta para purificación de butadieno, que es objeto del estudio puede encuadrarse en el Anexo 2, lo que justifica las consideraciones que en materia de medioambiente se efectúan en el capítulo.

El Reglamento de Evaluación de Impacto Ambiental, (E.I.A), señala un contenido para los estudios de impacto ambiental que define la estructura del mismo y señala las pautas para la elaboración de la metodología; es el siguiente.

- Análisis del proyecto y sus acciones.
- Examen de alternativas técnicamente viables y justificación de la solución adoptada.
- Definición del entorno del proyecto y posterior descripción y estudio del mismo.
- Previsiones de los efectos que el proyecto generará sobre el medio.
- Identificación de las acciones del proyecto potencialmente impactantes.
- Identificación de los factores del medio potencialmente impactados.
- Identificación de relaciones causa-efecto entre acciones del proyecto y factores del medio. Elaboración de la matriz de importancia.
- Predicción de la magnitud del impacto sobre cada factor.
- Establecimiento de medidas protectoras y correctoras.
- Programa de vigilancia ambiental.
- Documento de síntesis.

Como marco de referencia, el estudio adoptará las exigencias del Reglamento de E.I.A., el cual señala lo siguiente:

La evaluación de impacto ambiental, y por tanto, el estudio de impacto ambiental que la soporta, debe comprender, al menos, la estimación de los efectos sobre la población humana, la fauna, la flora, la vegetación, la gea, el suelo, el agua, el aire, el clima, el paisaje y la estructura y función de los ecosistemas presentes en el área previsiblemente afectada. Asimismo, debe comprender la estimación de la incidencia que el proyecto, obra o actividad tiene sobre los elementos que componen el Patrimonio Histórico español, sobre las relaciones sociales y las condiciones de sosiego público, tales como ruidos, vi-

---

braciones, olores y emisiones luminosas, y la de cualquiera otra incidencia ambiental derivada de su ejecución.

Recordando el carácter de pre-ingeniería básica del presente PFC, no se profundizará el estudio, sino que se aportará y estudio del proyecto y el entorno, se evaluarán los impactos de forma genérica y se propondrán medidas preventivas y correctoras de forma cualitativa.

La implantación definitiva de la planta proyectada exigirá una ampliación y rigurosidad mayores en el estudio que serán responsabilidad de los ingenieros encargados de la ingeniería básica y de detalle de la planta.

### **MD.C10.2. Estudio del proyecto y su entorno**

#### **MD.C10.2.1. Definición de la planta**

La planta objeto del PFC ha sido proyectada para una producción útil de 200,8 kt/año de butadieno purísimo al 99,9%. Además se obtienen, como productos secundarios, distintas corrientes ricas en butenos y de utilidad en distintos procesos de Refinería.

Habrán de considerarse todas las actividades que se van a desarrollar desde la fase de construcción de la planta hasta la fase de puesta en funcionamiento de la misma, incluyendo todo el tipo de material, maquinaria y equipo que se vaya a utilizar, así como los riesgos de accidentes, la contaminación y otros parámetros de interés que surjan durante el proceso de construcción hasta la puesta en funcionamiento de la planta.

#### **MD.C10.2.2. Localización**

La planta estará localizada en la *Refinería Gibraltar-San Roque*, propiedad de la compañía *CEPSA* enmarcada en el término municipal de San Roque, (Cádiz), como queda descrito a lo largo de la presente memoria descriptiva.

### MD.C10.2.3. Descripción de trabajos durante la construcción de la planta

Los trabajos que realizarán durante la fase de construcción serán los siguientes:

- Desbroce por medios mecánicos.
- Movimiento de tierras.
- Defensa de hundimientos y desprendimientos de terrenos.
- Excavación mecánica. Zanjas.
- Hormigonado de cimientos por vertido directo.
- Estructura de hormigón armado y en masa.
- Estructuras metálicas. Colocación de perfiles.
- Estructuras metálicas. Colocación de cerchas y correas.
- Muros de carga.
- Zunchos perimetrales y jácenas.
- Forjados de viguetas y bovedillas.
- Albañilería.
- Carpintería metálica y barandillas.
- Pintura.
- Falsos techos.
- Formación de cubiertas.
- Cubiertas con placas.
- Solados.
- Fontanería y bajantes.
- Saneamientos.
- Instalación eléctrica.
- Iluminación.

### MD.C10.2.4. Descripción de maquinaria que se empleará durante la construcción de la planta

Durante el transcurso de la fase de construcción está previsto que se utilice la siguiente maquinaria:

- Para movimiento de tierras:

Retroexcavadora, pala cargadora, excavadora de draga de arrastre, zanjadora continua.

- Para transporte horizontal:

Carretilla transportadora, motovolquete (dúmpер pequeño), camión basculante, camión cisterna, dúmpер (grande).

- Maquinaria de elevación:

Grúa torre.

- Maquinaria para hormigones:

Hormigonera, bomba de hormigón, camión hormigonera, vibrador de agujas.

- Maquinaria para compactación y pavimentación:

Extendedora, compactadora, explanadora, camión bituminador, pisón mecánico.

- Maquinaria transformadora de energía:

Grupo electrógeno, motor eléctrico, compresor.

- Máquinas herramientas:

Martillo neumático, taladro columna, esmeriladora de pie, tronzadora de metal, tronzadora de cerámica, tronzadora de madera, ingleteadora, sierra de cinta, amasadora, pulidora, fresadora.

- Herramientas

Taladro percutor, martillo rotativo, pistola clavadora, lijadora, disco radial, rozadora, herramientas manuales.

#### MD.C10.2.5. Descripción de materias primas y productos

Véase capítulo segundo de la presente memoria.

#### MD.C10.2.6. Descripción del proceso

Véase capítulo primero de la presente memoria.

#### MD.C10.2.7. Vertido de residuos

En operación normal, la planta no genera ningún residuo del tipo gaseoso o sólido. Sólo se prevén derrames accidentales y como resultado de las tareas de mantenimiento, para cuya gestión se dispone de la red de aguas aceitosas de Refinería.

#### MD.C10.2.8. Usos del agua

El agua se usará como agente refrigerante en la red de intercambiadores y como agua de lavado de los equipos en las operaciones de limpieza.

#### MD.C10.2.9. Características de los residuos

Los residuos que se producen en la planta son de distintos tipos:

- Aguas residuales:

Las que provienen del saneamiento de la planta, esto es, procesos de limpieza de equipos.

- Vertidos líquidos:

Son los vertidos que provienen de posibles escapes, fugas y roturas de los tanques de almacenamiento, de las líneas de proceso o de algún equipo de la planta.

---

#### MD.C10.2.10. Definición del entorno

La delimitación geográfica del ámbito afectado se puede reducir básicamente a la ocupación que se va a producir del terreno por la construcción de la planta, y por extensión, de la zona de refinería donde se va a situar la planta, ya que el posible impacto que se pueda producir por los efluentes del proceso sobre los acuíferos subterráneos, queda eliminado previo tratamiento de los efluentes en la Estación de Tratamiento de Aguas Residuales (TAR), y su posterior vertido a vías fluviales.

El posible impacto producido por ruidos, olores, incendios y riesgos de explosiones puede hacer que este entorno se vea aumentado, si bien se tomarán las oportunas medidas de seguridad para su minimización.

#### MD.C10.2.11. Descripción general del entorno

Se evalúa en el presente apartado el medio receptor del proyecto, con objeto de definir el estado pre-operacional de referencia que permita determinar las alteraciones potenciales que ocasionaría la puesta en marcha del proyecto, estableciendo las características de ese medio receptor y su capacidad de acogida.

##### - Medio físico

El entorno donde se va a situar el proyecto presenta un clima mediterráneo, con inviernos y veranos suaves y húmedos, tal como describió el capítulo cuarto.

El tratamiento de aguas residuales será responsabilidad de la planta TAR de la propia refinería, la que después de tratarlas, las envía a un colector submarino directo al estrecho de Gibraltar.

La flora del entorno es del tipo mediterráneo, mientras que la fauna no tiene demasiada significación, ya que al situarse el proyecto en un polígono industrial, y más si cabe dentro de la propia refinería,

ésta es inexistente, tanto terrestre como acuática. Deberá considerarse, no obstante la cercanía al Parque Natural de Los Alcornocales, zona ZEPA, por lo que deberá estudiarse en profundidad las eventuales medidas para la conservación de la vida aviaria.

El paisaje que se va a ver afectado por la construcción y funcionamiento de la planta es mínimo, ya que las construcciones estarán enmarcadas dentro del área de Refinería y no modificarán de forma importante el paisaje ya existente.

- Medio socio-económico

El medio socio-económico del entorno afectado será mínimo, ya que la construcción y puesta en funcionamiento de la planta no va a repercutir de forma negativa en un medio que se dedica fundamentalmente a la industria del refino de petróleo, petroquímica e industria energética, o, en todo caso no agravará la opinión pública.

La repercusión que tendría la implantación de la planta se espera que sea positiva, por cuanto toca a la potencial revitalización del empleo en la zona.

**MD.C10.3. Identificación de los efectos generados por el proyecto sobre el medio**

Una vez que se descrito el proyecto, el entorno que le rodea y la capacidad de acogida de éste sobre aquél, se desarrolla una primera aproximación al estudio de acciones y efectos, de forma que una primera visión de los efectos que se producirán sobre el medio, ayudarán a prever, de forma cualitativa, qué consecuencias acarrearán las acciones emprendidas para la consecución del proyecto, sobre los parámetros medioambientales, así como vislumbrar aquellos factores que serán los más afectados.

Se distingue entre fase de construcción y fase de funcionamiento de la planta; de acuerdo con esto, se observa la siguiente clasificación:

1. Acciones impactantes

a) Fase de construcción:

- Impacto 1: Accesos y viales
- Impacto 2: Desbroce y tala
- Impacto 3: Movimiento de tierras
- Impacto 4: Infraestructuras
- Impacto 5: Vertidos
- Impacto 6: Pavimentaciones o recubrimientos de superficie
- Impacto 7: Acopio de materiales
- Impacto 8: Maquinaria pesada y utillaje productor de ruidos y vibraciones
- Impacto 9: Emisión de polvo
- Impacto 10: Tráfico de vehículos
- Impacto 11: Desmonte y rellenos
- Impacto 12: Excavaciones
- Impacto 13: Instalaciones provisionales
- Impacto 14: Construcción propiamente dicha
- Impacto 15: Señalización y vallas
- Impacto 16: Incremento de la mano de obra
- Impacto 17: Presupuesto

b) Fase de funcionamiento:

- Impacto 18: Nivel de ocupación
- Impacto 19: Infraestructuras
- Impacto 20: Inversión
- Impacto 21: Maquinaria
- Impacto 22: Transporte de líquidos inflamables y combustibles. Descarga de camiones cisterna
- Impacto 23: Alimentación a los tanques
- Impacto 24: Tanques de almacenamiento
- Impacto 25: Circulación vehículos pesado y tráfico
- Impacto 26: Producción anual prevista
- Impacto 27: Producción diaria prevista
- Impacto 28: Utilización y consumo de materias primas
- Impacto 29: Humos
- Impacto 30: Subestaciones de transformación

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Memoria descriptiva

---

- Impacto 31: Ruido y vibraciones
- Impacto 32: Emisión de polvo
- Impacto 33: Tráfico
- Impacto 34: Barreras y vallados
- Impacto 35: Explosiones
- Impacto 36: Incendios
- Impacto 37: Escapes y fugas
- Impacto 38: Fallos de funcionamiento
- Impacto 39: Vertido de efluentes
- Impacto 40: Impermeabilización
- Impacto 41: Dirección más frecuente en el transporte de contaminantes atmosféricos
- Impacto 42: Red de vigilancia y control
- Impacto 43: Características meteorológicas de la zona
- Impacto 44: Coste de funcionamiento

### 2. Factores impactados:

- Medio natural:
  - a) Aire:
    - Calidad del aire
    - Microclima
    - Contaminación sonora
  - b) Tierra y suelo:
    - Erosión
    - Contaminación
    - Suelo
  - c) Agua:
    - Recursos hídricos
    - Calidad del agua
    - Temperatura
  - d) Flora:
    - Especies endémicas
    - Especies interesantes
  - e) Fauna:
    - Especies endémicas

- Aves migratorias
- Insectos
- Especies interesantes
- f) Medio perceptual:
  - Vistas
  - Naturalidad
  - Singularidad
  - Medio socioeconómico:
- g) Usos del territorio:
  - Actividades industriales
- h) Valores culturales y humanos:
  - Bienestar
  - Salud y seguridad
  - Calidad de vida
- i) Infraestructuras:
  - Transportes y comunicaciones
  - Red de abastecimiento
  - Red de saneamiento
  - Equipamiento
- j) Economía y población:
  - Dependencia energética
  - Consumo energético
  - Costes e inversiones
  - Beneficios
  - Economía local

Estos son los criterios típicos a la hora de establecer un E.I.A. Procedería aplicar métodos rigurosos de determinación causa efecto, si bien, se comentará someramente cuáles son a priori los impactos más significativos, de modo que un futuro estudio amplíe la rigurosidad del método aplicado y sus actuaciones en consecuencia.

#### **MD.C10.4. Comentario y establecimiento de medidas correctoras y preventivas**

Se estima que las actividades durante el funcionamiento de transporte de líquidos inflamables, (22), alimentación de los tanques (23), circulación de vehículos pesados y tráfico (25), utilización y consumo de materias primas, (28), explosiones (35), incendios (36), escapes y fugas (37) y efluentes vertidos (39); así como los movimientos de tierra (3) y la emisión de polvo (9) durante la construcción, pueden ser las formas de impacto más significativas.

La utilización de materiales volátiles y tóxicos justifican la mayoría de los posibles impactos enumerados, tanto al medio físico, como al socio-económico representado por los operarios e incluso la opinión pública. Se establecerán las siguientes medidas correctoras.

##### **MD.C10.4.1. Medidas para corregir la emisión de polvo**

La emisión de polvo producida durante la fase de construcción de la planta es inevitable, pero se minimizará regando la zona para aplacarlo en la medida de lo posible.

##### **MD.C10.4.2. Medidas para corregir la erosión del suelo**

Los movimientos de tierra, excavaciones, desmontes y rellenos serán los estrictamente necesarios para la construcción de la planta, procurando que la superficie alterada sea la mínima.

##### **MD.C10.4.3. Medidas para controlar los efluentes líquidos**

Las aguas residuales producidas en la planta serán conducidas a la planta TAR de la propia refinería asegurándose así su completa depuración antes de su vertido.

Finalmente, cabe señalar que las obras de urbanización del área de proceso también están previstas para recoger las aguas pluviales y realizar su evacuación.

Por su parte, los vertidos líquidos que se produzcan en la planta debido a escapes, fugas o roturas de los tanques de almacenamiento se verterán a los cubetos de retención, diseñados para su control y recuperación de los líquidos vertidos.

El parque de almacenamiento de líquidos consta de una red de saneamiento paralela a la general de la planta para conducir a la planta TAR los pequeños escapes producidos, previo control y análisis de los mismos. El resto de vertidos en planta no se espera cuantioso, si bien se preverán protocolos de absorción de líquidos derramados en condiciones de seguridad para los operarios, en los términos que se incidirá en el capítulo siguiente.

#### MD.C10.4.4. Medidas para controlar los ruidos

Durante la fase de construcción de la planta el ruido emitido por la maquinaria es inevitable, pero al ser un impacto temporal, puntual, reversible y de baja intensidad, no se espera que revista excesiva gravedad. No obstante se intentará reducir en la medida de lo posible.

Siguiendo la normativa vigente, se dotará a los equipos que lo precisen (válvulas de control, maquinaria, etc.) de elementos aislantes acústicos.

Será necesario establecer un programa de medidas acústicas en el periodo nocturno, siguiendo los criterios fijados en el Decreto 74/1996.

El objetivo a cumplir es la verificación de los niveles sonoros previstos tras la puesta en marcha de las instalaciones proyectadas y adoptar, en su caso, medidas correctoras específicas.

#### MD.C10.4.4. Medidas para controlar incendios y explosiones

Se dotará a la planta de los sistemas suficientes de vigilancia contra incendios y explosiones para impedir éstos en lo posible.

Algunos impactos, incluso con el establecimiento de las medidas correctoras siguen siendo moderados, como es el caso de los impactos producidos por incendios y explosiones, pero son impactos inevitables, que rara vez se producen y se han conseguido minimizar todo lo posible con el establecimiento de las medidas correctoras correspondientes.

#### MD.C10.4.5. Medidas para preservar la fauna aviaria

Se prestará especial atención al comportamiento de las aves cercanas al entorno, y su posible afectación por las emisiones que la planta pudiera ocasionar. Llegado el caso, se implantarían medidas de protección en coordinación con los organismos ambientales competentes.

#### **MD.C10.4. Programa de vigilancia ambiental**

En aras de mejorar el cumplimiento con los objetivos medioambientales que se establezcan en Refinería, se establecerán las siguientes directrices de vigilancia sobre los impactos más conflictivos

- Efluentes líquidos

El control de los efluentes líquidos es llevado a cabo por la refinería en su planta de aguas residuales.

- Ruidos

Para el control de los ruidos, se hará un seguimiento periódico y sistemático de los niveles tanto dentro como en los alrededores de la planta.

- Monitorización en continuo

La monitorización en continuo permite al momento detectar posibles escapes y fugas en los distintos equipos y tanques de almacenamiento, así como detectar posibles fallos de funcionamiento.

- Libro de registro

En el libro de registro se hará constar todos los controles que se llevan a cabo, con todas las especificaciones y valores que la normativa vigente específica, para de esta forma llevar un perfecto control de la situación ambiental que rodea a la planta.

## **MD. Bibliografía**

### **Libros y manuales consultados**

- The properties of gases & liquids. *R. C. Reid, J. M. Prausnitz, B. E. Poling*. McGraw-Hill. 4ª Edición.
- Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química. *J. M. Smith, H. C. Van Ness, M. M. Abbott*. McGraw-Hill. 6ª Edición, pgs. 108-112.
- Chemical Process Engineering. Design and Economics. *H. Silla*. Marcel Dekker, 2003.
- Chemical Engineering Design. *G. Towler, R. Sinnott*. Butterworth-Heinemann, año 2008.
- *Technical Data Book-Petroleum Refining*, American Petroleum Institute (API), 6ª Edición, abril 1997.
- Operaciones de separación por etapas de equilibrio en Ingeniería Química. *E. J. Henley, H. D. Seader*. Reverté, año 2000.
- Operaciones de transferencia de masa. *R. E. Treybal*. McGraw-Hill. 2ª Edición.
- Cameron hydraulic data. *Ingersoll-Rand Company*. 16ª edición.
- Diseño de procesos en Ingeniería Química. *A. J. Gutiérrez*. Editorial Reverté, 2003.

### **Artículos, informes y tesis consultadas**

- Modelado del equilibrio líquido-vapor en mezclas binarias y ternarias de interés en destilación vínica. *J. O. Valderrama, C. A. Faúndez*. Revista Inf. Tecnol. Vol. 14 nº 1 (2003). Págs. 83-92.
- Conversión de n-butano en hidrocarburos aromáticos con catalizadores de zeolita ZSM-5. *J. C. Ramírez Camacho*. Tesis doctoral, Madrid 1995.

- *H. G. Rackett*. J. Chem. Eng. Data, vol. 15, pgs. 514-517, 1970.
- Manual de recipientes a presión. *E. F. Megyesy*. Limusa. Grupo Noriega Editores, año 1992.
- Fundamentos de Ciencia e Ingeniería de Materiales. *W. F. Smith, J. Hashemi*. 4ª Edición. Ed. McGraw-Hill.
- Fractionation of straight-run Pennsylvania gasoline. *M. R. Fenske*. Ind. Eng. Chem. 24 (1932) 482.
- Fractional distillation of multicomponent mixtures-calculation of minimum reflux ratio. *A. J. V. Underwood*. J. Inst. Petroleum 32 (1946) 614.
- Multicomponent rectification. Estimation of the number of theoretical plates as a function of the reflux ratio. *E. R. Gilliland*. Ind. Eng. Chem. 32 (1940) 1220.
- *Y. K. Molokanov, T. P. Korablina, N. I. Mazurina, G. A. Nikiforov*. Int. Chem. Eng. 12 (2), 209-212 (1972).
- *C. G. Kirkbride*. Petroleum Refiner 23 (9), 87-102 (1944).
- Simulación del comportamiento hidráulico en platos perforados para la destilación de mezclas binarias mediante CFD. *M. A. Rodríguez-Ángeles, A. R. Uribe Ramírez*. Revista Enlace Químico, nº 10, marzo 2008.

### **Catálogos comerciales**

- Catálogo comercial “Mesh & Vane mist eliminators” de la empresa de productos de separación *AMISTCO*. (Extractores de neblina).
- Catálogo comercial *Hermanos García y Pazo*. (Fabricantes de cabezales de recipientes a presión).
- Catálogo de bridas forjadas de la empresa *FRANCOVIGH*. (Bridas de grandes dimensiones).

### **Direcciones de internet**

- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT):  
<http://www.insht.es/portal/site/Insht/>
- Bombas *Bell & Gossett*:  
<http://completewatersystems.com/brands/bell-gossett/>
- Bombas *Hidromac*:  
<http://www.hidromac.com/productoespanol.htm>
- Empresa *FACME*:  
<http://www.facme.com/webs/PProductos.htm>
- Precio de productos químicos:  
<http://www.icis.com/chemicals/channel-info-chemicals-a-z/>
- Estudio de Mercado sobre 1,3-butadieno:  
[http://www.icispricing.com/il\\_shared/Samples/SubPage5.asp](http://www.icispricing.com/il_shared/Samples/SubPage5.asp)

# Documento 1. Memoria

---

## Anexos a la memoria

1. **Generación de datos termodinámicos**
2. **Diseño de unidades**
3. **Diseño hidráulico de unidades**
4. **Diseño mecánico de unidades**
5. **Diseño de unidades auxiliares**



---

**ANEXOS**

**ANEXO 1 (A1)**

Capítulo A1.C1. Fundamentación teórica del equilibrio	P.247
Capítulo A1.C2. Equilibrio de fases para "SIMPLE"	P.285
A1.C2.1. Introducción de la composición de la fase líquida	P.287
A1.C2.2. Introducción de la presión de equilibrio	P.289
A1.C2.3. Introducción de datos	P.290
A1.C2.3.1. Parámetros UNIFAC	P.291
A1.C2.3.2. Coeficientes de <i>Antoine</i>	P.292
A1.C2.3.3. Prop. críticas y temperaturas de ebullición normal	P.293
A1.C2.3.4. Otras propiedades	
A1.C2.3.5. Reglas de combinación de <i>Prausnitz</i>	P.294
A1.C2.4. Cálculos de temperatura (1)	P.295
A1.C2.5. Cálculo de presión de saturación (1)	P.296
A1.C2.6. Cálculo de los coeficientes de actividad	P.297
A1.C2.6.1 Cálculo de $r_i$	P.298
A1.C2.6.2. Cálculo de $q_j$	P.298
A1.C2.6.3. Cálculo de $e_{ki}$	P.299
A1.C2.6.4. Cálculo de $\tau_{mk}$	P.300
A1.C2.6.5. Cálculo de $\beta_{ik}$	P.301
A1.C2.6.6. Cálculo de $\theta_k$	P.302
A1.C2.6.7. Cálculo de $s_k$	P.303
A1.C2.6.8. Cálculo de $J_i$	P.303
A1.C2.6.9. Cálculo de $L_i$	P.305
A1.C2.6.10. Cálculo del coeficiente de actividad combinatorio	P.306
A1.C2.6.11. Cálculo del coeficiente de actividad residual	P.307

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

### Índice general

---

A1.C2.6.12. Cálculo del coeficiente de actividad	P.308
A1.C2.7. Cálculo de la presión de saturación (2)	P.309
A1.C2.8. Cálculos de temperatura (2)	P.312
A1.C2.9. Cálculo de la presión de saturación (3)	P.313
A1.C2.10. Cálculo de la composición de vapor	P.314
A1.C2.11. Cálculo de los $\Phi_i$	P.315
A1.C2.11.1. Cálculo de temp. reducidas puras y cruzadas	P.316
A1.C2.11.2. Cálculo de coeficientes viriales puros y cruzados	P.319
A1.C2.11.3. Cálculo de coeficientes delta puros y cruzados	P.323
A1.C2.11.4. Cálculo de volúmenes de líquido saturado	P.325
A1.C2.11.5. Cálculo de $\Phi_i$	P.326
A1.C2.12. Cálculo de la presión de saturación (4)	P.330
A1.C2.13. Cálculos de temperatura (3)	P.331
A1.C2.14. Comprobación de la convergencia	P.333
A1.C2.15. Datos de equilibrio	P.335
Capítulo A1.C3. Equilibrio de fases para “EXTRACTIVA 1”	P.337
A1.C3.1. Introducción de la composición de la fase líquida	P.337
A1.C3.2. Introducción de la presión de equilibrio	P.340
A1.C3.3. Introducción de datos	P.341
A1.C3.3.1. Parámetros UNIFAC	P.342
A1.C3.3.2. Coeficientes de <i>Antoine</i>	P.344
A1.C3.3.3. Propiedades críticas y temperaturas de ebullición normal	P.345
A1.C3.3.4. Otras propiedades	P.346
A1.C3.3.5. Reglas de combinación de Prausnitz	P.347
A1.C3.4. Cálculos de temperatura (1)	P.348

---

A1.C3.5. Cálculo de presión de saturación (1)	P.350
A1.C3.6. Cálculo de los coeficientes de actividad	P.351
A1.C3.6.1 Cálculo de $r_i$	P.351
A1.C3.6.2. Cálculo de $q_j$	P.352
A1.C3.6.3. Cálculo de $e_{ki}$	P.353
A1.C3.6.4. Cálculo de $\tau_{mk}$	P.354
A1.C3.6.5. Cálculo de $\beta_{ik}$	P.356
A1.C3.6.6. Cálculo de $\theta_k$	P.359
A1.C3.6.7. Cálculo de $s_k$	P.360
A1.C3.6.8. Cálculo de $J_i$	P.360
A1.C3.6.9. Cálculo de $L_i$	P.361
A1.C3.6.10. Cálculo del coeficiente de actividad combinatorio	P.362
A1.C3.6.11. Cálculo del coeficiente de actividad residual	P.363
A1.C3.6.12. Cálculo del coeficiente de actividad	P.364
A1.C3.7. Cálculo de la presión de saturación (2)	P.365
A1.C3.8. Cálculos de temperatura y coef. de actividad (2)	P.366
A1.C3.9. Cálculo de la presión de saturación (3)	P.368
A1.C3.10. Cálculo de la composición de vapor	P.368
A1.C3.11. Cálculo de los $\Phi_i$	P.369
A1.C3.11.1. Cálculo de temp. reducidas puras y cruzadas	P.370
A1.C3.11.2. Cálculo de coeficientes viriales puros y cruzados	P.371
A1.C3.11.3. Cálculo de coeficientes delta puros y cruzados	P.373
A1.C3.11.4. Cálculo de volúmenes de líquido saturado	P.375
A1.C3.11.5. Cálculo de $\Phi_i$	P.375
A1.C3.12. Cálculo de la presión de saturación (4)	P.376
A1.C3.13. Cálculos de temperatura y coef. de actividad (3)	P.377

# Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

## Índice general

---

A1.C3.14. Comprobación de la convergencia	P.379
A1.C3.15. Datos de equilibrio	P.380
Capítulo A1.C4. Equilibrio de fases para “EXTRACTIVA 2”	P.383
A1.C4.1. Introducción de la composición de la fase líquida	P.383
A1.C4.2. Introducción de la presión de equilibrio	P.385
A1.C4.3. Introducción de datos	P.386
A1.C4.3.1. Parámetros UNIFAC	P.387
A1.C4.3.2. Coeficientes de <i>Antoine</i>	P.388
A1.C4.3.3. Propiedades críticas y temperaturas de ebullición normal	P.389
A1.C4.3.4. Otras propiedades	P.390
A1.C4.3.5. Reglas de combinación de Prausnitz	P.391
A1.C4.4. Cálculos de temperatura (1)	P.391
A1.C4.5. Cálculo de presión de saturación (1)	P.393
A1.C4.6. Cálculo de los coeficientes de actividad	P.393
A1.C4.6.1 Cálculo de $r_i$	P.394
A1.C4.6.2. Cálculo de $q_j$	P.394
A1.C4.6.3. Cálculo de $e_{ki}$	P.395
A1.C4.6.4. Cálculo de $\tau_{mk}$	P.396
A1.C4.6.5. Cálculo de $\beta_{ik}$	P.397
A1.C4.6.6. Cálculo de $\theta_k$	P.400
A1.C4.6.7. Cálculo de $s_k$	P.401
A1.C4.6.8. Cálculo de $J_i$	P.401
A1.C4.6.9. Cálculo de $L_i$	P.402
A1.C4.6.10. Cálculo del coeficiente de actividad combinatorio	P.402
A1.C4.6.11. Cálculo del coeficiente de actividad residual	P.403

---

A1.C4.6.12. Cálculo del coeficiente de actividad	P.404
A1.C4.7. Cálculo de la presión de saturación (2)	P.405
A1.C4.8. Cálculos de temperatura y coef. de actividad (2)	P.406
A1.C4.9. Cálculo de la presión de saturación (3)	P.407
A1.C4.10. Cálculo de la composición de vapor	P.408
A1.C4.11. Cálculo de los $\Phi_i$	P.408
A1.C4.11.1. Cálculo de temp. reducidas puras y cruzadas	P.409
A1.C4.11.2. Cálculo de coeficientes viriales puros y cruzados	P.410
A1.C4.11.3. Cálculo de coeficientes delta puros y cruzados	P.411
A1.C4.11.4. Cálculo de volúmenes de líquido saturado	P.411
A1.C4.11.5. Cálculo de $\Phi_i$	P.412
A1.C4.12. Cálculo de la presión de saturación (4)	P.413
A1.C4.13. Cálculos de temperatura y coef. de actividad (3)	P.413
A1.C4.14. Comprobación de la convergencia	P.414
A1.C4.15. Datos de equilibrio	P.416
Capítulo A1.C5. Equilibrio de fases para "MÚLTIPLE"	P.417
A1.C5.1. Introducción de la composición de la fase líquida	P.417
A1.C5.2. Introducción de la presión de equilibrio	P.419
A1.C5.3. Introducción de datos	P.420
A1.C5.3.1. Parámetros UNIFAC	P.421
A1.C5.3.2. Coeficientes de <i>Antoine</i>	P.422
A1.C5.3.3. Propiedades críticas y temperaturas de ebullición normal	P.423
A1.C5.3.4. Otras propiedades	P.423
A1.C5.3.5. Reglas de combinación de Prausnitz	P.424
A1.C5.4. Cálculos de temperatura (1)	P.425

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

### Índice general

---

A1.C5.5. Cálculo de presión de saturación (1)	P.425
A1.C5.6. Cálculo de los coeficientes de actividad	P.426
A1.C5.6.1 Cálculo de $r_i$	P.426
A1.C5.6.2. Cálculo de $q_j$	P.427
A1.C5.6.3. Cálculo de $e_{ki}$	P.427
A1.C5.6.4. Cálculo de $\tau_{mk}$	P.428
A1.C5.6.5. Cálculo de $\beta_{ik}$	P.429
A1.C5.6.6. Cálculo de $\theta_k$	P.430
A1.C5.6.7. Cálculo de $s_k$	P.431
A1.C5.6.8. Cálculo de $J_i$	P.432
A1.C5.6.9. Cálculo de $L_i$	P.432
A1.C5.6.10. Cálculo del coeficiente de actividad combinatorio	P.433
A1.C5.6.11. Cálculo del coeficiente de actividad residual	P.433
A1.C5.6.12. Cálculo del coeficiente de actividad	P.434
A1.C5.7. Cálculo de la presión de saturación (2)	P.435
A1.C5.8. Cálculos de temperatura (2)	P.436
A1.C5.9. Cálculo de la presión de saturación (3)	P.437
A1.C5.10. Cálculo de la composición de vapor	P.437
A1.C5.11. Cálculo de los $\Phi_i$	P.438
A1.C5.11.1. Cálculo de temperaturas reducidas puras y cruzadas	P.438
A1.C5.11.2. Cálculo de coeficientes viriales puros y cruzados	P.439
A1.C5.11.3. Cálculo de coeficientes delta puros y cruzados	P.440
A1.C5.11.4. Cálculo de volúmenes de líquido saturado	P.440
A1.C5.11.5. Cálculo de $\Phi_i$	P.441
A1.C5.12. Cálculo de la presión de saturación (4)	P.441
A1.C5.13. Cálculos de temperatura (3)	P.442

---

A1.C5.14. Comprobación de la convergencia	P.443
A1.C5.15. Datos de equilibrio	P.444
Capítulo A1.C6. Equilibrio de fases para “BINARIA”	P.445
A1.C6.1. Introducción de la composición de la fase líquida	P.445
A1.C6.2. Introducción de la presión de equilibrio	P.447
A1.C6.3. Introducción de datos	P.448
A1.C6.3.1. Parámetros UNIFAC	P.449
A1.C6.3.2. Coeficientes de <i>Antoine</i>	P.450
A1.C6.3.3. Propiedades críticas y temperaturas de ebullición normal	P.450
A1.C6.3.4. Otras propiedades	P.451
A1.C6.3.5. Reglas de combinación de Prausnitz	P.451
A1.C6.4. Cálculos de temperatura (1)	P.452
A1.C6.5. Cálculo de presión de saturación (1)	P.453
A1.C6.6. Cálculo de los coeficientes de actividad	P.454
A1.C6.6.1 Cálculo de $r_i$	P.454
A1.C6.6.2. Cálculo de $q_j$	P.455
A1.C6.6.3. Cálculo de $e_{ki}$	P.455
A1.C6.6.4. Cálculo de $\tau_{mk}$	P.456
A1.C6.6.5. Cálculo de $\beta_{ik}$	P.457
A1.C6.6.6. Cálculo de $\theta_k$	P.458
A1.C6.6.7. Cálculo de $s_k$	P.459
A1.C6.6.8. Cálculo de $J_i$	P.459
A1.C6.6.9. Cálculo de $L_i$	P.460
A1.C6.6.10. Cálculo del coeficiente de actividad combinatorio	P.461

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

### Índice general

---

A1.C6.6.11. Cálculo del coeficiente de actividad residual	P.461
A1.C6.6.12. Cálculo del coeficiente de actividad	P.462
A1.C6.7. Cálculo de la presión de saturación (2)	P.463
A1.C6.8. Cálculos de temperatura (2)	P.464
A1.C6.9. Cálculo de la presión de saturación (3)	P.465
A1.C6.10. Cálculo de la composición de vapor	P.466
A1.C6.11. Cálculo de los $\Phi_i$	P.467
A1.C6.11.1. Cálculo de temp. reducidas puras y cruzadas	P.467
A1.C6.11.2. Cálculo de coeficientes viriales puros y cruzados	P.468
A1.C6.11.3. Cálculo de coeficientes delta puros y cruzados	P.469
A1.C6.11.4. Cálculo de volúmenes de líquido saturado	P.470
A1.C6.11.5. Cálculo de $\Phi_i$	P.470
A1.C6.12. Cálculo de la presión de saturación (4)	P.471
A1.C6.13. Cálculos de temperatura (3)	P.472
A1.C6.14. Comprobación de la convergencia	P.473
A1.C6.15. Datos de equilibrio	P.474
Capítulo A1.C7. Equilibrio de fases para “RECUPERACIÓN”	P.477
A1.C7.1. Introducción de la composición de la fase líquida	P.477
A1.C7.2. Introducción de la presión de equilibrio	P.479
A1.C7.3. Introducción de datos	P.480
A1.C7.3.1. Parámetros UNIFAC	P.480
A1.C7.3.2. Coeficientes de <i>Antoine</i>	P.482
A1.C7.3.3. Propiedades críticas y temperaturas de ebullición normal	P.483
A1.C7.3.4. Otras propiedades	P.483

---

A1.C7.3.5. Reglas de combinación de Prausnitz	P.484
A1.C7.4. Cálculos de temperatura (1)	P.485
A1.C7.5. Cálculo de presión de saturación (1)	P.486
A1.C7.6. Cálculo de los coeficientes de actividad	P.486
A1.C7.6.1 Cálculo de $r_i$	P.486
A1.C7.6.2. Cálculo de $q_j$	P.487
A1.C7.6.3. Cálculo de $e_{ki}$	P.488
A1.C7.6.4. Cálculo de $\tau_{mk}$	P.489
A1.C7.6.5. Cálculo de $\beta_{ik}$	P.490
A1.C7.6.6. Cálculo de $\theta_k$	P.492
A1.C7.6.7. Cálculo de $s_k$	P.493
A1.C7.6.8. Cálculo de $J_i$	P.493
A1.C7.6.9. Cálculo de $L_i$	P.494
A1.C7.6.10. Cálculo del coeficiente de actividad combinatorio	P.494
A1.C7.6.11. Cálculo del coeficiente de actividad residual	P.495
A1.C7.6.12. Cálculo del coeficiente de actividad	P.495
A1.C7.7. Cálculo de la presión de saturación (2)	P.495
A1.C7.8. Cálculos de temperatura y coef. de actividad (2)	P.496
A1.C7.9. Cálculo de la presión de saturación (3)	P.497
A1.C7.10. Cálculo de la composición de vapor	P.497
A1.C7.11. Cálculo de los $\Phi_i$	P.498
A1.C7.11.1. Cálculo de temp reducidas puras y cruzadas	P.498
A1.C7.11.2. Cálculo de coeficientes viriales puros y cruzados	P.499
A1.C7.11.3. Cálculo de coeficientes delta puros y cruzados	P.500
A1.C7.11.4. Cálculo de volúmenes de líquido saturado	P.500
A1.C7.11.5. Cálculo de $\Phi_i$	P.500

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

### Índice general

---

A1.C7.12. Cálculo de la presión de saturación (4)	P.501
A1.C7.13. Cálculos de temperatura y coef. de actividad (3)	P.501
A1.C7.14. Comprobación de la convergencia	P.502
A1.C7.15. Datos de equilibrio	P.503
<b>ANEXO 2 (A2)</b>	
Capítulo A2.C1. Diseño de “SIMPLE”	P.507
A2.C1.1. Introducción	P.507
A2.C1.2. Balance y diseño de “SIMPLE”	P.509
A2.C1.3. Diseño hidromecánico de “SIMPLE”	P.526
A2.C1.3.1. Dimensionado hidráulico de la unidad de separación	P.527
A2.C1.3.2. Diseño mecánico (I). Determinación de la presión de diseño	P.540
A2.C1.3.3. Diseño mecánico (II). Determinación de espesores para el casco y los cabezales sometidos a presión interna	P.542
A2.C1.3.4. Diseño mecánico (III). Determinación del espesor del aislamiento y de la chapa envolvente	P.550
A2.C1.3.5. Diseño mecánico (IV). Determinación del espesor requerido para soportar la carga por viento	P.556
A2.C1.3.6. Diseño mecánico (V). Determinación del peso del aparato en operación	P.563
A2.C1.3.7. Diseño mecánico (VI). Determinación del espesor del faldón	P.570
A2.C1.3.8. Diseño mecánico (VII). Determinación del espesor requerido para soportar la carga sísmica	P.572
A2.C1.3.9. Diseño mecánico (VIII). Diseño del anillo de la base	P.577

---

A2.C1.3.10. Diseño mecánico (IX). Cálculo de las tubuladuras y peso del extractor de neblina	P.583
A2.C1.3.11. Diseño mecánico (X). Iteración de cálculos	P.595
A2.C1.3.12. Diseño mecánico (XI). Comprobaciones	P.603
A2.C1.3.13. Cálculo de orejas de izado y pintado del casco y cabezales	P.607
Capítulo A2.C2. Resolución de “EXTRACTIVA 1”	P.629
A2.C2.1. Introducción	P.629
A2.C2.2. Resolución de columna	P.631
Capítulo A2.C3. Resolución de “EXTRACTIVA 2”	P.649
A2.C3.1. Introducción	P.649
A2.C3.2. Resolución de columna	P.652
Capítulo A2.C4. Resolución de “MÚLTIPLE”	P.665
A2.C4.1. Introducción	P.665
A2.C4.2. Resolución de columna	P.668
Capítulo A2.C5. Resolución de “BINARIA”	P.681
A2.C5.1. Introducción	P.681
A2.C5.2. Resolución de columna	P.684
Capítulo A2.C6. Diseño de “RECUPERACIÓN”	P.701
A2.C6.1. Balance y diseño de “RECUPERACIÓN”	P.701
A2.C6.2. Diseño hidromecánico de “RECUPERACIÓN”	P.706
A2.C6.2.1. Dimensionado hidráulico de la unidad de separación	P.707
A2.C6.2.2. Diseño mecánico (I). Determinación de la presión de diseño	P.712

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

### Índice general

---

A2.C6.2.3. Diseño mecánico (II). Determinación de espesores para el casco y los cabezales sometidos a presión interna	P.713
A2.C6.2.4. Diseño mecánico (III). Determinación del espesor del aislamiento y de la chapa envolvente	P.714
A2.C6.2.5. Diseño mecánico (IV). Determinación del peso del aparato en operación	P.715
A2.C6.2.6. Diseño mecánico (V). Diseño del soporte	P.716
A2.C6.2.7. Diseño mecánico (VI). Cálculo de las tubuladuras y refuerzos	P.717
A2.C6.2.8. Cálculo de orejas de izado y pintado del casco y cabezales	P.722
Capítulo A2.C7. Estrategia de recirculaciones	P.729
<b>ANEXO 3 (A3)</b>	
Capítulo A3.C1. Diseño hidráulico de “EXTRACTIVA 1”	P.735
A3.C1.1. Datos previos	P.735
A3.C1.2. Determinación de propiedades físicas	P.739
A3.C1.2.1. Densidad de la fase líquida	P.739
A3.C1.2.2. Viscosidad de la fase líquida	P.740
A3.C1.2.3. Densidad de la fase vapor	P.743
A3.C1.2.4. Viscosidad de la fase vapor	P.747
A3.C1.2.5. Tensión superficial de corrientes	P.751
A3.C1.2.6. Difusividad del clave ligero en fase líquida	P.753
A3.C1.3. Diseño hidráulico	P.754
A3.C1.3.1. Recopilación y conversión de datos y propiedades	P.757

---

A3.C1.3.2. Determinación gráfica del nº de pasos por columna	P.759
A3.C1.3.3. Estimación de dimensiones previas	P.762
A3.C1.3.4. Fijación de los límites de operación	P.765
A3.C1.3.5. Cálculo reiterado de áreas de columna y otras dimensiones	P.767
A3.C1.3.6. Verificaciones de las magnitudes calculadas con los límites de operación	P.776
A3.C1.3.7. Estimación de las pérdidas de carga	P.784
A3.C1.4. Decisiones finales de diseño hidráulico	P.795
A3.C1.4.1. Determinación de eficacia por zonas	P.795
A3.C1.4.2. Decisión final de columna	P.802
A3.C1.4.3. Evaluación de alternativas	P.808
Capítulo A3.C2. Diseño hidráulico de "EXTRACTIVA 2"	P.821
A3.C2.1. Datos previos	P.821
A3.C2.2. Determinación de propiedades físicas	P.824
A3.C2.2.1. Densidad de la fase líquida	P.824
A3.C2.2.2. Viscosidad de la fase líquida	P.826
A3.C2.2.3. Densidad de la fase vapor	P.828
A3.C2.2.4. Viscosidad de la fase vapor	P.831
A3.C2.2.5. Tensión superficial de corrientes	P.834
A3.C2.2.6. Difusividad del clave ligero en fase líquida	P.836
A3.C2.3. Diseño hidráulico	P.837
A3.C2.3.1. Recopilación y conversión de datos y propiedades	P.839

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

### Índice general

---

A3.C2.3.2. Determinación gráfica del nº de pasos por columna	P.841
A3.C2.3.3. Estimación de dimensiones previas	P.842
A3.C2.3.4. Fijación de los límites de operación	P.844
A3.C2.3.5. Cálculo reiterado de áreas de columna y otras dimensiones	P.845
A3.C2.3.6. Verificaciones de las magnitudes calculadas con los límites de operación	P.849
A3.C2.3.7. Estimación de las pérdidas de carga	P.851
A3.C2.4. Decisiones finales de diseño hidráulico	P.855
A3.C2.4.1. Determinación de eficacia por zonas	P.855
A3.C2.4.2. Evaluación de alternativas	P.858
A3.C2.4.3. Decisión final de columna	P.870
Capítulo A3.C3. Diseño hidráulico de "MÚLTIPLE"	P.875
A3.C3.1. Datos previos	P.821
A3.C3.2. Determinación de propiedades físicas	P.878
A3.C3.2.1. Densidad de la fase líquida	P.878
A3.C3.2.2. Viscosidad de la fase líquida	P.880
A3.C3.2.3. Densidad de la fase vapor	P.881
A3.C3.2.4. Viscosidad de la fase vapor	P.884
A3.C3.2.5. Tensión superficial de corrientes	P.887
A3.C3.2.6. Difusividad del clave ligero en fase líquida	P.889
A3.C3.3. Diseño hidráulico	P.890
A3.C3.3.1. Recopilación y conversión de datos y propiedades	P.892

---

A3.C3.3.2. Determinación gráfica del nº de pasos por columna	P.894
A3.C3.3.3. Estimación de dimensiones previas	P.895
A3.C3.3.4. Fijación de los límites de operación	P.897
A3.C3.3.5. Cálculo reiterado de áreas de columna y otras dimensiones	P.898
A3.C3.3.6. Verificaciones de las magnitudes calculadas con los límites de operación	P.902
A3.C3.3.7. Estimación de las pérdidas de carga	P.904
A3.C3.4. Decisiones finales de diseño hidráulico	P.908
A3.C3.4.1. Determinación de eficacia por zonas	P.908
A3.C3.4.2. Evaluación de alternativas	P.912
A3.C3.4.3. Decisión final de columna	P.923
Capítulo A3.C4. Diseño hidráulico de "MÚLTIPLE"	P.929
A3.C4.1. Datos previos	P.929
A3.C4.2. Determinación de propiedades físicas	P.933
A3.C4.2.1. Densidad de la fase líquida	P.933
A3.C4.2.2. Viscosidad de la fase líquida	P.934
A3.C4.2.3. Densidad de la fase vapor	P.936
A3.C4.2.4. Viscosidad de la fase vapor	P.939
A3.C4.2.5. Tensión superficial de corrientes	P.942
A3.C4.2.6. Difusividad del clave ligero en fase líquida	P.943
A3.C4.3. Diseño hidráulico	P.944
A3.C4.3.1. Recopilación y conversión de datos y propiedades	P.946

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

### Índice general

---

A3.C4.3.2. Determinación gráfica del nº de pasos por columna	P.948
A3.C4.3.3. Estimación de dimensiones previas	P.949
A3.C4.3.4. Fijación de los límites de operación	P.951
A3.C4.3.5. Cálculo reiterado de áreas de columna y otras dimensiones	P.952
A3.C4.3.6. Verificaciones de las magnitudes calculadas con los límites de operación	P.956
A3.C4.3.7. Estimación de las pérdidas de carga	P.958
A3.C4.4. Decisiones finales de diseño hidráulico	P.962
A3.C4.4.1. Determinación de eficacia por zonas	P.962
A3.C4.4.2. Decisión final de columna	P.966
<b>ANEXO 4 (A4)</b>	
Capítulo A4.C1. Diseño mecánico de “EXTRACTIVA 1”	P.973
A4.C1.1. Introducción	P.973
A4.C1.2. Diseño mecánico de “EXTRACTIVA 1”	P.974
A4.C1.2.1. Diseño mecánico (I). Determinación de la presión de diseño	P.974
A4.C1.2.2. Diseño mecánico (II). Determinación de espesores para el casco, los cabezales y el cono reductor sometidos a presión interna	P.978
A4.C1.2.3. Diseño mecánico (III). Determinación del espesor del aislamiento y de la chapa envolvente	P.987
A4.C1.2.4. Diseño mecánico (IV). Determinación del espesor requerido para soportar la carga por viento	P.993
A4.C1.2.5. Diseño mecánico (V). Determinación del peso de los aparatos en operación	P.999
A4.C1.2.6. Diseño mecánico (VI). Determinación del espesor del faldón	P.1008

---

A4.C1.2.7. Diseño mecánico (VII). Determinación del espesor requerido para soportar la carga sísmica	P.1009
A4.C1.2.8. Diseño mecánico (VIII). Diseño del anillo de la base	P.1011
A4.C1.2.9. Diseño mecánico (IX). Cálculo de las tubuladuras y refuerzos	P.1015
A4.C1.2.10. Diseño mecánico (X). Iteración de cálculos	P.1027
A4.C1.2.11. Diseño mecánico (XI). Comprobaciones	P.1028
A4.C1.2.12. Cálculo de orejas de izado y pintado del casco y cabezales	P.1031
Capítulo A4.C2. Diseño mecánico de unidades principales	P.1039
A4.C2.1. Introducción	P.1039
A4.C2.2. Diseño mecánico de “EXTRACTIVA 2”	P.1040
A4.C2.2.1. Diseño mecánico (I). Determinación de la presión de diseño	P.1041
A4.C2.2.2. Diseño mecánico (II). Determinación de espesores para el casco y los cabezales	P.1042
A4.C2.2.3. Diseño mecánico (III). Determinación del espesor del aislamiento y de la chapa envolvente	P.1043
A4.C2.2.4. Diseño mecánico (IV). Determinación del espesor final requerido para soportar la carga por viento	P.1044
A4.C2.2.5. Diseño mecánico (V). Determinación del espesor final requerido para soportar la carga sísmica	P.1045
A4.C2.2.6. Diseño mecánico (VI). Determinación del peso final del aparato en operación	P.1045
A4.C2.2.7. Diseño mecánico (VII). Diseño final del anillo de la base	P.1046
A4.C2.2.8. Diseño mecánico (VIII). Cálculo de las tubuladuras y refuerzos	P.1047
A4.C2.2.9. Diseño mecánico (IX). Comprobaciones	P.1055

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

### Índice general

---

A4.C2.2.10. Cálculo de orejas de izado y pintado del casco y cabezales	P.1057
A4.C2.3. Diseño mecánico de “MÚLTIPLE”	P.1060
A4.C2.3.1. Diseño mecánico (I). Determinación de la presión de diseño	P.1061
A4.C2.3.2. Diseño mecánico (II). Determinación de espesores para el casco y los cabezales	P.1062
A4.C2.3.3. Diseño mecánico (III). Determinación del espesor del aislamiento y de la chapa envolvente	P.1063
A4.C2.3.4. Diseño mecánico (IV). Determinación del espesor final requerido para soportar la carga por viento	P.1064
A4.C2.3.5. Diseño mecánico (V). Determinación del espesor final requerido para soportar la carga sísmica	P.1065
A4.C2.3.6. Diseño mecánico (VI). Determinación del peso final del aparato en operación	P.1065
A4.C2.3.7. Diseño mecánico (VII). Diseño final del anillo de la base	P.1066
A4.C2.3.8. Diseño mecánico (VIII). Cálculo de las tubuladuras y refuerzos	P.1067
A4.C2.3.9. Diseño mecánico (IX). Comprobaciones	P.1074
A4.C2.3.10. Cálculo de orejas de izado y pintado del casco y cabezales	P.1076
A4.C2.4. Diseño mecánico de “BINARIA”	P.1079
A4.C2.4.1. Diseño mecánico (I). Determinación de la presión de diseño	P.1080
A4.C2.4.2. Diseño mecánico (II). Determinación de espesores para el casco y los cabezales	P.1081
A4.C2.4.3. Diseño mecánico (III). Determinación del espesor del aislamiento y de la chapa envolvente	P.1082
A4.C2.4.4. Diseño mecánico (IV). Determinación del espesor final	P.1083

---

requerido para soportar la carga por viento	
A4.C2.4.5. Diseño mecánico (V). Determinación del espesor final	P.1084
requerido para soportar la carga sísmica	
A4.C2.4.6. Diseño mecánico (VI). Determinación del peso final del	P.1084
aparato en operación	
A4.C2.4.7. Diseño mecánico (VII). Diseño final del anillo de la base	P.1085
A4.C2.4.8. Diseño mecánico (VIII). Cálculo de las tubuladuras	P.1086
y refuerzos	
A4.C2.4.9. Diseño mecánico (IX). Comprobaciones	P.1094
A4.C2.4.10. Cálculo de orejas de izado y pintado del casco y cabezales	P.1096
<b>ANEXO 5 (A5)</b>	
Capítulo A5.C1. Red de tuberías y bombeo	P.1103
A5.C1.1. Planteamiento general	P.1103
A5.C1.2. Descripción teórica	P.1104
A5.C1.2.1. Longitud de las conducciones	P.1104
A5.C1.2.2. Pérdida de carga por fricción	P.1106
A5.C1.2.3. Carga de altura	P.1108
A5.C1.2.4. Carga de presión	P.1109
A5.C1.2.5. Pérdida total de carga	P.1109
A5.C1.2.6. Potencia de bombeo estimada	P.1110
A5.C1.3. Tablas de resultados	P.1112
Capítulo A5.C2. Diseño de acumuladores de reflujo	P.1131
A5.C2.1. Introducción	P.1131
A5.C2.2. Dimensionado hidráulico	P.1131

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

### Índice general

---

A5.C2.3. Diseño mecánico	P.1135
A5.C2.3.1. Diseño mecánico (I). Determinación de la presión de diseño	P.1135
A5.C2.3.2. Diseño mecánico (II). Determinación de espesores para el casco y los cabezales sometidos a presión interna	P.1136
A5.C2.3.3. Diseño mecánico (III). Determinación del espesor del aislamiento y de la chapa envolvente	P.1136
A5.C2.3.4. Diseño mecánico (IV). Determinación del peso del aparato en operación	P.1137
A5.C2.3.5. Diseño mecánico (V). Diseño del soporte	P.1137
A5.C2.3.6. Diseño mecánico (VI). Cálculo de las tubuladuras y refuerzos	P.1139
A5.C6.3.7. Cálculo de orejas de izado y pintado del casco y cabezales	P.1140
Capítulo A5.C3. Estimación de cambiadores de calor	P.1143
A5.C3.1. Introducción	P.1143
A5.C3.2. Fundamento teórico	P.1143
A5.C3.2.1. Cálculo de calderines	P.1144
A5.C3.2.2. Cálculo de condensadores	P.1147
A5.C3.2.3. Cálculo de calentadores y refrigerantes	P.1149
A5.C3.3. Calores y áreas de intercambio	P.1150
Capítulo A5.C4. Dimensionado de tanques	P.1153
A5.C4.1. Diseño de los tanques cilíndricos	P.1153
A5.C4.2. Diseño del tanque esférico	P.1160

# Documento 1. Memoria

---

## Anexo 1. Generación de datos termodinámicos

1. **Fundamentación teórica del equilibrio**
2. **Equilibrio de fases para "SIMPLE"**
3. **Equilibrio de fases para "EXTRACTIVA 1"**
4. **Equilibrio de fases para "EXTRACTIVA 2"**
5. **Equilibrio de fases para "MÚLTIPLE"**
6. **Equilibrio de fases para "BINARIA"**
7. **Equilibrio de fases para "RECUPERACIÓN"**



---

### **Capítulo A1.C1. Fundamentación teórica del equilibrio**

El diseño de operaciones de separación conlleva, como paso previo, la obtención de datos de equilibrio químico para los componentes involucrados. Usualmente, en el caso de sistemas sobradamente conocidos en la industria química, estos datos se encuentran en la bibliografía emanada de tales procesos. Para el caso que ocupa este PFC, y tras una profunda revisión bibliográfica, al encontrarse ésta carente de datos concretos para el sistema de interés, se hace precisa la generación de datos de equilibrio a partir de la verificación del criterio fundamental del equilibrio termodinámico.

En este anexo se presentarán los procedimientos aplicados a la consecución del objetivo dado en el párrafo anterior. En el primer capítulo se expondrá una fundamentación teórica del concepto de equilibrio químico, conducente a la justificación del criterio fundamental del equilibrio. A continuación, se procurarán tantos capítulos como sistemas de componentes involucran las distintas unidades de separación requeridas, donde se mostrará el particular procedimiento seguido, así como los resultados cosechados.

De los datos de este anexo depende la aplicación de los métodos de diseño de las distintas operaciones de separación, de lo que se infiere el carácter preeminente del mismo y se justifica su posición como primer anexo de cálculo a la memoria del PFC.

El equilibrio termodinámico es aquél estado de los sistemas, (y entiéndase por sistema cualquier espacio finito del Universo), donde no se intercambia materia o energía netas con los alrededores, (esto es, el resto del Universo que no forma parte del sistema).

Por intercambio neto se entiende que la velocidad a la que el susodicho sistema intercambia materia o energía es constante. Por mostrar un ejemplo, se considera en equilibrio termodinámico un sistema cuando la velocidad a la que desaparece un componente, es la misma que la velocidad a la que se forma, (bien sea por reacción

química o por cambio de fase). Debe entenderse, por consiguiente, que no necesariamente tales velocidades de intercambio son nulas.

Centrando la cuestión, si se considera como sistema termodinámico el que forman el líquido y el vapor en las distintas unidades de separación, se puede constatar, que estos procesos transcurren sin reacción química, por lo que el estudio del equilibrio se centrará en estimar la composición de las distintas fases líquido y vapor, puesto que los componentes no desaparecen o se forman por reacción, sino que se mueven entre los sistemas abiertos, (que intercambian materia o energía), que constituyen las fases.

La primera ley de la termodinámica, puede enunciarse como sigue:

*“La energía total de un sistema es constante”*

**1ª Ley de la Termodinámica**

Por tanto, a cada forma de energía que desaparece, le corresponde una conversión en otra forma de tal manera, que la energía total del sistema permanezca invariante. Los dos mecanismos por los que un sistema intercambia energía corresponden al calor y al trabajo. De modo que puede establecerse como corolario de la primera ley que el calor perdido por un sistema aparece en forma de trabajo y viceversa. En términos matemáticos, la primera ley se escribe de la siguiente forma:

$$d(nU) = dQ + dW \text{ 1ª Ley Termodinámica (A1.1)}$$

Dicha expresión es la concreción del enunciado, puesto que la energía total de un sistema cerrado de  $n$  mol de sustancia,  $d(nU)$ , debida a la acumulación de energía por el estado de vibraciones, rotaciones y translaciones de los átomos; coincide con la variación de las energías en tránsito,  $dQ$  y  $dW$ , (calor y trabajo respectivamente), que provocan esa variación en el estado energético interno. La cantidad diferencial que varía la energía interna, debe coincidir con la suma de las variaciones de calor y trabajo intercambiado.

Para expresar la energía interna en función de nuevas variables, se hace preciso desarrollar los términos de trabajo y energía de la expresión (A1.1).

Por una parte, considerando que se realiza trabajo siempre que una fuerza provoca un desplazamiento no perpendicular a la misma, se tiene:

$$dW = Fdl(A1.2)$$

Donde la fuerza  $F$  produce un desplazamiento  $dl$ , en la misma dirección de aplicación. Si se considera un sistema donde un pistón ejerce presión sobre el mismo, la fuerza opuesta por éste coincide con el producto del área del pistón por la presión del sistema. Asimismo, el desplazamiento  $dl$  es el cociente entre el volumen del sistema y el área del pistón, por consiguiente al sustituir en (A1.2)

$$dW = PAd\left(\frac{V}{A}\right)$$

Simplificando:

$$dW = -PdV(A1.3)$$

Se entiende que el trabajo de compresión es positivo, puesto que se requiere la aportación de una fuerza externa que mantenga la presión, toda vez que la expansión del sistema se entiende como un trabajo negativo, ya que la presión del mismo es la que realiza el trabajo. En todo caso, se introduce el signo negativo según convenio IUPAC, que atiende al hecho de que el calor y el trabajo no pueden coincidir en signo simultáneamente para que se cumpla la primera ley.

Por otra parte, para desarrollar el término de calor, debe hacerse uso de la segunda ley de la termodinámica:

*“No es posible la completa conversión mutua de calor en trabajo”*  
**2ª Ley de la Termodinámica**

Ésta no es más que una de las aseveraciones que conlleva la segunda ley, si bien, es tal vez una de las más concisas. La segunda ley establece el concepto de eficacia de las máquinas térmicas, ya que si no todo el calor que absorbe un sistema puede rentabilizarse como trabajo entregado, debe entenderse que el calor restante fluye a los alrededores. Como consecuencia de lo anterior se estableció el teorema de *Carnot*. Dicho teorema sienta el estudio teórico de la segunda ley, al demostrar que las máquinas reales, irreversibles, nunca pueden superar en eficacia a la máquina térmica reversible de *Carnot*. La máquina de *Carnot* consiste, básicamente, en la sucesión en ciclo cerrado de cuatro etapas de compresión y expansión, esto es, intercambio de calor y trabajo desde un foco caliente a otro frío que pretende enfriarse y viceversa. Entre los desarrollos matemáticos, que por motivos de brevedad se omitirán, se encuentra la siguiente expresión que será el punto de partida para la expresión del calor en función de una nueva variable de estado:

$$\frac{|Q_{abs}|}{T_{FC}} = \frac{|Q_{ced}|}{T_{FF}} \quad (A1.4)$$

Donde el calor absorbido desde el foco caliente, (FC), debe coincidir con el calor cedido por el foco frío (FF) de la máquina de *Carnot*. Puesto que la máquina toma calor del foco caliente para calentar el frío y éste cede calor al caliente cuando se invierte el funcionamiento de la misma, prescindiendo de los valores absolutos se tiene:

$$\frac{Q_{abs}}{T_{FC}} = -\frac{Q_{ced}}{T_{FF}} \Rightarrow \frac{Q_{abs}}{T_{FC}} + \frac{Q_{ced}}{T_{FF}} = 0$$

Lo que, en términos diferenciales resulta:

$$\frac{dQ_{abs}}{T_{FC}} + \frac{dQ_{ced}}{T_{FF}} = 0$$

Considerando que la máquina de *Carnot* es un proceso reversible, al integrar sobre un ciclo reversible se tiene:

$$\oint \frac{dQ_{rev}}{T} = 0 \quad (A1.5)$$

Donde el círculo sobre la integral indica que ésta se aplica a una trayectoria cerrada, de modo que la suma de los calores de ciclo cerrado se representa como el calor reversible.

Como toda propiedad reversible, al integrarse sobre un ciclo cerrado, la sumatoria infinitesimal resulta nula, de lo que se deduce una nueva propiedad de estado: la entropía, que coincide con el integrando de (A1.5). De esta forma, el calor se puede expresar como sigue:

$$dQ_{rev} = TdS \quad (A1.6)$$

Para ampliar el concepto a sistemas irreversibles, puede eliminarse el subíndice “rev” de (A1.6), de modo que la integral (A1.5), no resultaría nula.

Con lo anterior, al sustituir (A1.3) y (A1.6) en (A1.1), esta última se reescribe como figura a continuación:

$$d(nU) = Td(nS) - Pd(nV) \quad (A1.7)$$

La ecuación (A1.7) es una combinación de la primera y la segunda ley. Dado que contiene propiedades que sólo dependen del estado del sistema, la aplicación de la ecuación no queda exclusivamente restringida al ámbito de los procesos reversibles. Por consiguiente (A1.7) es de aplicación siempre que suceda un cambio diferencial de las condiciones de equilibrio de un sistema cerrado.

El resto de propiedades termodinámicas: entalpía, H, entropía S, y las energías libres de *Helmholtz* y *Gibbs*, A y G respectivamente, pueden originarse a partir de (A1.7) a partir de las correspondientes definiciones. A la sazón, el razonamiento seguido requiere las siguientes:

$$(A1.8) \begin{cases} H = U + PV & (1) \\ G = H - TS & (2) \end{cases}$$

Estas definiciones se originan como agrupaciones de variables frecuentes a la hora de manipular expresiones termodinámicas. Es por ello que, al combinar variables de estado se definiera una nueva variable de estado que simplificase las expresiones. Trabajando sobre (A1.8.1), y tomando como base un mol de sustancia, esto es, empleando unidades molares, se deduce:

$$dH = dU + VdP + PdV$$

Introduciendo  $dU$ , en unidades molares, de la expresión (A1.7):

$$dH = TdS - PdV + VdP + PdV$$

Ergo:

$$dH = TdS + VdP \quad (A1.9)$$

Al introducir (A1.9) en (A1.8.2) en términos diferenciales se obtiene:

$$dG = dH - SdT - TdS = TdS + VdP - SdT - TdS$$

De donde:

$$dG = VdP - SdT \quad (A1.10)$$

De esta forma, se han generado expresiones de  $H$  y  $G$ , funciones de estado, a partir de la expresión de  $U$ . En particular, dado que  $G$  es función de  $P$  y  $T$ , se tiene en ésta una propiedad termodinámica de gran interés, ya que la  $P$  y la  $T$  suponen las variables más tangibles de un sistema. Por tal motivo, la expresión (A1.10) será utilizada con frecuencia, directa o indirectamente, a partir de este punto en la formulación del equilibrio.

El resto de propiedades termodinámicas son asimismo susceptibles de referirse como funciones de P y T. En particular, interesa a este capítulo la formulación de H y S como funciones de tales variables.

Previo a ello, debe presentarse la siguiente propiedad matemática:

$$df(x_1 \dots x_n) = \sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right) dx_i \right] \text{Diferencial total (A1.11)}$$

El diferencial total de una función de varias variables, es la suma finita de las derivadas parciales de la función respecto de cada variable multiplicadas por el diferencial de cada variable. Atendiendo a esto, si desea escribir la entalpía como una función de T y P, se tendrá lo que sigue:

$$dH = \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_P dT + \left( \frac{\partial H}{\partial P} \right)_T dP \text{(A1.12)}$$

Los subíndices de las derivadas parciales indican que la otra variable se considera constante. Será preciso dilucidar el valor de cada una de las derivadas parciales.

Si se considera la ecuación (A1.1) en términos molares, sobre la que se ha sustituido (A1.3), al despejar dQ se tiene:

$$dQ = dU - dW = dU + PdV$$

Si la presión es constante, P puede introducirse en el diferencial de V:

$$dQ = dU + dPV = d(U + PV) = dH \text{(A1.13)}$$

De donde se infiere que la entalpía coincide con el calor intercambiado en un proceso isobárico. Teniendo que no todas las sustancias poseen la misma capacidad para intercambiar calor, se defi-

ne la capacidad calorífica como la variación del calor involucrado respecto de la temperatura de la misma, esto es:

$$c = \frac{dQ}{dT} \quad (A1.14)$$

Siendo  $c$  la capacidad calorífica de la sustancia en cuestión. De esta forma, si el calor se intercambia a presión constante,  $Q$  coincide con  $H$  y puede reescribirse (A1.14) como:

$$c_p = \left( \frac{dH}{dT} \right)_p \quad (A1.15)$$

Expresado en otros términos, la variación de la entalpía respecto de la temperatura resulta la capacidad calorífica del sistema isobárico. Esta derivada es idéntica a la primera parcial de la ecuación (A1.12), por lo que queda ésta resuelta.

Para obtener la segunda, será necesario derivar (A1.9) con respecto a la presión, a  $T$  constante:

$$\left( \frac{\partial H}{\partial P} \right)_T = T \left( \frac{\partial S}{\partial P} \right)_T + V \left( \frac{\partial P}{\partial P} \right)_T = T \left( \frac{\partial S}{\partial P} \right)_T + V \quad (A1.16)$$

Donde ha aparecido una nueva derivada parcial, cuya expresión en función de términos sencillos no es evidente. Para este menester será preciso considerar una propiedad de la ecuación (A1.10). Esta ecuación supone en términos matemáticos lo que se conoce como ecuación diferencial exacta, cuya forma y propiedad se notan a continuación:

$$(A1.17) \left\{ \begin{array}{l} df = \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right) dx + \left( \frac{\partial f}{\partial y} \right) dy = Mdx + Ndy \quad (1) \\ \left( \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x} \right) = \left( \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \right) \Rightarrow \left( \frac{\partial M}{\partial y} \right) = \left( \frac{\partial N}{\partial x} \right) \quad (2) \end{array} \right.$$

La expresión (A1.17.1), es la expresión general de una ecuación diferencial exacta. Como puede corroborarse, la ecuación

(A1.10) cumple con esta definición. La línea segunda de (A1.17) especifica la propiedad de las ecuaciones diferenciales exactas: las derivadas parciales cruzadas, (derivadas segundas primero respecto de una variable y luego respecto de la otra); de la función son coincidentes. Por tanto particularizando (A1.10), se obtiene:

$$(A1.18) \left\{ \begin{array}{l} dG = VdP - SdT \text{ (A1.10)} \\ V = \left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_T ; S = -\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_P \text{ (1)} \\ \left(\frac{\partial^2 G}{\partial T \partial P}\right) = \left(\frac{\partial^2 G}{\partial P \partial T}\right) \Rightarrow \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P = -\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T \text{ (2)} \end{array} \right.$$

De donde (A1.18.2) es una de las conocidas como relaciones de *Maxwell*, que se establecen como necesarias a la hora de reescribir las expresiones de las variables de estado como funciones de T y P. Sustituyendo ésta última en (A1.16) e introduciendo tal sustitución junto a (A1.15) en (A1.12), la entalpía se expresa finalmente como:

$$dH = c_p dT + \left[ V - T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \right] dP \text{ (A1.19)}$$

Que es función de P y T, dependiente de una derivada parcial relativamente sencilla, puesto que son conocidas expresiones para la determinación de propiedades volumétricas de las sustancias.

Una vez formulada la entalpía como función de P y T, se mencionó *ut supra* la necesidad de efectuar lo propio con la entropía. Partiendo de (A1.8), en términos diferenciales y (A1.13), y combinando con (A1.6), despejado dS; puede escribirse:

$$(A1.20) \left\{ \begin{array}{l} dS = \frac{dQ}{T} \text{ (A1.6)} \\ dH = dU + VdP + PdV \Rightarrow dU = dH - VdP - PdV \text{ (A1.8)} \\ dQ = dU + PdV \text{ (A1.13)} \\ dQ = dH - VdP \Rightarrow dS = \frac{dH}{T} - \frac{V}{T} dP \text{ (1)} \end{array} \right.$$

Donde se ha introducido (A1.8), con dU despejado, en (A1.13) para obtener dQ. Al introducir éste en (A1.6), se logra la relación de

$dS$  con funciones conocidas. La entalpía se ha encontrado relacionada con  $P$  y  $T$  en (A1.19), por lo que introduciendo esta ecuación en (A1.20.1) se obtiene:

$$(A1.21) \left\{ \begin{array}{l} dH = c_p dT + \left[ V - T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \right] dP \quad (A1.19) \\ dS = \frac{dH}{T} - \frac{V}{T} dP \quad (A1.20.1) \\ dS = \frac{dH}{T} - \frac{V}{T} dP = \frac{1}{T} \left[ c_p dT + \left[ V - T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \right] dP \right] - \frac{V}{T} dP \quad (1) \end{array} \right.$$

Simplificando (A1.21.1):

$$dS = \frac{c_p}{T} dT - \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P dP \quad (A1.22)$$

Con la entalpía y la entropía relacionadas con  $P$  y  $T$ , puede proseguirse el razonamiento para la obtención del criterio fundamental del equilibrio.

La ecuación (A1.10) es una relación válida de la energía libre de un fluido de una sola fase en un sistema cerrado sin reacción química. De ahí que se haya simplificado el término de  $n$  mol, ya que este no es variante en un sistema cerrado. Sin embargo, en las operaciones de separación que se diseñan en este PFC, los sistemas termodinámicos están constituidos por dos fases que intercambian abiertamente materia. Es por ello, que la energía libre ahora pasa a depender de la composición de cada especie del sistema, por lo que (A1.10) debe reescribirse atendiendo a este hecho:

$$(A1.23) \left\{ \begin{array}{l} dG = VdP - SdT \quad (A1.10) \\ nG = f(P, T, n_1 \dots n_n) \quad (1) \\ d(nG) = \left[ \frac{\partial(nG)}{\partial P} \right]_{T,n} dP + \left[ \frac{\partial(nG)}{\partial T} \right]_{P,n} dT + \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial(nG)}{\partial n_i} \right]_{P,T,n_j} dn_i \quad (2) \end{array} \right.$$

Donde, al incluir en la diferencial total el número de mol de cada sustancia, se tiene una suma finita de tantos términos como componentes contenga el sistema. El subíndice "j" del sumatorio indica

que en cada sumando, permanecen constantes todos los números de mol excepto aquél que se deriva. El argumento del sumatorio es lo suficientemente importante como para asignarle símbolo y nombre: se define potencial químico,  $\mu_i$ , a la derivada parcial de la energía libre respecto del número de mol de cada sustancia, con el resto de variables constantes. Considerando también el valor de las derivadas parciales de la energía libre respecto de P y T, dado por (A1.10), la ecuación resulta:

$$d(nG) = (nV)dP - (nS)dT + \sum_{i=1}^n \mu_i dn_i \quad (A1.24)$$

Donde esta ecuación constituye la estructura fundamental de la termodinámica del sistema de componentes bifásico. En las destilaciones, una serie de componentes migra de una fase a otra por razón de su volatilidad. Por consiguiente, el sistema termodinámico es cerrado y constituido a su vez por dos sistemas abiertos, las fases líquido y vapor, a los que se puede aplicar la ecuación (A1.24):

$$(A1.25) \begin{cases} d(nG)^V = (nV)^V dP - (nS)^V dT + \sum_{i=1}^n \mu_i^V dn_i^V & (1) \\ d(nG)^L = (nV)^L dP - (nS)^L dT + \sum_{i=1}^n \mu_i^L dn_i^L & (2) \end{cases}$$

Donde los superíndices "V" y "L" identifican las fases líquido y vapor. Teniendo en cuenta que en equilibrio P y T son constantes, la suma de (A1.25.1) y (A1.25.2) resulta:

$$d(nG) = (nV)dP - (nS)dT + \sum_{i=1}^n \mu_i^V dn_i^V + \sum_{i=1}^n \mu_i^L dn_i^L$$

La ecuación (A1.10) era válida para sistemas cerrados como es el caso, de donde es necesario que:

$$\sum_{i=1}^n \mu_i^V dn_i^V + \sum_{i=1}^n \mu_i^L dn_i^L = 0$$

De modo que se verifique (A1.10) en la situación de equilibrio. Considerando ahora que los diferenciales de composición resultan del intercambio de materia entre fases, para que se cumpla el principio de *Lavoisier* es preciso que:

$$dn_i^V = -dn_i^L$$

De donde:

$$\sum_{i=1}^n \mu_i^V dn_i^V + \sum_{i=1}^n \mu_i^L (-dn_i^V) = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^n (\mu_i^V - \mu_i^L) dn_i^V = 0$$

Por consiguiente, para que se verifique el sumatorio:

$$\mu_i^V - \mu_i^L = 0$$

Ergo:

$$\mu_i^V = \mu_i^L$$

Y en general, para sistemas de  $\pi$  enésimas fases:

$$\mu_i^\alpha = \mu_i^\beta = \dots = \mu_i^\pi \quad (A1.26)$$

Lo que se constituye en criterio de equilibrio termodinámico de fases: Múltiples fases a la misma presión y temperatura, se encuentran en equilibrio cuando el potencial químico de cada especie coincide en todas las fases.

En principio, el problema de la formulación del equilibrio queda resuelto, puesto que, conceptualmente, queda definido mediante (A1.26). Los datos de equilibrio son requeridos en las operaciones de separación dado que, en cada etapa, las distintas fases abandonan las mismas en situación de equilibrio. Por este motivo, debe dotarse

al criterio anterior de las expresiones conducentes a averiguar las condiciones de P, T y composición en que suceden las operaciones de separación etapa a etapa, a fin de dimensionar los equipos correspondientes.

Considérese la siguiente propiedad, generalizada a partir de la definición de potencial químico:

$$\tilde{M}_i = \left[ \frac{\partial(nM)}{\partial n_i} \right]_{P,T,n_j} \quad (A1.27)$$

Donde  $\tilde{M}_i$  es una propiedad molar parcial de especie i en disolución. Según esta definición, una propiedad parcial corresponde a la variación de la propiedad total, M, cuando se añade una cantidad diferencial del componente i. En particular, si se evalúa la energía libre molar parcial de un componente, aplicando (A1.27), se obtiene:

$$\tilde{G}_i = \left[ \frac{\partial(nG)}{\partial n_i} \right]_{P,T,n_j} \Rightarrow \mu_i = \tilde{G}_i \quad (A1.28)$$

Como puede comprobarse, la energía libre molar parcial forma parte de la expresión (A1.23.2), (el argumento del sumatorio), antes de ser sustituida por el potencial químico. Desarrollando en función de términos conocidos, podrá encontrarse una relación para la estimación de los datos de equilibrio. Considérese:

$$\tilde{G}_i^{GI} = \tilde{H}_i^{GI} - T\tilde{S}_i^{GI} \quad (A1.29)$$

Se trata de la extensión de la definición (A1.8.2), de la energía libre, a las propiedades parciales. En este caso, como inicio del razonamiento, es conveniente suponer que el sistema es una mezcla de gases ideales, (lo que se indica mediante el superíndice "GI"), por simplicidad a la hora de sustituir funciones volumétricas. Para un sistema de *n* fases, la evaluación de la energía libre molar parcial de cada componente en cada fase, equivale a dilucidar el potencial químico correspondiente y por ende, a establecer las relaciones

de equilibrio tal como se viene razonando. De esta forma, es necesario encontrar una relación a la entalpía y entropía molares parciales de la expresión (A1.29).

Tómese en consideración la siguiente ecuación:

$$\tilde{M}_i^{GI}(T, P) = M_i^{GI}(T, P_i) \text{ Teorema de Gibbs (A1.30)}$$

Es el conocido como teorema de *Gibbs*, que asevera el hecho de que una propiedad molar parcial, de una especie componente de una mezcla de gases ideales; coincide con la propiedad molar de la especie, como si de un gas ideal puro se tratase, a la temperatura de la mezcla y una presión igual a la presión parcial en la mezcla.

Este teorema encuentra justificación en la teoría cinético-molecular de los gases ideales: Si un gas ideal consta de moléculas imaginarias de volumen nulo que no interactúan entre sí, las propiedades para cada especie química deben ser independientes de la presencia de otras especies, por lo que, a la presión parcial en que se encuentren en la mezcla, cada especie posee un conjunto privado de propiedades.

En base al teorema de *Gibbs*, pueden expresarse la entalpía y entropía molares parciales en términos conocidos. Para el caso de la entalpía, se tiene:

$$\tilde{H}_i^{GI}(T, P) = H_i^{GI}(T, P_i) = H_i^{GI}(T, P) \Rightarrow \tilde{H}_i^{GI} = H_i^{GI} \text{ (A1.31)}$$

Dado que la entalpía de un gas ideal no depende de la presión, (como a continuación se demuestra), la entalpía molar parcial de un componente coincide con la entalpía molar del mismo compuesto como si fuese puro, a la temperatura y presión total de la mezcla.

Para demostrar la premisa anterior, recuérdese la expresión (A1.19), y en particular, el término que multiplica el diferencial de presión:

$$\left\{ \begin{array}{l} dH = c_p dT + \left[ V - T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \right] dP \text{ (A1.19)} \\ V^{GI} = \frac{RT}{P} \Rightarrow \left( \frac{\partial V^{GI}}{\partial T} \right)_P = \left( \frac{\partial}{\partial T} \left[ \frac{RT}{P} \right] \right)_P = \frac{R}{P} \\ dH^{GI} = c_p dT + \left[ V^{GI} - T \frac{R}{P} \right] dP = c_p dT + [V^{GI} - V^{GI}] dP = c_p dT \end{array} \right.$$

Ergo:

$$dH^{GI} = c_p dT \neq f(P) \text{ q. e. d.}$$

Se entiende que la entalpía y el volumen están referidos en términos molares, a fin de que las unidades sean coherentes.

Aplicando el teorema de *Gibbs*, se obtiene para la entropía molar parcial:

$$\tilde{S}_i^{GI}(T, P) = S_i^{GI}(T, P_i) \text{ (A1.32)}$$

Donde se requiere evaluar la entropía molar de compuesto puro, gas ideal, a la temperatura de la mezcla y su presión parcial correspondiente. Para ello, tómesese la expresión (A1.22) y particularícese para el caso de gas ideal:

$$(A1.33) \left\{ \begin{array}{l} dS = \frac{c_p}{T} dT - \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P dP \text{ (A1.22)} \\ V^{GI} = \frac{RT}{P} \Rightarrow \left( \frac{\partial V^{GI}}{\partial T} \right)_P = \left( \frac{\partial}{\partial T} \left[ \frac{RT}{P} \right] \right)_P = \frac{R}{P} \text{ (1)} \\ dS^{GI} = \frac{c_p}{T} dT - \frac{R}{P} dP \text{ (2)} \end{array} \right.$$

Tomando (A1.33.2) a T constante, se expresa la entropía molar de gas ideal como sigue:

$$dS^{GI} = -R d(\ln P)$$

De donde se obtiene, al integrar entre  $P_i$  y  $P$ :

$$(A1.34) \left\{ \begin{array}{l} \int_{S_i^{GI}(T, P_i)}^{S_i^{GI}(T, P)} dS_i^{GI} = -R \int_{P_i}^P d(\ln P) \quad (1) \\ S_i^{GI}(T, P) - S_i^{GI}(T, P_i) = -R \ln P + R \ln P_i \quad (2) \\ S_i^{GI}(T, P_i) = S_i^{GI}(T, P) - R \ln \frac{P_i}{P} = S_i^{GI}(T, P) - R \ln \frac{y_i P}{P} \quad (3) \\ S_i^{GI}(T, P_i) = S_i^{GI}(T, P) - R \ln y_i \quad (4) \end{array} \right.$$

En la expresión (A1.34.3), se ha cambiado  $P_i$  por  $y_i P$ , según la ley de *Dalton* para presión parcial y así expresar la entropía en función de la composición en el gas ideal. Sustituyendo (A1.34.4) en (A1.32), se obtiene:

$$\tilde{S}_i^{GI}(T, P) = S_i^{GI}(T, P) - R \ln y_i \quad (A1.35)$$

Esto es, la entropía molar parcial de un componente del sistema ideal, coincide con la entropía molar que presentaría si el sistema fuese puro en tal componente, a las mismas condiciones de temperatura y presión y que la mezcla; menos el término dependiente de la composición en la fase que corresponda. Con (A1.31) y (A1.35), puede reescribirse (A1.29) del siguiente modo:

$$\tilde{G}_i^{GI} = H_i^{GI} - T(S_i^{GI} - R \ln y_i) = H_i^{GI} - T S_i^{GI} + R T \ln y_i = G_i^{GI} + R T \ln y_i \quad (A1.36)$$

Donde se ha hecho por definición:

$$G_i^{GI} = H_i^{GI} - T S_i^{GI}$$

Siendo  $G_i^{GI}$  la energía libre del componente como si el sistema ideal fuese puro en tal componente. De esta forma, se encuentra según (A1.36) la relación existente entre la energía libre molar parcial del componente en la mezcla, con esta misma propiedad de compuesto puro. Tal propiedad se evalúa haciendo aplicación de (A1.10), en la forma que se muestra:

$$(A1.37) \begin{cases} dG = VdP - SdT (A1.10) \\ V^{GI} = \frac{RT}{P} (1) \\ dG^{GI} = \frac{RT}{P} dP - SdT (2) \end{cases}$$

Lo que a T constante produce:

$$dG^{GI} = RTd(\ln P)$$

Y al integrar:

$$G_i^{GI} = \Gamma_i(T) + RT \ln P (A1.38)$$

Donde  $\Gamma_i(T)$  es la constante de integración, que aparece necesariamente dependiente de T, al haberla supuesto constante previamente. De este modo, al introducir (A1.38) en (A1.36), se tiene:

$$\tilde{G}_i^{GI} = \Gamma_i(T) + RT \ln P + RT \ln y_i = \Gamma_i(T) + RT \ln(y_i P)$$

Teniendo en cuenta (A1.28), finalmente se logra:

$$\tilde{G}_i^{GI} = \mu_i^{GI} = \Gamma_i(T) + RT \ln(y_i P) (A1.39)$$

Una ecuación útil para el propósito de formular expresiones para el equilibrio en función de términos evaluables, como, a la sazón, suponen la presión y la composición. Según el razonamiento seguido, sería posible determinar la composición de enésimos componentes en  $\pi$  enésimas fases gaseosas, siempre que la mezcla, resista la modelización de gas ideal.

Los sistemas cuya composición se pretende determinar en este anexo, están constituidos por una cantidad variable de componentes, (desde seis hasta dos), repartidos en todo caso en dos fases: líquido y vapor no ideales. Por esta razón, se hace preciso generalizar la expresión (A1.39), de modo que sea capaz de aplicar al equilibrio de fases líquido-vapor requerido. En este punto, entra en juego una nueva variable: la fugacidad, que sentará la base definitiva para la

demostración del criterio fundamental del equilibrio termodinámico. La ecuación (A1.38) se puede generalizar, para fluidos reales, de la siguiente forma:

$$G_i = \Gamma_i(T) + RT \ln f_i \quad (A1.40)$$

Donde  $f_i$ , es la fugacidad de una especie pura  $i$ , con unidades de presión. Si se restan las expresiones (A1.40) y (A1.38), se obtendrá la energía libre residual, (notada con el superíndice "R"); esto es, la diferencia del valor de la propiedad entre un sistema real y el ideal:

$$(A1.41) \begin{cases} G_i - G_i^{GI} = RT \ln f_i - RT \ln P = RT \ln \frac{f_i}{P} \quad (1) \\ \phi_i = \frac{f_i}{P} \quad (2) \\ G_i^R = RT \ln \phi_i \quad (3) \end{cases}$$

Donde se ha introducido la definición (A1.41.2) del coeficiente de fugacidad: un número adimensional que completa la definición de fugacidad. Como se infiere por las expresiones de (A1.41), la fugacidad representa la desviación de un sistema de la idealidad. En el caso de que un sistema fuese ideal, la diferencia entre las energías de *Gibbs* resultaría nula, (puesto que coincidirían), así como la energía residual. De esta forma, el coeficiente de fugacidad, necesariamente debe adquirir el valor de la unidad, puesto que  $RT$  es un producto positivo distinto de cero. Atendiendo a la definición de coeficiente de fugacidad, el único caso para el que éste resulta la unidad, es que la fugacidad sea igual que la presión. En definitiva, cuanto más semejante sea la fugacidad a la presión del sistema, tanto más ideal es el anterior, luego el coeficiente de fugacidad se acercará a la unidad.

Era necesario explicitar convenientemente la significación de estas nuevas propiedades, previamente a la generalización a un sistema de múltiples componentes. También resulta bastante más sencillo, encontrar una relación para el coeficiente de fugacidad para el caso de un sistema puro y, con posterioridad generalizarla, que partir de una expresión generalizada. Por tal motivo, se mostrará en las si-

güentes líneas, el procedimiento para la obtención de la relación mencionada.

Una forma alternativa de la ecuación (A1.10) se puede obtener si se considera la siguiente identidad:

$$d\left(\frac{G}{RT}\right) = \frac{RTdG - RGdT}{(RT)^2} = \frac{1}{RT}dG - \frac{G}{RT^2}dT \quad (A1.42)$$

Si se introducen  $dG$  de (A1.10) y  $G$  de (A1.8.2) en (A1.42), se obtiene:

$$(A1.43) \left\{ \begin{aligned} d\left(\frac{G}{RT}\right) &= \frac{1}{RT}(VdP - SdT) - \frac{H - TS}{RT^2}dT = \frac{V}{RT}dP - \frac{S}{RT}dT - \frac{H}{RT^2} + \frac{S}{RT} \quad (1) \\ d\left(\frac{G}{RT}\right) &= \frac{V}{RT}dP - \frac{H}{RT^2} \text{ Función generadora (2)} \end{aligned} \right.$$

La ecuación (A1.43.2) es la conocida función generadora, puesto que, a partir de esta, es posible encontrar el resto de propiedades termodinámicas por diferenciación de la energía libre, ya que, según la diferencial total:

$$(A1.44) \left\{ \begin{aligned} \frac{V}{RT} &= \left[ \frac{\partial(G/RT)}{\partial P} \right]_T \quad (1) \\ \frac{H}{RT} &= -T \left[ \frac{\partial(G/RT)}{\partial T} \right]_P \quad (2) \end{aligned} \right.$$

El resto de propiedades termodinámicas pueden obtenerse por relación algebraica con las dadas. Las expresiones de (A1.44), pueden extenderse a propiedades residuales. Por tanto, tomando (A1.44.1) y despejando, se tiene:

$$d\left(\frac{G^R}{RT}\right) = \frac{V^R}{RT}dP \quad (T \text{ cte}) \quad (A1.45)$$

Debe encontrarse una relación para el volumen residual. Considérese la propia definición del volumen residual, la definición del

factor de compresibilidad,  $Z$ , y la ecuación de los gases ideales. Operando, se logra:

$$(A1.46) \left\{ \begin{array}{l} Z = \frac{PV}{RT} \Rightarrow V = \frac{ZRT}{P} (1) \\ GI: Z = 1 \Rightarrow V^{GI} = \frac{RT}{P} (2) \\ V^R = V - V^{GI} = \frac{ZRT}{P} - \frac{RT}{P} (3) \\ V^R = \frac{RT}{P} (Z - 1) (4) \end{array} \right.$$

El factor de compresibilidad indica la desviación de la idealidad del volumen de los gases reales. Se definió como una modificación de la ecuación de los gases ideales, como un factor corrector del producto  $RT$ . Para el caso de un gas ideal, la desviación es nula, luego  $Z$  adquiere el valor de la unidad. Al sustituir (A1.46.4) en (A1.45) e integrar, se obtiene:

$$(A1.47) \left\{ \begin{array}{l} \frac{G^R}{RT} = \int_0^P \frac{V^R}{RT} dP = \int_0^P \frac{(RT/P)}{RT} (Z - 1) dP (1) \\ \frac{G^R}{RT} = \int_0^P (Z - 1) \frac{dP}{P} (2) \end{array} \right.$$

La ecuación para el coeficiente de fugacidad se logra cuando se despeja éste de (A1.41.3) y se sustituye (A1.47.2):

$$(A1.48) \left\{ \begin{array}{l} \frac{G^R}{RT} = \ln \phi_i (A1.41.3) \\ \ln \phi_i = \int_0^P (Z_i - 1) \frac{dP}{P} (1) \end{array} \right.$$

De donde se observa que los coeficientes de fugacidad, y por ende las fugacidades, de gases puros se evalúan a partir de datos de  $P$ ,  $V$  y  $T$ . La ecuación (A1.48), debe extenderse para una mezcla de componentes, lo que se efectuará con posterioridad.

A continuación se sigue profundizando en la formulación del equilibrio general. Como puede observarse, el razonamiento seguido

en este capítulo, sigue una secuencia ascendente, desde el sistema más sencillo hasta el más complejo. En base a lo ya deducido, se está en condiciones de ampliar la ecuación (A1.40), válida para un componente puro gaseoso. Si se tiene un sistema puro compuesto por dos fases líquido-vapor, la citada ecuación puede escribirse para cada fase como sigue:

$$(A1.49) \begin{cases} G_i^V = \Gamma_i(T) + RT \ln f_i^V (1) \\ G_i^L = \Gamma_i(T) + RT \ln f_i^L (2) \end{cases}$$

Si en un sistema cerrado bifásico puro una cantidad diferencial de líquido cambia a fase vapor, a P y T constantes, la ecuación (A1.10) indica que, para n mol de sustancia  $d(nG)=0$ . Por consiguiente, para que se satisfaga lo anterior, es necesario que las energías libres de cada fase sean coincidentes, puesto que, de lo contrario, el sistema no estaría en equilibrio. De esta forma al restar (A1.49.2) de (A1.49.1), la diferencia debe resultar nula y se obtiene:

$$(A1.50) \begin{cases} G_i^V - G_i^L = RT \ln f_i^V - RT \ln f_i^L = RT \ln \frac{f_i^V}{f_i^L} (1) \\ f_i^V = f_i^L = f_i^0 (2) \end{cases}$$

Donde la única opción para que la diferencia de energías libres resulte nula, consiste en que el logaritmo se anule y por tanto las fugacidades en cada fase coincidan. Es este un nuevo criterio de equilibrio: una especie pura está en equilibrio de fases cuando presenta la misma P, T y fugacidad en cada fase.

Puesto que en equilibrio las fugacidades son coincidentes en cada fase, cuando sea preciso dilucidar el valor de una fugacidad de líquido de sustancia pura, esta podrá hallarse como si la de un vapor se tratase, lo que facilita los cálculos. Por ese motivo, se ha definido una nueva fugacidad,  $f_i^0$ , de saturación, válida para las dos fases cuando están en equilibrio.

Cuando el sistema no se encuentra en equilibrio, debe definirse la diferencia entre las energías libres cuando el sistema está com-

primido y cuando está saturado, según la ecuación (A1.10) a T constante:

$$(A1.51) \left\{ \begin{array}{l} dG = VdP - SdT \text{ (A1.10)} \\ G_i - G_i^0 = \int_{P_i^0}^P V_i dP \text{ (1)} \end{array} \right.$$

Análogamente a (A1.50.1), puede escribirse:

$$G_i - G_i^0 = RT \ln \frac{f_i}{f_i^0} \text{ (A1.52)}$$

Igualando (A1.51.1) y (A1.52) y operando se encuentra:

$$(A1.53) \left\{ \begin{array}{l} \ln \frac{f_i}{f_i^0} = \frac{1}{RT} \int_{P_i^0}^P V_i dP = \frac{V_i^L (P - P_i^0)}{RT} \text{ (1)} \\ \phi_i^0 = \frac{f_i^0}{P_i^0} \Rightarrow f_i^0 = \phi_i^0 P_i^0 \text{ (2)} \\ f_i = \phi_i^0 P_i^0 e^{\frac{V_i^L (P - P_i^0)}{RT}} \text{ (3)} \end{array} \right.$$

Donde se ha considerado el volumen de líquido una función muy débil de la presión, por lo que se ha tomado constante e igual al volumen molar de líquido saturado. De forma análoga a (A1.41.2), se ha definido el coeficiente de fugacidad de saturación. La exponencial que multiplica en (A1.53.3), es conocida como factor o exponencial de *Poynting*.

El razonamiento alcanza el punto final deseado, al poder extender las ecuaciones para el caso más general. Para un sistema de  $\pi$  enésimos componentes repartidos en  $\pi$  enésimas fases, se alcanzó como criterio de equilibrio lo expresado en (A1.26). La ecuación (A1.39), recoge una aproximación a la idealidad, que permite obtener los potenciales químicos de los distintos componentes de una mezcla de gases ideales. Ampliando el concepto a una mezcla de fases no necesariamente gaseosas, puede reescribirse (A1.39) como sigue:

$$\mu_i = \Gamma_i(T) + RT \ln(\hat{f}_i) \text{ (A1.54)}$$

Donde, se introduce  $\hat{f}_i$ , la fugacidad parcial del componente  $i$  en las distintas fases. Puesto que se ha hecho coincidir con  $y_iP$ , *sensu stricto*, no corresponde a una propiedad molar parcial, por ello se nota con un circunflejo y no con una tilde, como se venía escribiendo hasta este punto. Particularizando al equilibrio líquido-vapor, haciendo uso de (A1.54), y aplicando el criterio de equilibrio de los potenciales químicos se deduce:

$$(A1.55) \left\{ \begin{array}{l} \mu_i^\alpha = \mu_i^\beta = \dots = \mu_i^\pi \Rightarrow \mu_i^V = \mu_i^L \Rightarrow \mu_i^V - \mu_i^L = 0(1) \\ \mu_i^V - \mu_i^L = RT \ln \frac{\hat{f}_i^V}{\hat{f}_i^L} (2) \\ \hat{f}_i^V = \hat{f}_i^L (3) \end{array} \right.$$

El razonamiento es análogo al seguido en (A1.50) y se desprende que, en general:

$$\hat{f}_i^\alpha = \hat{f}_i^\beta = \dots = \hat{f}_i^\pi (A1.56)$$

Lo que supone que múltiples fases a idéntica  $P$  y  $T$ , se encuentran en equilibrio, cuando son coincidentes las fugacidades parciales de cada especie en cada fase. Se trata del criterio general del equilibrio y definitivo a la sazón para la aplicación requerida en el presente anexo. El propósito inicial del capítulo quedará satisfecho cuando se encuentre la expresión de (A1.56), en función de términos conocidos.

Se sigue la obtención de expresiones para el cálculo de la fugacidad parcial de componentes en fase vapor y en fase líquido. Considérense para el primer caso las expresiones (A1.54) y (A1.39). Al restar la segunda a la primera se obtiene:

$$(A1.57) \left\{ \begin{array}{l} \mu_i - \mu_i^{GI} = \tilde{G}_i - \tilde{G}_i^{GI} = \tilde{G}_i^R = RT \ln \frac{\hat{f}_i}{y_iP} (1) \\ \hat{\phi}_i = \frac{\hat{f}_i}{y_iP} (2) \\ \tilde{G}_i^R = RT \ln \hat{\phi}_i (3) \end{array} \right.$$

Donde se ha introducido la definición del coeficiente de fugacidad parcial,  $\hat{\phi}_i$ , de forma similar a como se han definido los coeficientes de fugacidad para la especie pura y de saturación. Se han cambiado los potenciales químicos por energías libres molares parciales, según la definición de (A1.28) y, asimismo, se ha aplicado la definición de propiedad residual, dada en (A1.41).

De (A1.57.3) se deduce lo siguiente, atendiendo a la definición de (A1.27) de propiedad parcial:

$$\tilde{G}_i^R = \left[ \frac{\partial(nG^R)}{\partial n_i} \right]_{P,T,n_j} \quad (A1.58)$$

De modo que, al despejar el coeficiente de fugacidad parcial de (A1.57.3), se encuentra:

$$\ln \hat{\phi}_i = \frac{\tilde{G}_i^R}{RT} \Rightarrow \ln \hat{\phi}_i = \left[ \frac{\partial(nG^R/RT)}{\partial n_i} \right]_{P,T,n_j} \quad (A1.59)$$

Lo que permitirá relacionar el coeficiente de fugacidad parcial con datos de P, V y T, de la misma forma en que se ligó al coeficiente de fugacidad para especies puras. Tomando (A1.47.2) y operando, se determina:

$$(A1.60) \left\{ \begin{array}{l} \frac{G^R}{RT} = \int_0^P (Z - 1) \frac{dP}{P} \Rightarrow \frac{nG^R}{RT} = \int_0^P (nZ - n) \frac{dP}{P} \quad (1) \\ \left[ \frac{\partial(nG^R/RT)}{\partial n_i} \right]_{P,T,n_j} = \ln \hat{\phi}_i = \int_0^P \left[ \frac{\partial(nZ - n)}{\partial n_i} \right]_{P,T,n_j} \frac{dP}{P} \quad (2) \\ \left[ \frac{\partial(nZ - n)}{\partial n_i} \right]_{P,T,n_j} = \left[ \frac{\partial(nZ)}{\partial n_i} \right]_{P,T,n_j} - \left[ \frac{\partial n}{\partial n_i} \right]_{P,T,n_j} = \tilde{Z}_i - 1 \quad (3) \\ \ln \hat{\phi}_i = \int_0^P (\tilde{Z}_i - 1) \frac{dP}{P} \quad (4) \end{array} \right.$$

De (A1.60.1) a (A1.60.2) se ha diferenciado respecto del número de mol con el resto de variables constantes. En (A1.60.3) se ha aplicado la regla de la suma para separar derivadas: la primera co-

responde a la definición de propiedad parcial, por lo que se ha sustituido ésta en (A1.60.4).

Con lo anterior, es posible calcular la fugacidad parcial de los distintos componentes en fase vapor, siempre que se conozcan datos de P, V y T. Antes de desarrollar expresiones para el cálculo de los coeficientes de fugacidad, se planteará un procedimiento paralelo al empleado recientemente, a fin de dilucidar la fugacidad parcial de los componentes en fase líquido.

Partiendo de la ecuación (A1.36), para fase líquido puede escribirse:

$$\tilde{G}_i^{DI} = G_i + RT \ln x_i \quad (A1.61)$$

Donde el superíndice "DI", indica disolución ideal por analogía al gas ideal. A la sazón, se ha cambiado la fracción molar  $y_i$  por  $x_i$ , propia de las soluciones de líquidos. Al introducir la expresión (A1.40), válida para fluidos reales, en (A1.61) se tiene:

$$(A1.62) \begin{cases} \tilde{G}_i^{DI} = G_i + RT \ln x_i = \Gamma_i(T) + RT \ln f_i + RT \ln x_i & (1) \\ \mu_i^{DI} = \tilde{G}_i^{DI} = \Gamma_i(T) + RT \ln(x_i f_i) & (2) \end{cases}$$

Siguiendo el razonamiento, al restarse (A1.62.2) de (A1.54), se obtendrá una expresión para la fugacidad parcial del lado líquido:

$$(A1.63) \begin{cases} \mu_i^L = \tilde{G}_i^L = \Gamma_i(T) + RT \ln(\hat{f}_i^L) & (1) \\ \tilde{G}_i^L - \tilde{G}_i^{DI} = RT \ln \frac{\hat{f}_i^L}{x_i f_i} & (2) \end{cases}$$

Donde (A1.63.1) es la particularización de (A1.54), válida para fluidos reales, a una fase líquida. La diferencia del primer miembro de la ecuación (A1.63.2), es una expresión similar a la que en el lado vapor se denominó propiedad residual. En este caso, dado que las soluciones líquidas se tratan con propiedades medidas por su exceso de la solución ideal, de forma análoga, se define como propiedad de exceso, notada por el superíndice "E". Asimismo, el argumento del

logaritmo puede definirse como una propiedad en sí, el coeficiente de actividad,  $\gamma_i$ . Por tanto, (A1.63), se reescribe como sigue:

$$\tilde{G}_i^E = RT \ln \gamma_i \quad (A1.64)$$

La fugacidad parcial del lado líquido viene dada por:

$$\gamma_i = \frac{\hat{f}_i^L}{x_i f_i} \quad (A1.65)$$

Donde deben determinarse tanto la fugacidad de sustancia pura, como el coeficiente de actividad. La primera se calcula como si la fugacidad de un vapor se tratara, en lugar de aplicar expresiones para lado líquido, haciendo uso de la expresión anteriormente deducida (A1.53.3). El segundo deberá encontrarse por relación con la energía libre de exceso como se indicará más adelante.

Recapitulando hasta este punto, se han encontrado expresiones para las fugacidades parciales del líquido y el vapor, de donde aplicando el criterio dado en (A1.56), por igualación de (A1.57.2) y (A1.65), se encuentra:

$$(A1.66) \left\{ \begin{array}{l} \hat{f}_i^V = \hat{f}_i^L (1) \\ \hat{f}_i^V = \hat{\phi}_i y_i P; \hat{f}_i^L = \gamma_i x_i f_i (2) \\ \hat{\phi}_i y_i P = \gamma_i x_i f_i (3) \end{array} \right.$$

Cambiando  $f_i$  por (A1.53.3) y reagrupando:

$$(A1.67) \left\{ \begin{array}{l} \hat{\phi}_i y_i P = \gamma_i x_i f_i = \gamma_i x_i \phi_i^0 P_i^0 e^{\frac{v_i^L(P-P_i^0)}{RT}} (1) \\ \frac{\hat{\phi}_i}{\phi_i^0} e^{-\left[\frac{v_i^L(P-P_i^0)}{RT}\right]} y_i P = \gamma_i x_i P_i^0 (2) \\ \frac{\hat{\phi}_i}{\phi_i^0} e^{-\left[\frac{v_i^L(P-P_i^0)}{RT}\right]} = \Phi_i (3) \end{array} \right.$$

Ergo:

$$y_i \Phi_i P = \gamma_i x_i P_i^0$$

**Criterio fundamental del equilibrio termodinámico**

Se ha encontrado la expresión general para el equilibrio líquido-vapor que ocupa este primer capítulo. Para concluir, es necesario desarrollar expresiones para determinar tanto el coeficiente de fugacidad, como el de actividad.

Se parte de la expresión (A1.60.4), que quedó pendiente de desarrollo en base a datos de P, V y T:

$$\ln \hat{\phi}_i = \int_0^P (\tilde{Z}_i - 1) \frac{dP}{P} \quad (A1.60.4)$$

Por definición, en (A1.60.3) se tiene:

$$\tilde{Z}_i = \left[ \frac{\partial(nZ)}{\partial n_i} \right]_{P,T,n_j} \quad (A1.60.3)$$

De donde se hace precisa una expresión para Z que se adecúe a las condiciones de P y T requeridas por los sistemas. La ecuación seleccionada será la del virial, una ecuación que consiste en un desarrollo en serie de potencias del factor de compresibilidad. Su expresión general es la que sigue:

$$Z = 1 + B'P + C'P^2 + D'P^3 + \dots \quad (A1.68)$$

Como todo desarrollo en potencias de una función, debe truncarse en un término, de tal forma que la representación sea razonablemente cercana a la realidad. A la sazón se truncará en el segundo término, puesto que el comportamiento PVT resulta adecuadamente modelado hasta una presión de 15 atmósferas. La ecuación del virial truncada en el segundo coeficiente resulta:

$$Z = 1 + \frac{BP}{RT}, \text{ con } B' = \frac{B}{RT} \quad (A1.69)$$

El segundo coeficiente virial, B, para una mezcla es una función de la temperatura y la composición, dada por la mecánica estadística y que responde a la siguiente regla de mezclado:

$$B = \sum_i \sum_j y_i y_j B_{ij} \text{ Regla general de mezclado (A1.70)}$$

El doble sumatorio considera la interacción de todas las especies presentes en el equilibrio dos a dos. Los subíndices “i” y “j” identifican las especies cubriéndolas todas. El coeficiente virial cruzado,  $B_{ij}$ , caracteriza la interacción entre cada par de moléculas “i” y “j”, de donde  $B_{ij}$  coincide con  $B_{ji}$ . Asimismo, los coeficientes  $B_{ii}$  o  $B_{jj}$  son coeficientes viriales de sustancia pura, por lo que pueden notarse indistintamente como  $B_i$ , siendo i la especie que corresponda.

De esta forma, el desarrollo de (A1.70) depende sólo de la composición y de los coeficientes viriales cruzados, que a su vez son función de T. La complejidad de las expresiones de B, dependerá del número de componentes de cada sistema.

Para el caso de un sistema binario, el desarrollo de la regla de mezclado proporciona:

$$\begin{cases} B = y_1 y_1 B_{11} + y_1 y_2 B_{12} + y_2 y_1 B_{21} + y_2 y_2 B_{22} = y_1^2 B_{11} + 2y_1 y_2 B_{12} + y_2^2 B_{22} \\ B_{ij} = B_{ji} \end{cases}$$

Expresión que puede escribirse también como:

$$\begin{aligned} B &= y_1(1 - y_2)B_{11} + 2y_1 y_2 B_{12} + y_2(1 - y_1)B_{22} \\ &= y_1 B_{11} - y_1 y_2 B_{11} + 2y_1 y_2 B_{12} + y_2 B_{22} - y_1 y_2 B_{22} \end{aligned}$$

Y que se reagrupa según:

$$\begin{cases} B = y_1 B_{11} + y_2 B_{22} + y_1 y_2 \delta_{12} \\ \delta_{12} = 2B_{12} - B_{11} - B_{22} \end{cases}$$

Finalmente, escribiendo en función de  $n_i$ , se tiene:

$$(A1.71) \begin{cases} B = \frac{n_1}{n} B_{11} + \frac{n_2}{n} B_{22} + \frac{n_1 n_2}{n^2} \delta_{12} \Rightarrow nB = n_1 B_{11} + n_2 B_{22} + \frac{n_1 n_2}{n} \delta_{12} (1) \\ y_i = n_i/n (2) \end{cases}$$

Expresión que será conveniente para el desarrollo que sigue a partir de la ecuación (A1.60.3). En primer lugar se diferencia el factor de compresibilidad según ésta última:

$$(A1.72) \begin{cases} \tilde{Z}_i = \left[ \frac{\partial(nZ)}{\partial n_i} \right]_{P,T,n_j} = 1 + \frac{P}{RT} \left[ \frac{\partial(nB)}{\partial n_i} \right]_{T,n_j} (1) \\ Z = 1 + \frac{BP}{RT} \Rightarrow nZ = n + \frac{nBP}{RT} (2) \end{cases}$$

La derivada de (A1.72.1) se practica a temperatura constante, a fin de considerar los coeficientes viriales constantes. Seguidamente se introduce (A1.72.1) en (A1.60.4) y se integra:

$$\begin{aligned} \ln \hat{\phi}_i &= \int_0^P \left( 1 + \frac{P}{RT} \left[ \frac{\partial(nB)}{\partial n_i} \right]_{T,n_j} - 1 \right) \frac{dP}{P} \\ &= \frac{1}{RT} \int_0^P \left[ \frac{\partial(nB)}{\partial n_i} \right]_{T,n_j} dP = \frac{P}{RT} \left[ \frac{\partial(nB)}{\partial n_i} \right]_{T,n_j} \end{aligned} \quad (A1.73)$$

Para el ejemplo binario, se requiere derivar (A1.71) según (A1.73), para cada una de las sustancias:

$$\left\{ \begin{array}{l} nB = n_1 B_{11} + n_2 B_{22} + \frac{n_1 n_2}{n} \delta_{12} (A1.71.1) \\ n = n_1 + n_2 \Rightarrow \left[ \frac{\partial n}{\partial n_i} \right] = 1 (A1.60.3) \\ 1 = \sum_i y_i \\ \left[ \frac{\partial(nB)}{\partial n_1} \right]_{T,n_2} = B_{11} + \left( \frac{n_2 n - n_1 n_2}{n^2} \right) \delta_{12} = B_{11} + \frac{n_2}{n} \left( 1 - \frac{n_1}{n} \right) \delta_{12} \\ \left[ \frac{\partial(nB)}{\partial n_2} \right]_{T,n_1} = B_{22} + \left( \frac{n_1 n - n_1 n_2}{n^2} \right) \delta_{12} = B_{22} + \frac{n_1}{n} \left( 1 - \frac{n_2}{n} \right) \delta_{12} \end{array} \right.$$

Aplicando (A1.71.2) y considerando que las composiciones de las especies 1 y 2 de un sistema binario suman la unidad, se simplifican las derivadas como sigue:

$$(A1.74) \begin{cases} \left[ \frac{\partial(nB)}{\partial n_1} \right]_{T,n_2} = B_{11} + y_2(1 - y_1)\delta_{12} = B_{11} + y_2^2\delta_{12} (1) \\ \left[ \frac{\partial(nB)}{\partial n_2} \right]_{T,n_1} = B_{22} + y_1(1 - y_2)\delta_{12} = B_{22} + y_1^2\delta_{12} (2) \end{cases}$$

Introduciendo las derivadas de (A1.74) en (A1.73), se generan dos expresiones para cada coeficiente de fugacidad parcial:

$$(A1.75) \begin{cases} \ln \hat{\phi}_1 = \frac{P}{RT} \left[ \frac{\partial(nB)}{\partial n_1} \right]_{T,n_2} = \frac{P}{RT} (B_{11} + y_2^2\delta_{12}) (1) \\ \ln \hat{\phi}_2 = \frac{P}{RT} \left[ \frac{\partial(nB)}{\partial n_2} \right]_{T,n_1} = \frac{P}{RT} (B_{22} + y_1^2\delta_{12}) (2) \end{cases}$$

De modo que al generalizar para mezclas de múltiples componentes:

$$\ln \hat{\phi}_i = \frac{P}{RT} \left[ B_{ii} + \frac{1}{2} \sum_k \sum_j y_k y_j (2\delta_{ki} - \delta_{kj}) \right] (A1.76)$$

Donde los subíndices “k” y “j” cubren todas las especies y los coeficientes delta cruzados se definen por:

$$(A1.77) \begin{cases} \delta_{ki} = 2B_{ki} - B_{kk} - B_{ii} (1) \\ \delta_{ij} = 2B_{ij} - B_{ii} - B_{jj} (2) \\ \delta_{ii} = \delta_{kk} = \dots = 0 (3) \\ \delta_{ik} = \delta_{ki}, \delta_{ij} = \delta_{ji}, etc. \end{cases}$$

Se requiere también el cálculo del coeficiente de fugacidad de sustancias puras. Tómese en consideración la ecuación (A1.48.1), análoga a la aplicada anteriormente para la determinación del coeficiente de fugacidad parcial. Considerando la definición del factor de compresibilidad por la ecuación del virial, tal como se da en (A1.69) y operando, se obtiene:

$$(A1.78) \left\{ \begin{array}{l} Z_i = 1 + \frac{B_{ii}P}{RT} \quad (1) \\ \ln \phi_i = \int_0^P (Z_i - 1) \frac{dP}{P} = \int_0^P \left( 1 + \frac{B_{ii}P}{RT} - 1 \right) \frac{dP}{P} = \frac{B_{ii}P}{RT} \quad (2) \end{array} \right.$$

Donde el coeficiente virial cruzado es dependiente de la temperatura, por tanto constante respecto de la presión. Expresados los coeficientes de fugacidad de sustancia pura y parcial, el término  $\Phi_i$  de la ecuación del criterio fundamental del equilibrio termodinámico se escribe:

$$(A1.79) \left\{ \begin{array}{l} \hat{\phi}_i = e^{\frac{P}{RT} \left[ B_{ii} + \frac{1}{2} \sum_k \sum_j y_k y_j (2\delta_{ki} - \delta_{kj}) \right]} \quad (1) \\ \phi_i^0 = e^{\frac{B_{ii}P_i^0}{RT}} \quad (2) \\ \Phi_i = \frac{\hat{\phi}_i}{\phi_i^0} e^{-\left[ \frac{V_i^L(P-P_i^0)}{RT} \right]} = \frac{e^{\frac{P}{RT} \left[ B_{ii} + \frac{1}{2} \sum_k \sum_j y_k y_j (2\delta_{ki} - \delta_{kj}) \right]}}{e^{\frac{B_{ii}P_i^0}{RT}}} e^{-\left[ \frac{V_i^L(P-P_i^0)}{RT} \right]} \quad (3) \\ \Phi_i = e^{\frac{(P - P_i^0)(B_{ii} - V_i^L) + P \left[ \frac{1}{2} \sum_k \sum_j y_k y_j (2\delta_{ki} - \delta_{kj}) \right]}{RT}} \quad (4) \end{array} \right.$$

Se requieren expresiones para determinar tanto la presión de saturación,  $P_i^0$ , como los coeficientes viriales cruzados y puros,  $B_{ij}$  y  $B_{ii}$  respectivamente, además del volumen de líquido saturado,  $V_i^L$ .

Para conocer la presión de saturación de un vapor con su líquido a una T dada, es de aplicación la ecuación de *Antoine*, ampliamente usada en ingeniería. Se trata de una correlación de números adimensionales, conocidos como parámetros o coeficientes, (indistintamente), de *Antoine*, con la temperatura. Dado que en la bibliografía consultada se han encontrado correlaciones en distintas unidades para cada componente, se remite a los capítulos subsiguientes del presente anexo su particularización según los distintos sistemas en juego.

Para los coeficientes viriales, se empleará, (indistintamente tanto si los coeficientes son puros o cruzados), la correlación de *Pitzer* para el segundo coeficiente del virial, extendida a coeficientes viriales cruzados:

$$(A1.80) \left\{ \begin{array}{l} B_{ij}^*(L/mol) = \frac{RT_{cij}}{P_{cij}} (B_{ij}^0 + \omega_{ij}B_{ij}^1) \quad (1) \\ B_{ij}^0 = 0,083 - \frac{0,422}{T_{rij}^{1,6}} \quad (2) \\ B_{ij}^1 = 0,139 - \frac{0,172}{T_{rij}^{4,2}} \quad (3) \end{array} \right.$$

Donde se precisan las siguientes reglas de combinación propuestas por *Prausnitz*, para la determinación de las propiedades críticas<sup>†</sup> y reducidas<sup>‡</sup> cruzadas:

$$(A1.81) \left\{ \begin{array}{l} \text{Reglas de combinación de Prausnitz} \left\{ \begin{array}{l} T_{cij} = (1 - k_{ij}) \sqrt{(T_{ci}T_{cj})} \quad (1) \\ P_{cij} = \frac{Z_{cij}RT_{cij}}{V_{cij}} \quad (2) \\ Z_{cij} = \frac{Z_{ci} + Z_{cj}}{2} \quad (3) \\ V_{cij} = \left( \frac{\sqrt[3]{V_{ci}} + \sqrt[3]{V_{cj}}}{2} \right)^3 \quad (4) \\ \omega_{ij} = \frac{\omega_{ci} + \omega_{cj}}{2} \quad (5) \end{array} \right. \\ T_{rij} = \frac{T}{T_{cij}} \quad (6) \end{array} \right.$$

Donde cada magnitud acompañada del subíndice "ij", es la magnitud cruzada correspondiente a la interacción de cada par de sustancias en el equilibrio que se trate. Por su parte,  $k_{ij}$ , es un parámetro de interacción empírico, usualmente despreciable cuando los

\*  $B_{ij}$  es igual a un  $RT/P$  por un producto adimensional. El primero posee unidades de volumen molar.

† Todo fluido en condiciones de  $P$  y  $T$  superiores a las críticas se encuentra en estado supercrítico. Las propiedades críticas constituyen la frontera para este comportamiento.

‡ La propiedad reducida es la razón entre la propiedad del fluido y la crítica. Da idea de la cercanía de un fluido de su estado supercrítico.

sistemas están constituidos por especies de similares propiedades químicas.

Las magnitudes críticas para sustancia pura, se obtienen de la bibliografía, mientras que, por definición, las magnitudes reducidas corresponden al cociente entre la temperatura del sistema y, bien la temperatura crítica de una sustancia pura, (temperatura reducida pura), bien la temperatura crítica cruzada de un par de especies componentes del equilibrio, (temperatura reducida cruzada).

Las reglas de combinación, tanto como la correlación generalizada para el segundo coeficiente virial, son particularmente válidas para sustancias puras cuando se hacen coincidir los subíndices cruzados.

Por último, se requiere una expresión adecuada para el cálculo de los volúmenes de líquido saturado. La ecuación pertinente es la de *Rackett*, que volverá a ser aplicada dentro de las secciones correspondientes a estimación de propiedades del anexo de diseño hidráulico. Sea la ecuación de *Rackett*:

$$V_i^L = V_{ci} Z_{ci}^{(1-T_{ri})^{0,2857}} \quad (A1.82)$$

Ecuación que se halla en función del volumen y el factor de compresibilidad críticos, así como de la temperatura reducida.

Con las expresiones mostradas, sólo resta para finalizar el capítulo presentar un método para el cálculo del coeficiente de actividad. Como se desprende de la ecuación (A1.64), la evaluación de los datos de energía libre molar parcial de exceso para una mezcla líquida, proporciona valores del coeficiente de actividad:

$$\ln \gamma_i = \frac{\tilde{G}_i^E}{RT} = g \quad (A1.64)$$

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

La ecuación *UNIQUAC*<sup>\*</sup>, trata a  $g$  como suma de dos adiciones: un término combinatorio  $g^C$ , que considera el tamaño de las moléculas y sus diferencias de forma, y un término residual  $g^R$ , (que no es propiedad residual como se viene definiendo), que considera las interacciones intermoleculares. Se escribe según:

$$g = g^C + g^R \text{ Ecuación } \textit{UNIQUAC} \text{ (A1.83)}$$

La formulación emanada de la ecuación *UNIQUAC* es dependiente de parámetros experimentales. Por ese motivo, es más útil el método *UNIFAC*<sup>†</sup>, que se basa en la consideración de una mezcla líquida como solución de las unidades estructurales componentes de las moléculas, más que de las propias moléculas. Estas unidades estructurales, son denominadas subgrupos y son designadas por números “ $k$ ”. Son propiedades de estos subgrupos el volumen relativo,  $R_k$  y el área superficial relativa,  $Q_k$  y sus valores están listados junto al número  $k$  de subgrupo correspondiente en tablas de parámetros de subgrupo *UNIFAC* como la que sigue:

PARÁMETROS DE SUBGRUPO <i>UNIFAC</i>	“Alcanos”				“Furfural”	“Metilpirrolidona”
	<i>GRUPO PRINCIPAL</i>	1				30
<i>SUBGRUPO</i>	$CH_3$	$CH_2$	CH	C	Furfural	NMP
	1	2	3	4	61	85
VOLUMEN RELATIVO $R_k$	0,9011	0,6744	0,4469	0,2195	3,1680	3,9810
ÁREA SUPERFICIAL RELATIVA $Q_k$	0,8480	0,5400	0,2280	0,0000	2,4810	3,2000

Tabla. A1.I. Parámetros de subgrupo *UNIFAC*

\* *UNI*versal *QU*asi *C*hemical, modelo experimental para la estimación de coeficientes de actividad, publicado por *Abrams* y *Prausnitz* en 1975.

† *UNI*versal *F*unctional *A*ctivity *C*oefficient, modelo semi-empírico para la determinación de coeficientes de actividad de sustancias no electro-líticas en soluciones no ideales. Publicado por *Fredenslund*, *Jones* y *Prausnitz* en 1975.

Cuando es posible construir una molécula a partir de más de un conjunto de subgrupos, el conjunto correcto deberá contener el menor número de subgrupos diferentes. La ventaja del método *UNIFAC*, radica en la posibilidad de combinar un número elevado de moléculas a partir de unos pocos y sencillos subgrupos. Se prefiere al desarrollo de la ecuación *UNIQUAC*, porque aquél permite estimar una gran cantidad de datos de actividad para diversos sistemas sin requerir datos experimentales.

Como se puede observar en la Tabla A1.I, se han presentado únicamente los subgrupos que serán requeridos en los siguientes capítulos. No obstante, los coeficientes de actividad no sólo dependen de las propiedades  $R_k$  y  $Q_k$  tabuladas, sino también de las interacciones entre los distintos subgrupos.

Los subgrupos similares se han asignado a un grupo principal, notado por su nombre y número, de modo que todos los subgrupos pertenecientes al mismo grupo principal se consideran no interactuantes entre sí. Por tal razón, los parámetros que caracterizan las interacciones de grupo se identifican con pares de grupos principales. Los parámetros de interacción se notan  $a_{mk}$  y se presentan a continuación aquellos que serán de aplicación en capítulos ulteriores:

<b>UNIFAC: Parámetros <math>a_{mk}</math></b>	"Alcano"	"Furfural"	"Metilpirrolidona"
<i>GRUPO PRINCIPAL</i>	1	30	44
1	0,000	354,600	220,300
30	-25,310	0,000	0,000
44	13,890	0,000	0,000

Tabla. A1.II. Parámetros de interacción *UNIFAC*

El método *UNIFAC*, basado en la ecuación *UNIQUAC*, se desarrolla en base a la siguiente expresión:

$$\ln \gamma_i = \ln \gamma_i^C + \ln \gamma_i^R \quad (A1.84)$$

Para la que se precisan las dos siguientes:

$$(A1.85) \begin{cases} \ln \gamma_i^C = 1 - J_i + \ln J_i - 5q_i \left( 1 - \frac{J_i}{L_i} + \ln \frac{J_i}{L_i} \right) & (1) \\ \ln \gamma_i^R = q_i \left[ 1 - \sum_k \left( \theta_k \frac{\beta_{ik}}{s_k} - e_{ki} \ln \frac{\beta_{ik}}{s_k} \right) \right] & (2) \end{cases}$$

Estas expresiones dependen de una serie de variables que se definen a continuación:

$$(A1.86) \begin{cases} r_i = \sum_k v_k^{(i)} R_k & (1) \\ q_i = \sum_k v_k^{(i)} Q_k & (2) \\ J_i = \frac{r_i}{\sum_j r_j x_j} & (3) \\ L_i = \frac{q_i}{\sum_j q_j x_j} & (4) \\ e_{ki} = \frac{v_k^{(i)} Q_k}{q_i} & (5) \\ \tau_{mk} = e^{-\frac{a_{mk}}{T}} & (6) \\ \beta_{ik} = \sum_m e_{mi} \tau_{mk} & (7) \\ \theta_k = \frac{\sum_i x_i q_i e_{ki}}{\sum_j x_j q_j} & (8) \\ s_k = \sum_m \theta_m \tau_{mk} & (9) \end{cases}$$

El subíndice “*i*” designa a las especies y “*j*” es un subíndice ficticio que cubre todas las especies. El subíndice “*k*” identifica los subgrupos que correspondan mientras que “*m*” es el subíndice ficticio que se ocupa en todos los subgrupos. El término  $v_k^{(i)}$  es el número de subgrupos *k* en una especie *i*. Por último, los parámetros de subgrupo  $R_k$  y  $Q_k$ , y de interacción  $a_{mk}$  se encuentran tabulados en las tablas A1.I y A1.II.

El método *UNIFAC* queda completamente descrito y con él, se ha proporcionado el instrumento matemático necesario para describir el equilibrio termodinámico. Queda por consiguiente cerrado este primer capítulo, base de los siguientes, donde se particularizarán las expresiones a cada uno de los sistemas de componentes involucrados en las distintas unidades de separación.



**Capítulo A1.C2. Equilibrio de fases para “SIMPLE”**

En este segundo capítulo del anexo de datos termodinámicos, se procurarán las composiciones de equilibrio a las condiciones requeridas en la operación “SIMPLE”. Dado que en el anexo de diseño de unidades se explicitará la idiosincrasia de dicha operación, en este capítulo únicamente se desarrollarán al caso correspondiente, las expresiones obtenidas en el capítulo anterior.

La generación de datos de equilibrio es un proceso cíclico donde, en función de datos conocidos, se reiteran los cálculos tanto como sea preciso para lograr una convergencia en el criterio fundamental del equilibrio termodinámico. El procedimiento se muestra en la figura siguiente:

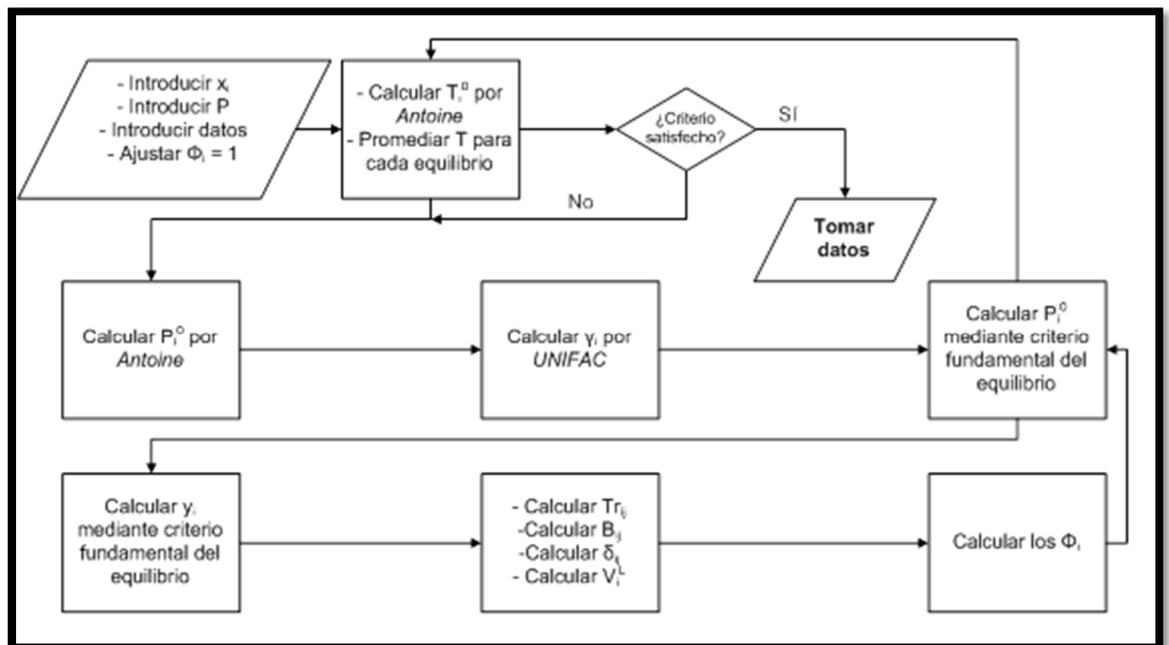


Figura. A1.1. Ciclo iterativo para la determinación del equilibrio. (Elaboración propia)

Donde se tiene una iteración en doble bucle, primero para los coeficientes de actividad y luego para la composición del vapor.

Si se introducen la composición de la fase líquida y la presión de equilibrio, junto con los datos que se especificarán ulteriormente, y se supone la idealidad del sistema, haciendo los coeficientes de fu-

gacidad iguales a la unidad; puede iniciarse el ciclo determinándose la temperatura del equilibrio. Conocida la temperatura, pueden obtenerse tanto las presiones de saturación de los componentes, como los coeficientes de actividad. Estos se introducen en la ecuación del criterio fundamental del equilibrio termodinámico, dada en el capítulo anterior, para recalcularse las presiones de saturación, y con éstas se recalculan la temperatura del equilibrio y los coeficientes de actividad, cuyo cálculo se reiterará cada vez que lo haga el de la temperatura. Esto cierra el primer ciclo.

Seguidamente, conocida la última presión de saturación, pueden determinarse las composiciones de vapor en el equilibrio e iniciar un proceso por el que se determinen los coeficientes de fugacidad.

Con estos dilucidados, se recalcula la presión de saturación y se inicia un nuevo ciclo. Una vez se ha determinado la nueva presión de saturación, puede plantearse el cálculo de los miembros de la ecuación del criterio fundamental del equilibrio termodinámico. Si la coincidencia de los mismos es razonable, se da por concluido el proceso y se toman como datos de equilibrio la composición del líquido introducida y la última generada del vapor por este procedimiento. La temperatura del equilibrio es, *ibídem*, la última generada. Caso contrario, se reinicia el ciclo hasta lograr la convergencia en el criterio.

Como ha podido observarse, hasta el punto no se ha particularizado en ningún sistema. Ello es debido a que el ciclo iterativo es válido para cualquier cálculo de equilibrio de fases, para el que se conocen la presión y composición de la fase líquida y se pretende encontrar la composición de la fase vapor y la temperatura del equilibrio. El objetivo del capítulo presente estriba en desarrollar y particularizar el ciclo dado en la Figura A1.1. A este fin, se establecerán tantas secciones como pasos requiere el procedimiento.

### **A1.C2.1. Introducción de la composición de la fase líquida**

La selección de datos de composición de la fase líquida se establece en base a la composición de la alimentación de la operación. Dado que "SIMPLE" constituye la primera operación del tren de separación, su alimentación es la del proceso global y su composición se refiere en la siguiente tabla:

$(x_0)_1$	$(x_0)_2$	$(x_0)_3$	$(x_0)_4$	$(x_0)_5$	$(x_0)_6$
0,439	0,256	0,157	0,103	0,036	0,010
<b>Composición molar de la alimentación</b>					

Tabla. A1.III. Composición de la corriente  $L_0$ , alimentación de "SIMPLE"

Donde los componentes son los que se enumeran seguidamente:

1. 1,3-Butadieno ( $C_4H_6$ ).
2. Isobuteno ( $C_4H_8$ ).
3. 1-Buteno ( $C_4H_8$ ).
4. Cis-2-buteno ( $C_4H_8$ ).
5. Isobutano ( $C_4H_{10}$ ).
6. Butano ( $C_4H_{10}$ ).

La ordenación de los componentes se ha realizado por preeminencia en composición de la alimentación, en lugar de por volatilidades crecientes, como es habitual en el tratamiento de datos de equilibrio. Como puede comprobarse, el componente minoritario es el butano, por lo que es el que se pretende eliminar mediante la presente operación.

Dado que la destilación simple consiste en vaporizar un líquido en una sola etapa, las corrientes líquido y vapor emanadas de la operación forman un equilibrio, por lo que deberá plantearse un abanico de posibilidades, a la hora de seleccionar el dato de equilibrio que definirá las composiciones de las corrientes separadas.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

De acuerdo con lo anterior, se introducirá una serie de valores de composición de líquido que oscilarán entre los valores de la alimentación, puesto que en una etapa de separación no es de esperar, máxime para un sistema de componentes semejantes en propiedades, una variación de la composición exacerbada. Las composiciones de líquido introducidas se listan en la siguiente tabla:

Nº Equilibrio	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$
1	0,000	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200
2	0,438	0,245	0,155	0,122	0,030	0,010
3	0,434	0,244	0,154	0,121	0,029	0,017
4	0,430	0,242	0,153	0,121	0,029	0,024
5	0,427	0,241	0,153	0,120	0,028	0,032
6	0,423	0,239	0,152	0,119	0,028	0,039
7	0,419	0,238	0,151	0,119	0,027	0,046
8	0,415	0,237	0,150	0,118	0,027	0,053
9	0,412	0,235	0,149	0,117	0,026	0,061
10	0,408	0,234	0,148	0,117	0,026	0,068
11	0,404	0,233	0,148	0,116	0,025	0,075
12	0,400	0,231	0,147	0,115	0,024	0,082
13	0,396	0,230	0,146	0,115	0,024	0,089
14	0,393	0,228	0,145	0,114	0,023	0,097
15	0,389	0,227	0,144	0,113	0,023	0,104
16	0,385	0,226	0,143	0,113	0,022	0,111
17	0,381	0,224	0,143	0,112	0,022	0,118
18	0,378	0,223	0,142	0,111	0,021	0,126
19	0,374	0,221	0,141	0,111	0,021	0,133
20	0,370	0,220	0,140	0,110	0,020	0,140
21	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabla. A1.IV. Lista de composiciones de fase líquida

Los componentes más volátiles vaporizarán selectivamente, por lo que es de esperar un líquido menos concentrado en tales sustancias. De la misma forma, los compuestos más pesados, (o menos volátiles), enriquecerán preferentemente el líquido. Por este motivo,

considerando los datos de temperaturas de ebullición normal introducidos para el cálculo del equilibrio, (véase apartado A1.C2.3.3), se ha decidido incrementar el valor de  $x_i$  respecto a la composición de la alimentación para algunos componentes, y viceversa para otros; introduciéndose 21 datos para los que se generarán tantos cálculos, obteniéndose la temperatura del equilibrio y la composición de su vapor.

### **A1.C2.2. Introducción de la presión de equilibrio**

La presión se introduce como dato considerando la temperatura del equilibrio que generará. Una presión elevada aumenta la temperatura de los equilibrios, puesto que se fuerza a los componentes a permanecer en fase líquida a una misma temperatura de referencia.

La presión baja incrementa la volatilidad del sistema, por lo que disminuye la temperatura del equilibrio y favorece la separación.

La idiosincrasia del sistema en juego obliga a obtener una solución de compromiso: De un lado, un defecto de presión, pese a coadyuvar una mejor separación, disminuye la temperatura hasta límites no operativos, (en torno 0 °C). Por otro lado, un exceso de presión aumenta el coste por sobredimensionamiento mecánico.

De esta forma, la solución intermedia se establecerá en base a la temperatura del equilibrio: aquella presión que garantice una temperatura similar a la ambiente será tomada como la presión del sistema como criterio optimizador.

La vía para averiguar el extremo antedicho, consiste en la ecuación de *Antoine*. Se prueba con una presión, (atmosférica para comenzar), y se obtiene la temperatura de saturación de los componentes, despejando convenientemente de la ecuación, (se mostrarán en subsiguientes secciones los usos de la ecuación de *Antoine*). Al promediar cada una de las temperaturas de saturación se obtiene una temperatura del equilibrio, (que no coincidirá con la final puesto

que se trata de la primera de varias iteraciones, si bien proporciona una aproximación razonable).

Tras varias pruebas, se llega a la conclusión de que una presión de 2,5 atm concuerda con una temperatura de los equilibrios próxima a la ambiental, como se mostrará en próximas tablas. Por tanto, la elección de la presión queda fijada en:

$$\boxed{P = 2,5 \text{ atm}}$$

### **A1.C2.3. Introducción de datos**

Los datos que requerirá la generación de composiciones de equilibrio son los que se enumeran seguidamente:

- Parámetros *UNIFAC*
  - o Parámetros de subgrupo,  $R_k$  y  $Q_k$ .
  - o Número de subgrupos,  $\nu_k^{(i)}$ .
  - o Parámetros de interacción,  $a_{mk}$ .
- Coeficientes de *Antoine*,  $A_i$ ,  $B_i$  y  $C_i$ .
- Propiedades críticas
  - o Temperatura crítica,  $T_{ci}$ .
  - o Presión crítica,  $P_{ci}$ .
  - o Volumen crítico,  $V_{ci}$ .
  - o Factor de compresibilidad crítico,  $Z_{ci}$ .
  - o Factor acéntrico\* crítico,  $\omega_{ci}$ .
- Otras propiedades
  - o Peso molecular,  $PM_i$ .
  - o Temperatura normal de ebullición,  $T_i^0$  (normal).
  - o Parámetro  $k_{ij}$  de interacción, (véase capítulo anterior).
  - o Constante universal de los gases,  $R$  en (atm·L/mol·K).
- Reglas de *Prausnitz*, (véase capítulo anterior).

---

\* El factor acéntrico es la base del teorema de los estados correspondientes: Todos los fluidos, comparados a la misma  $P$  y  $T$  reducidas, presentan el mismo valor de  $Z$  si poseen el mismo  $\omega$ . Se trata de una medida de la desviación de la idealidad de las sustancias.

Tales datos junto a sus particularidades, se presentan en los siguientes apartados en forma tabular, junto a las oportunas acotaciones.

#### A1.C2.3.1. Parámetros UNIFAC

Previa consigna de los parámetros es preciso desglosar en sus subgrupos constituyentes, cada una de las moléculas de las especies del sistema en cuestión. En la figura que sigue, se presentan los componentes de la alimentación de la operación "SIMPLE", por sus fórmulas desarrolladas:

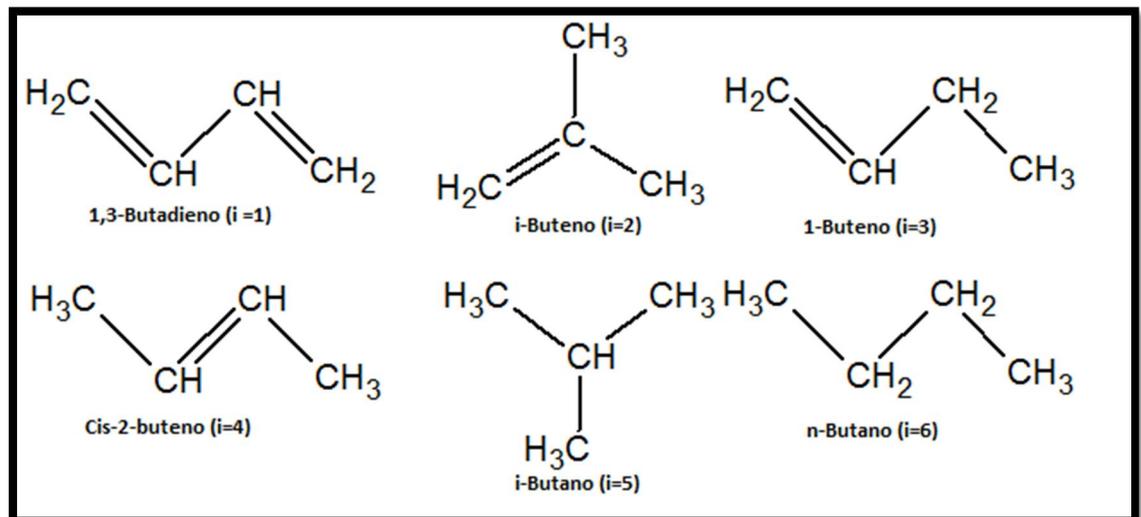


Figura. A1.2. Componentes de la alimentación L<sub>0</sub>. (Elaboración propia)

De donde, atendiendo a la Tabla A1.I del capítulo precedente, pueden discriminarse los siguientes subgrupos:

- 1,3-Butadieno: Dos subgrupos CH<sub>2</sub> y dos CH.
- Isobuteno: Dos subgrupos CH<sub>3</sub>, uno CH<sub>2</sub> y uno C.
- 1-Buteno: Dos subgrupos CH<sub>2</sub>, uno CH<sub>3</sub> y uno CH.
- Cis-2-buteno: Dos subgrupos CH<sub>3</sub> y dos CH.
- Isobutano: Tres subgrupos CH<sub>3</sub> y uno CH.
- Butano: Dos subgrupos CH<sub>3</sub> y dos CH<sub>2</sub>.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Dado que todos los subgrupos pertenecen al grupo principal “Alcanos”, las interacciones entre los mismos se anulan, según lo dispuesto en la Tabla A1.II.

Con lo anterior, tomando los datos listados en las tablas A1.I a A1.II, se tiene:

Parámetros de subgrupo y de interacción UNIFAC									
$a_{mk}(K)$		0	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	
Grupo	k	$R_k$	$Q_k$	$v_k^{(1)}$	$v_k^{(2)}$	$v_k^{(3)}$	$v_k^{(4)}$	$v_k^{(5)}$	$v_k^{(6)}$
CH <sub>3</sub>	1	0,9011	0,8480	0	2	1	2	3	2
CH <sub>2</sub>	2	0,6744	0,5400	2	1	2	0	0	2
CH	3	0,4469	0,2280	2	0	1	2	1	0
C	4	0,2195	0,0000	0	1	0	0	0	0

Tabla. A1.V. Parámetros de subgrupo y de interacción UNIFAC

Puesto que ningún grupo presenta interacción, se toma  $a_{mk}$  nulo para todos los casos.

### A1.C2.3.2. Coeficientes de Antoine

Los coeficientes de *Antoine* son números adimensionales que permiten, por la ecuación del mismo autor, encontrar la presión de saturación de un vapor conocida la temperatura del equilibrio, o bien la temperatura de saturación conocida la presión del sistema. En este caso, para todos los componentes, la ecuación de *Antoine* responde a la siguiente expresión:

$$\ln P_i^0(\text{mmHg}) = A_i - \frac{B_i}{T(K) + C_i} \quad \text{Ecuación de Antoine (A1.87)}$$

Ecuación, que despejada para el caso de la temperatura de saturación, se escribe como sigue:

$$T_i^0(K) = \frac{B_i}{A_i - \ln P(\text{mmHg})} - C_i \quad \text{(A1.88)}$$

Los coeficientes de *Antoine* se tabulan seguidamente:

Coeficientes de Antoine			
Butadieno (i = 1) C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>		i-Buteno (i = 2) C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	
A <sub>1</sub>	15,7727	A <sub>2</sub>	15,7528
B <sub>1</sub>	2142,66	B <sub>2</sub>	2125,75
C <sub>1</sub>	-34,30	C <sub>2</sub>	-33,15
1-Buteno (i = 3) C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>		Cis-2-buteno (i = 4) C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	
A <sub>3</sub>	15,7564	A <sub>4</sub>	15,8171
B <sub>3</sub>	2132,42	B <sub>4</sub>	2210,71
C <sub>3</sub>	-33,15	C <sub>4</sub>	-36,15
i-Butano (i = 5) C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>		n-Butano (i = 6) C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	
A <sub>5</sub>	15,5381	A <sub>6</sub>	15,6782
B <sub>5</sub>	2032,73	B <sub>6</sub>	2154,90
C <sub>5</sub>	-33,15	C <sub>6</sub>	-34,42

Tabla. A1.VI. Coeficientes de Antoine

### A1.C2.3.3. Propiedades críticas y temperaturas de ebullición normal

Se consignan en tabla las propiedades críticas precisadas y listadas *ut supra*, así como las temperaturas de ebullición normales:

Propiedades críticas y temperaturas normales de ebullición					
T <sub>1</sub> <sup>0</sup> (K) (normal)	268,7	P <sub>c1</sub> (atm)	42,7	Z <sub>c1</sub>	0,270
T <sub>2</sub> <sup>0</sup> (K) (normal)	266,3	P <sub>c2</sub> (atm)	39,5	Z <sub>c2</sub>	0,275
T <sub>3</sub> <sup>0</sup> (K) (normal)	266,9	P <sub>c3</sub> (atm)	39,7	Z <sub>c3</sub>	0,277
T <sub>4</sub> <sup>0</sup> (K) (normal)	276,9	P <sub>c4</sub> (atm)	41,5	Z <sub>c4</sub>	0,272
T <sub>5</sub> <sup>0</sup> (K) (normal)	261,3	P <sub>c5</sub> (atm)	36,0	Z <sub>c5</sub>	0,283
T <sub>6</sub> <sup>0</sup> (K) (normal)	272,7	P <sub>c6</sub> (atm)	37,5	Z <sub>c6</sub>	0,274
T <sub>c1</sub> (K)	425,0	V <sub>c1</sub> (L/mol)	0,221	ω <sub>1</sub>	0,195
T <sub>c2</sub> (K)	417,9	V <sub>c2</sub> (L/mol)	0,239	ω <sub>2</sub>	0,190
T <sub>c3</sub> (K)	419,6	V <sub>c3</sub> (L/mol)	0,240	ω <sub>3</sub>	0,187
T <sub>c4</sub> (K)	435,6	V <sub>c4</sub> (L/mol)	0,234	ω <sub>4</sub>	0,202
T <sub>c5</sub> (K)	408,1	V <sub>c5</sub> (L/mol)	0,263	ω <sub>5</sub>	0,176
T <sub>c6</sub> (K)	425,2	V <sub>c6</sub> (L/mol)	0,255	ω <sub>6</sub>	0,193

Tabla. A1.VII. Propiedades críticas y temperaturas normales de ebullición

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Tales propiedades se han plasmado respetándose el número de cifras significativas con que figuran en la bibliografía\*.

### A1.C2.3.4. Otras propiedades

Los pesos moleculares de las sustancias implicadas en el equilibrio se tabulan seguidamente:

Pesos moleculares	
<b>PM<sub>1</sub> (g/mol)</b>	54,092
<b>PM<sub>2</sub> (g/mol)</b>	56,108
<b>PM<sub>3</sub> (g/mol)</b>	56,108
<b>PM<sub>4</sub> (g/mol)</b>	56,108
<b>PM<sub>5</sub> (g/mol)</b>	58,124
<b>PM<sub>6</sub> (g/mol)</b>	58,124

Tabla. A1.VIII. Pesos moleculares

El parámetro de interacción  $k_{ij}$ , será despreciado debido al similar carácter químico de las especies en equilibrio. La constante universal de los gases se tomará en el valor y unidades indicadas abajo:

$$k_{ij} = 0$$

$$R = 0,082057 \text{ atm}\cdot\text{L/mol}\cdot\text{K}$$

### A1.C2.3.5. Reglas de combinación de Prausnitz

La aplicación de las ecuaciones (A1.81.1) a (A1.81.5), proporciona el valor de las distintas variables cruzadas. Se considerará, además de los datos de  $R$  y  $k_{ij}$  del apartado anterior, los datos de la Tabla A1.VII. Se obtendrán, por el siguiente orden:  $T_{cij}$ ,  $Z_{cij}$ ,  $V_{cij}$ ,  $P_{cij}$  y  $\omega_{cij}$ . Puesto que se tienen seis componentes, las interacciones de pares serán: 1-2, 1-3, 1-4, 1-5, 1-6, 2-3, 2-4, 2-5, 2-6, 3-4, 3-5, 3-6, 4-5, 4-6 y 5-6, en total 15 interacciones, (considerando que la interacción

\* The properties of gases & liquids. R. C. Reid, J. M. Prausnitz, B. E. Poling. McGraw-Hill. 4ª Edición.

“*ij*” es la misma que la inversa “*ji*” y que la interacción “*ii*” es la propiedad pura ya tabulada en la Tabla A1.VII).

Los resultados se consignan en la tabla siguiente:

Reglas de combinación de Prausnitz									
$T_{c12}$ (K)	421,4350	$Z_{c12}$	0,2725	$V_{c12}$ (L/mol)	0,2299	$P_{c12}$ (atm)	40,9927	$\omega_{12}$	0,1925
$T_{c13}$ (K)	422,2914	$Z_{c13}$	0,2735	$V_{c13}$ (L/mol)	0,2304	$P_{c13}$ (atm)	41,1396	$\omega_{13}$	0,1910
$T_{c14}$ (K)	430,2674	$Z_{c14}$	0,2710	$V_{c14}$ (L/mol)	0,2274	$P_{c14}$ (atm)	42,0688	$\omega_{14}$	0,1985
$T_{c15}$ (K)	416,4643	$Z_{c15}$	0,2765	$V_{c15}$ (L/mol)	0,2414	$P_{c15}$ (atm)	39,1441	$\omega_{15}$	0,1855
$T_{c16}$ (K)	425,1000	$Z_{c16}$	0,2720	$V_{c16}$ (L/mol)	0,2376	$P_{c16}$ (atm)	39,9336	$\omega_{16}$	0,1940
$T_{c23}$ (K)	418,7491	$Z_{c23}$	0,2760	$V_{c23}$ (L/mol)	0,2395	$P_{c23}$ (atm)	39,5980	$\omega_{23}$	0,1885
$T_{c24}$ (K)	426,6582	$Z_{c24}$	0,2735	$V_{c24}$ (L/mol)	0,2365	$P_{c24}$ (atm)	40,4891	$\omega_{24}$	0,1960
$T_{c25}$ (K)	412,9709	$Z_{c25}$	0,2790	$V_{c25}$ (L/mol)	0,2508	$P_{c25}$ (atm)	37,6961	$\omega_{25}$	0,1830
$T_{c26}$ (K)	421,5342	$Z_{c26}$	0,2745	$V_{c26}$ (L/mol)	0,2469	$P_{c26}$ (atm)	38,4544	$\omega_{26}$	0,1915
$T_{c34}$ (K)	427,5252	$Z_{c34}$	0,2745	$V_{c34}$ (L/mol)	0,2370	$P_{c34}$ (atm)	40,6345	$\omega_{34}$	0,1945
$T_{c35}$ (K)	413,8100	$Z_{c35}$	0,2800	$V_{c35}$ (L/mol)	0,2513	$P_{c35}$ (atm)	37,8303	$\omega_{35}$	0,1815
$T_{c36}$ (K)	422,3907	$Z_{c36}$	0,2755	$V_{c36}$ (L/mol)	0,2474	$P_{c36}$ (atm)	38,5931	$\omega_{36}$	0,1900
$T_{c45}$ (K)	421,6258	$Z_{c45}$	0,2775	$V_{c45}$ (L/mol)	0,2482	$P_{c45}$ (atm)	38,6788	$\omega_{45}$	0,1890
$T_{c46}$ (K)	430,3686	$Z_{c46}$	0,2730	$V_{c46}$ (L/mol)	0,2443	$P_{c46}$ (atm)	39,4555	$\omega_{46}$	0,1975
$T_{c56}$ (K)	416,5623	$Z_{c56}$	0,2785	$V_{c56}$ (L/mol)	0,2590	$P_{c56}$ (atm)	36,7583	$\omega_{56}$	0,1845

Tabla. A1.IX. Aplicación de las reglas de combinación de Prausnitz

#### **A1.C2.4. Cálculos de temperatura (1)**

Conocidas las composiciones de fase líquida de cada equilibrio, así como los datos previos, puede iniciarse la secuencia de cálculo, tal como se desarrollará a partir de la presente sección.

Haciendo uso de los coeficientes de *Antoine*, listados en la Tabla A1.VI, se obtienen las temperaturas de saturación de cada componente en el equilibrio, por aplicación de la ecuación (A1.88) a la presión de trabajo de 2,5 atm.

Las temperaturas de saturación obtenidas de esta forma se listan a continuación:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

$T_1^0$ (K)	$T_2^0$ (K)	$T_3^0$ (K)	$T_4^0$ (K)	$T_5^0$ (K)	$T_6^0$ (K)
294,866	292,287	292,986	303,548	287,607	299,521

Tabla. A1.X. Temperaturas de saturación a la presión de trabajo

Donde debe indicarse que la presión debe cambiarse convenientemente de unidades previa introducción en la ecuación (A1.88).

Las temperaturas de saturación por componente permiten evaluar una primera temperatura de equilibrio. Si se promedian los datos de la Tabla A1.X, ponderándose por las composiciones dadas en la Tabla A1.IV según:

$$T = \sum_i x_i T_i^0 = x_1 T_1^0 + \dots + x_6 T_6^0 \quad (\text{A1.89})$$

Se encuentra, para cada equilibrio:

Nº Equilibrio	$T_1$ (K)
1	295,190
2	294,832
3	294,869
4	294,906
5	294,943
6	294,980
7	295,017
8	295,054
9	295,091
10	295,128
11	295,165

Nº Equilibrio	$T_1$ (K)
12	295,202
13	295,239
14	295,276
15	295,312
16	295,349
17	295,386
18	295,423
19	295,460
20	295,497
21	294,866

Tabla. A1.XI. Primer cálculo de temperatura de equilibrio

### **A1.C2.5. Cálculo de presión de saturación (1)**

Conocida la temperatura de cada equilibrio, dada en la Tabla A1.XI, puede calcularse la presión de saturación de los componentes

en cada equilibrio, aplicando la ecuación (A1.87) convenientemente despejada para la anterior magnitud:

$$P_i^0(\text{mmHg}) = e^{A_i - \frac{B_i}{T(\text{K}) + C_i}} \quad (\text{A1.90})$$

Operando con los datos de la Tabla A1.VI se obtiene:

Nº Equilibrio	P <sub>1</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>2</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>3</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>4</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>5</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>6</sub> <sup>0</sup> (atm)
1	2,526	2,738	2,679	1,915	3,150	2,184
2	2,497	2,708	2,649	1,892	3,117	2,160
3	2,500	2,711	2,652	1,895	3,120	2,162
4	2,503	2,714	2,655	1,897	3,124	2,165
5	2,506	2,717	2,658	1,899	3,127	2,167
6	2,509	2,720	2,661	1,901	3,131	2,170
7	2,512	2,723	2,664	1,904	3,134	2,172
8	2,515	2,726	2,667	1,906	3,137	2,175
9	2,518	2,729	2,670	1,908	3,141	2,177
10	2,521	2,733	2,673	1,911	3,144	2,180
11	2,524	2,736	2,677	1,913	3,148	2,183
12	2,527	2,739	2,680	1,915	3,151	2,185
13	2,530	2,742	2,683	1,918	3,155	2,188
14	2,532	2,745	2,686	1,920	3,158	2,190
15	2,535	2,748	2,689	1,922	3,162	2,193
16	2,538	2,751	2,692	1,925	3,165	2,195
17	2,541	2,755	2,695	1,927	3,169	2,198
18	2,544	2,758	2,698	1,929	3,172	2,200
19	2,547	2,761	2,701	1,932	3,175	2,203
20	2,550	2,764	2,704	1,934	3,179	2,206
21	2,500	2,711	2,652	1,894	3,120	2,162

Tabla. A1.XII. Cálculo de presiones de saturación, conocida T

### **A1.C2.6. Cálculo de los coeficientes de actividad**

En esta sección se desarrollarán las ecuaciones del método UNIFAC, proporcionadas en el capítulo precedente, al sistema en

cuestión. Se presentará el proceso secuenciado de cálculo en distintos apartados.

### A1.C2.6.1. Cálculo de $r_i$

De acuerdo a la ecuación (A1.86.1), para un sistema de seis componentes, los desarrollos consisten en las siguientes expresiones:

$$(A1.91) \left\{ \begin{array}{l} r_i = \sum_k v_k^{(i)} R_k \text{ (A1.86.1)} \\ r_1 = \sum_k v_k^{(1)} R_k \text{ (1)} \\ \dots \\ r_6 = \sum_k v_k^{(6)} R_k \text{ (2)} \end{array} \right.$$

Donde se calcularán tantos  $r_i$  como componentes, multiplicando cada subgrupo por el número en que están presentes en la molécula que defina al compuesto "i", y sumando todos los productos. Los datos para ejecutar este cálculo vienen dados en la Tabla A1.V y los distintos  $r_i$  así obtenidos se consignan en la siguiente:

$r_1$	2,2426	$r_2$	2,6961	$r_3$	2,6968
$r_4$	2,6960	$r_5$	3,1502	$r_6$	3,1510

Tabla. A1.XIII. Cálculo de  $r_i$

### A1.C2.6.2. Cálculo de $q_i$

De acuerdo a la ecuación (A1.86.2), para un sistema de seis componentes, los desarrollos se expresan como sigue:

$$(A1.92) \left\{ \begin{array}{l} q_i = \sum_k v_k^{(i)} Q_k \text{ (A1.86.2)} \\ q_1 = \sum_k v_k^{(1)} Q_k \text{ (1)} \\ \dots \\ q_6 = \sum_k v_k^{(6)} Q_k \text{ (2)} \end{array} \right.$$

Donde se calcularán tantos  $q_i$  como componentes, multiplicando cada subgrupo por el número en que están presentes en la molécula que defina al compuesto "i", y sumando todos los productos. Los datos para ejecutar este cálculo vienen dados en la Tabla A1.V y los distintos  $q_i$  así obtenidos se consignan en la siguiente:

$q_1$	1,5360	$q_2$	2,2360	$q_3$	2,1560
$q_4$	2,1520	$q_5$	2,7720	$q_6$	2,7760

Tabla. A1.XIV. Cálculo de  $q_i$

### A1.C2.6.3. Cálculo de $e_{ki}$

El cálculo de  $e_{ki}$  está basado en la ecuación (A1.86.5). Dicha expresión implica todos los subgrupos  $k$  (del 1 al 4 en este caso), así como todas las especies desde  $i=1$  hasta  $i=6$ . Dado que para cada subgrupo, debe obtenerse una ecuación por componente, se precisarán 24 ecuaciones, que se listan a continuación:

$$\begin{aligned}
 & e_{ki} = \frac{v_k^{(i)} Q_k}{q_i} \quad (\text{A1.86.5}) \\
 (A1.93) \left\{ \begin{aligned}
 & e_{11} = \frac{v_1^{(1)} Q_1}{q_1} (1); e_{12} = \frac{v_1^{(2)} Q_1}{q_2} (2); e_{13} = \frac{v_1^{(3)} Q_1}{q_3} (3) \\
 & e_{14} = \frac{v_1^{(4)} Q_1}{q_4} (4); e_{15} = \frac{v_1^{(5)} Q_1}{q_5} (5); e_{16} = \frac{v_1^{(6)} Q_1}{q_6} (6) \\
 & e_{21} = \frac{v_2^{(1)} Q_2}{q_1} (7); e_{22} = \frac{v_2^{(2)} Q_2}{q_2} (8); e_{23} = \frac{v_2^{(3)} Q_2}{q_3} (9) \\
 & e_{24} = \frac{v_2^{(4)} Q_2}{q_4} (10); e_{25} = \frac{v_2^{(5)} Q_2}{q_5} (11); e_{26} = \frac{v_2^{(6)} Q_2}{q_6} (12) \\
 & e_{31} = \frac{v_3^{(1)} Q_3}{q_1} (13); e_{32} = \frac{v_3^{(2)} Q_3}{q_2} (14); e_{33} = \frac{v_3^{(3)} Q_3}{q_3} (15) \\
 & e_{34} = \frac{v_3^{(4)} Q_3}{q_4} (16); e_{35} = \frac{v_3^{(5)} Q_3}{q_5} (17); e_{36} = \frac{v_3^{(6)} Q_3}{q_6} (18) \\
 & e_{41} = \frac{v_4^{(1)} Q_4}{q_1} (19); e_{42} = \frac{v_4^{(2)} Q_4}{q_2} (20); e_{43} = \frac{v_4^{(3)} Q_4}{q_3} (21) \\
 & e_{44} = \frac{v_4^{(4)} Q_4}{q_4} (22); e_{45} = \frac{v_4^{(5)} Q_4}{q_5} (23); e_{46} = \frac{v_4^{(6)} Q_4}{q_6} (24)
 \end{aligned} \right.
 \end{aligned}$$

Operando sobre los datos consignados en las tablas A1.V y A1.XIV, se obtiene:

$e_{ki}$						
$k$	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$	$i = 6$
1	0	0,758	0,393	0,788	0,918	0,611
2	0,703	0,242	0,501	0	0	0,389
3	0,297	0	0,106	0,212	0,082	0
4	0	0	0	0	0	0

Tabla. A1.XV. Cálculo de  $e_{ki}$

#### A1.C2.6.4. Cálculo de $\tau_{mk}$

La ecuación (A1.86.6), proporciona el valor de  $\tau_{mk}$  mediante una función dependiente del parámetro de interacción,  $a_{mk}$ , (tabulado en A1.V) y la temperatura. Puesto que los subgrupos correspondientes al mismo grupo principal no presentan interacción, todos los  $a_{mk}$  se anulan, considerando que los subgrupos presentes en este equilibrio corresponden al grupo "Alcanos". De ahí que aplicando directamente (A1.86.6), los  $\tau_{mk}$  resultan la exponencial de cero, es decir, la unidad. Sea por tanto:

$\tau_{mk}$
1

Tabla. A1.XVI. Valor de todos los  $\tau_{mk}$

De lo que se deduce que, si este parámetro, el único teóricamente dependiente de la temperatura para el cálculo de los coeficientes de actividad, resulta coincidente para todos los casos a la unidad, independientemente de la temperatura; entonces, para el exclusivo caso de este sistema, se tiene que los coeficientes de actividad son constantes, por lo que no se recalcularán cada vez que se haga con la temperatura, ahorrándose uno de los bucles de iteración descritos en la Figura A1.1.

### A1.C2.6.5. Cálculo de $\beta_{ik}$

Partiendo de la ecuación (A1.86.7), se tiene una expresión que va en todos los componentes y subgrupos, de donde el desarrollo pertinente, como en el apartado de cálculo de  $e_{ki}$ , incluye 24 ecuaciones. Considerando que todos los  $\tau_{mk}$  se igualan a la unidad, por lo argumentado en el apartado previo, se simplifican directamente en los desarrollos:

$$(A1.94) \left\{ \begin{array}{l} \beta_{ik} = \sum_m e_{mi} \tau_{mk} = \sum_m e_{mi} \quad (A1.86.7) \\ \beta_{11} = e_{11} + e_{21} + e_{31} + e_{41} = \beta_{12} = \beta_{13} = \beta_{14} \quad (1) \\ \beta_{21} = e_{12} + e_{22} + e_{32} + e_{42} = \beta_{22} = \beta_{23} = \beta_{24} \quad (2) \\ \beta_{31} = e_{13} + e_{23} + e_{33} + e_{43} = \beta_{32} = \beta_{33} = \beta_{34} \quad (3) \\ \beta_{41} = e_{14} + e_{24} + e_{34} + e_{44} = \beta_{42} = \beta_{43} = \beta_{44} \quad (4) \\ \beta_{51} = e_{15} + e_{25} + e_{35} + e_{45} = \beta_{52} = \beta_{53} = \beta_{54} \quad (5) \\ \beta_{61} = e_{16} + e_{26} + e_{36} + e_{46} = \beta_{62} = \beta_{63} = \beta_{64} \quad (6) \end{array} \right.$$

Una propiedad de la Tabla A1.XV, se observa al sumar los  $e_{ki}$  de las columnas: todas ellas suman la unidad. Ello se fundamenta en la propia expresión de  $e_{ki}$ , que para un mismo componente "i", supone la razón de cada contribución a  $q_i$  de cada componente, por lo que la suma de estas razones debe equiparar el numerador al denominador y la fracción resulta uno, como queda expresado. De las ecuaciones (A1.94), se observa que todas las  $\beta_{ik}$  para un mismo componente "i", consisten en la suma de los  $e_{ki}$ , dado que las interacciones entre subgrupos son despreciables. Por todo lo expuesto, es claro que todas las  $\beta_{ik}$  deben resultar la unidad. Por tanto:

$\beta_{ik}$
1

Tabla. A1.XVII. Valor de todas las  $\beta_{ik}$

Debe recalcar que exclusivamente en el caso de que los parámetros de interacción se anulen, ergo los  $\tau_{mk}$  se hagan la unidad, se cumple lo dado en la Tabla A1.XVII.

### A1.C2.6.6. Cálculo de $\theta_k$

Se parte de la ecuación (A1.86.8) y, puesto que ésta sólo va en los subgrupos k, se tendrán cuatro ecuaciones:

$$(A1.95) \left\{ \begin{array}{l} \theta_k = \frac{\sum_i x_i q_i e_{ki}}{\sum_j x_j q_j} \quad (A1.86.8) \\ \theta_1 = \frac{x_1 q_1 e_{11} + x_2 q_2 e_{12} + x_3 q_3 e_{13} + x_4 q_4 e_{14} + x_5 q_5 e_{15} + x_6 q_6 e_{16}}{x_1 q_1 + x_2 q_2 + x_3 q_3 + x_4 q_4 + x_5 q_5 + x_6 q_6} \quad (1) \\ \theta_2 = \frac{x_1 q_1 e_{21} + x_2 q_2 e_{22} + x_3 q_3 e_{23} + x_4 q_4 e_{24} + x_5 q_5 e_{25} + x_6 q_6 e_{26}}{x_1 q_1 + x_2 q_2 + x_3 q_3 + x_4 q_4 + x_5 q_5 + x_6 q_6} \quad (2) \\ \theta_3 = \frac{x_1 q_1 e_{31} + x_2 q_2 e_{32} + x_3 q_3 e_{33} + x_4 q_4 e_{34} + x_5 q_5 e_{35} + x_6 q_6 e_{36}}{x_1 q_1 + x_2 q_2 + x_3 q_3 + x_4 q_4 + x_5 q_5 + x_6 q_6} \quad (3) \\ \theta_4 = \frac{x_1 q_1 e_{41} + x_2 q_2 e_{42} + x_3 q_3 e_{43} + x_4 q_4 e_{44} + x_5 q_5 e_{45} + x_6 q_6 e_{46}}{x_1 q_1 + x_2 q_2 + x_3 q_3 + x_4 q_4 + x_5 q_5 + x_6 q_6} \quad (4) \end{array} \right.$$

Donde la suma de los  $\theta_k$  resulta la unidad:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_m \theta_m = 1 = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 \\ \frac{x_1 q_1 \beta_{11} + x_2 q_2 \beta_{21} + x_3 q_3 \beta_{31} + x_4 q_4 \beta_{41} + x_5 q_5 \beta_{51} + x_6 q_6 \beta_{61}}{x_1 q_1 + x_2 q_2 + x_3 q_3 + x_4 q_4 + x_5 q_5 + x_6 q_6} \\ \frac{x_1 q_1 + x_2 q_2 + x_3 q_3 + x_4 q_4 + x_5 q_5 + x_6 q_6}{x_1 q_1 + x_2 q_2 + x_3 q_3 + x_4 q_4 + x_5 q_5 + x_6 q_6} = 1 \text{ q. e. d.} \end{array} \right.$$

Se han tomado las fracciones (A1.95.1) a (A1.95.4) y se ha extraído factor común los  $x_i q_i$ . El factor a que multiplican los anteriores resulta coincidente con las expresiones (A1.94.1) a (A1.94.6) y se ha sustituido directamente. Dado que todas las  $\beta_{ik}$  resultan uno para el caso particular del sistema de componentes en estudio, se igualan el numerador y el denominador y se demuestra lo sugerido más arriba. En aquellos casos donde las  $\beta_{ik}$  no resulten la unidad, éstas no podrán sustituirse por la suma de  $e_{ki}$ , como se ha practicado. En todo caso, el sumatorio de los  $e_{ki}$  siempre es la unidad, (cuando se fija un componente) y el razonamiento sigue siendo válido.

Esta propiedad resultará particularmente interesante a la hora de calcular el siguiente parámetro *UNIFAC*. En cuanto a los  $\theta_k$ , por

aplicación de (A1.95) sobre los datos consignados en las tablas A1.IV y A1.XIV a A1.XV se obtiene:

Nº Equilibrio	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$
1	0,701	0,223	0,075	0
2	0,439	0,406	0,154	0
3	0,441	0,406	0,153	0
4	0,443	0,406	0,151	0
5	0,445	0,406	0,149	0
6	0,447	0,405	0,148	0
7	0,449	0,405	0,146	0
8	0,451	0,405	0,144	0
9	0,453	0,405	0,143	0
10	0,455	0,404	0,141	0
11	0,457	0,404	0,139	0

Nº Equilibrio	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$
12	0,459	0,404	0,138	0
13	0,460	0,404	0,136	0
14	0,462	0,403	0,134	0
15	0,464	0,403	0,133	0
16	0,466	0,403	0,131	0
17	0,468	0,403	0,130	0
18	0,470	0,402	0,128	0
19	0,471	0,402	0,127	0
20	0,473	0,402	0,125	0
21	0	0,703	0,297	0

Tabla. A1.XVIII. Cálculo de  $\theta_k$

#### A1.C2.6.7. Cálculo de $s_k$

Atendiendo a la ecuación (A1.86.9), y dado que los  $\tau_{mk}$  valen la unidad,  $s_k$  se calcula considerando:

$$s_k = \sum_m \theta_m \tau_{mk} = \sum_m \theta_m = 1 \quad (A1.96)$$

Lo que según el apartado anterior también resulta la unidad, por lo que:

$s_k$
1

Tabla. A1.XIX. Valor de todos los  $s_k$

#### A1.C2.6.8. Cálculo de $J_i$

La ecuación (A1.86.3) proporciona el valor de  $J_i$ . Al desarrollar para los seis componentes involucrados en el sistema descrito en el presente capítulo, se tiene:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

$$\begin{aligned}
 & J_i = \frac{r_i}{\sum_j r_j x_j} \quad (A1.86.3) \\
 (A1.97) \left\{ \begin{aligned}
 & J_1 = \frac{r_1}{r_1 x_1 + r_2 x_2 + r_3 x_3 + r_4 x_4 + r_5 x_5 + r_6 x_6} \quad (1) \\
 & J_6 = \frac{\ddots}{r_1 x_1 + r_2 x_2 + r_3 x_3 + r_4 x_4 + r_5 x_5 + r_6 x_6} \quad (2)
 \end{aligned} \right.
 \end{aligned}$$

Por aplicación de (A1.97) a los datos consignados en las tablas A1.IV y A1.XIII, se calcula:

N° Equilibrio	J <sub>1</sub>	J <sub>2</sub>	J <sub>3</sub>	J <sub>4</sub>	J <sub>5</sub>	J <sub>6</sub>
1	0,779	0,937	0,937	0,937	1,095	1,095
2	0,891	1,072	1,072	1,072	1,252	1,253
3	0,890	1,070	1,070	1,070	1,250	1,250
4	0,888	1,068	1,068	1,068	1,248	1,248
5	0,886	1,066	1,066	1,066	1,245	1,245
6	0,885	1,064	1,064	1,064	1,243	1,243
7	0,883	1,062	1,062	1,062	1,241	1,241
8	0,881	1,060	1,060	1,060	1,238	1,239
9	0,880	1,058	1,058	1,058	1,236	1,236
10	0,878	1,056	1,056	1,056	1,234	1,234
11	0,877	1,054	1,054	1,054	1,231	1,232
12	0,875	1,052	1,052	1,052	1,229	1,229
13	0,873	1,050	1,050	1,050	1,227	1,227
14	0,872	1,048	1,048	1,048	1,224	1,225
15	0,870	1,046	1,046	1,046	1,222	1,223
16	0,868	1,044	1,044	1,044	1,220	1,220
17	0,867	1,042	1,042	1,042	1,218	1,218
18	0,865	1,040	1,041	1,040	1,216	1,216
19	0,864	1,038	1,039	1,038	1,213	1,214
20	0,862	1,036	1,037	1,036	1,211	1,211
21	1,000	1,202	1,203	1,202	1,405	1,405

Tabla. A1.XX. Cálculo de J<sub>i</sub>

A1.C2.6.9. Cálculo de  $L_i$

Sean los siguientes valores de  $L_i$ :

Nº Equilibrio	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_5$	$L_6$
1	0,635	0,925	0,891	0,890	1,146	1,148
2	0,797	1,160	1,118	1,116	1,438	1,440
3	0,794	1,156	1,114	1,112	1,433	1,435
4	0,791	1,152	1,111	1,109	1,428	1,430
5	0,789	1,148	1,107	1,105	1,424	1,426
6	0,786	1,145	1,104	1,102	1,419	1,421
7	0,784	1,141	1,100	1,098	1,414	1,416
8	0,781	1,137	1,096	1,094	1,410	1,412
9	0,779	1,133	1,093	1,091	1,405	1,407
10	0,776	1,130	1,089	1,087	1,401	1,403
11	0,774	1,126	1,086	1,084	1,396	1,398
12	0,771	1,123	1,082	1,080	1,392	1,394
13	0,769	1,119	1,079	1,077	1,387	1,389
14	0,766	1,115	1,076	1,074	1,383	1,385
15	0,764	1,112	1,072	1,070	1,378	1,380
16	0,761	1,108	1,069	1,067	1,374	1,376
17	0,759	1,105	1,065	1,063	1,370	1,372
18	0,757	1,101	1,062	1,060	1,365	1,367
19	0,754	1,098	1,059	1,057	1,361	1,363
20	0,752	1,095	1,055	1,053	1,357	1,359
21	1,000	1,456	1,404	1,401	1,805	1,807

Tabla. A1.XXI. Cálculo de  $L_i$

Se han calculado siguiendo la ecuación (A1.86.4), que desarrollada para seis componentes resulta:

$$(A1.98) \left\{ \begin{array}{l} L_i = \frac{q_i}{\sum_j q_j x_j} \quad (A1.86.4) \\ L_1 = \frac{q_1}{q_1 x_1 + r_2 x_2 + q_3 x_3 + q_4 x_4 + q_5 x_5 + q_6 x_6} \quad (1) \\ L_6 = \frac{q_6}{q_1 x_1 + r_2 x_2 + q_3 x_3 + q_4 x_4 + q_5 x_5 + q_6 x_6} \quad (2) \end{array} \right.$$

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Los datos de la Tabla A1.XXI, se han obtenido por aplicación de (A1.98) a los datos dados en las tablas A1.IV y A1.XIV.

### A1.C2.6.10. Cálculo del coeficiente de actividad combinatorio

El coeficiente de actividad combinatorio se calcula, para cada especie, según la expresión (A1.85.1). Su desarrollo produce:

Nº Equilibrio	$\ln\gamma_1^C$	$\ln\gamma_2^C$	$\ln\gamma_3^C$	$\ln\gamma_4^C$	$\ln\gamma_5^C$	$\ln\gamma_6^C$
1	0,143	-0,001	0,012	0,012	0,010	0,011
2	0,044	0,031	0,007	0,006	0,099	0,101
3	0,045	0,030	0,006	0,006	0,097	0,099
4	0,046	0,029	0,006	0,005	0,095	0,097
5	0,047	0,028	0,006	0,005	0,093	0,095
6	0,049	0,027	0,005	0,005	0,091	0,093
7	0,050	0,026	0,005	0,004	0,089	0,091
8	0,051	0,025	0,004	0,004	0,087	0,089
9	0,052	0,024	0,004	0,003	0,085	0,087
10	0,053	0,024	0,004	0,003	0,083	0,086
11	0,054	0,023	0,003	0,003	0,082	0,084
12	0,055	0,022	0,003	0,003	0,080	0,082
13	0,057	0,021	0,003	0,002	0,078	0,080
14	0,058	0,020	0,002	0,002	0,076	0,078
15	0,059	0,019	0,002	0,002	0,075	0,077
16	0,060	0,019	0,002	0,002	0,073	0,075
17	0,061	0,018	0,002	0,001	0,071	0,073
18	0,062	0,017	0,001	0,001	0,070	0,072
19	0,064	0,016	0,001	0,001	0,068	0,070
20	0,065	0,016	0,001	0,001	0,067	0,069
21	0	0,174	0,104	0,102	0,336	0,340

Tabla. A1.XXII. Cálculo del coeficiente de actividad combinatorio

Las ecuaciones precisadas son las que se muestran seguidamente, procedentes de la (A1.85.1):

$$(A1.99) \begin{cases} \ln\gamma_i^C = 1 - J_i + \ln J_i - 5q_i \left(1 - \frac{J_i}{L_i} + \ln \frac{J_i}{L_i}\right) (A1.85.1) \\ \ln\gamma_1^C = 1 - J_1 + \ln J_1 - 5q_1 \left(1 - \frac{J_1}{L_1} + \ln \frac{J_1}{L_1}\right) (1) \\ \dots \\ \ln\gamma_6^C = 1 - J_6 + \ln J_6 - 5q_6 \left(1 - \frac{J_6}{L_6} + \ln \frac{J_6}{L_6}\right) (2) \end{cases}$$

Los datos requeridos se han tomado de las tablas A1.XIV y A1.XX a A1.XXI.

#### A1.C2.6.11. Cálculo del coeficiente de actividad residual

La evaluación del coeficiente de actividad residual requiere el desarrollo de la ecuación (A1.85.2). No obstante, a fin de ahorrar esfuerzo inane, se efectúan las siguientes observaciones:

$$\ln\gamma_i^R = q_i \left[ 1 - \sum_m \left( \theta_k \frac{\beta_{ik}}{s_k} - e_{ki} \ln \frac{\beta_{ik}}{s_k} \right) \right] (A1.85.2)$$

El término que resta en el sumatorio se anula, puesto que el logaritmo de la unidad es cero, ( $\beta_{ik}$  y  $s_k$  se hacen uno según lo mostrado en apartados precedentes). De la misma forma, el cociente que multiplica en el primer sumando se hace uno, por lo que (A1.85.2), en este caso, se reduce a la siguiente expresión:

$$\ln\gamma_i^R = q_i \left[ 1 - \sum_m \theta_m \right] (A1.100)$$

Como se vio en el apartado A1.C2.6.6:

$$\sum_m \theta_m = 1$$

Luego:

$$\ln\gamma_i^R = 0$$

Debe enfatizarse, como se viene haciendo en los apartados que preceden al presente, en el hecho de que sólo las circunstancias que se han razonado permiten asumir, en la presente sección de cálculo de los coeficientes de actividad, las simplificaciones que se han mostrado. En definitiva:

$\ln\gamma_i^R$
0

Tabla. A1.XXIII. Valor de todos los coeficientes de actividad residuales

### A1.C2.6.12. Cálculo del coeficiente de actividad

Conocidos los coeficientes de actividad combinatorio y residual, aplicando exponenciales en la expresión (A1.84) y despejando convenientemente se obtiene:

$$\gamma_i = e^{\ln\gamma_i^C + \ln\gamma_i^R} \quad (A1.101)$$

Calculando (A1.101) con los datos de las tablas A1.XXII a A1.XXIII, se alcanza el objetivo de la sección por la obtención de los coeficientes de actividad de la fase líquida, que se tabulan seguidamente:

Nº Equilibrio	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$	$\gamma_4$	$\gamma_5$	$\gamma_6$
1	1,154	0,999	1,012	1,012	1,010	1,011
2	1,045	1,032	1,007	1,006	1,104	1,106
3	1,046	1,031	1,007	1,006	1,102	1,104
4	1,047	1,030	1,006	1,005	1,100	1,102
5	1,049	1,029	1,006	1,005	1,097	1,100
6	1,050	1,028	1,005	1,005	1,095	1,098
7	1,051	1,027	1,005	1,004	1,093	1,095
8	1,052	1,026	1,004	1,004	1,091	1,093
9	1,053	1,025	1,004	1,003	1,089	1,091
10	1,054	1,024	1,004	1,003	1,087	1,089
11	1,056	1,023	1,003	1,003	1,085	1,087
12	1,057	1,022	1,003	1,003	1,083	1,085

Tabla. A1.XXIV. Coeficientes de actividad (Continúa en pág. siguiente)

Nº Equilibrio	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$	$\gamma_4$	$\gamma_5$	$\gamma_6$
13	1,058	1,021	1,003	1,002	1,081	1,083
14	1,059	1,020	1,002	1,002	1,079	1,082
15	1,061	1,020	1,002	1,002	1,078	1,080
16	1,062	1,019	1,002	1,002	1,076	1,078
17	1,063	1,018	1,002	1,001	1,074	1,076
18	1,064	1,017	1,001	1,001	1,072	1,074
19	1,066	1,016	1,001	1,001	1,071	1,073
20	1,067	1,016	1,001	1,001	1,069	1,071
21	1,000	1,190	1,110	1,107	1,399	1,405

Tabla. A1.XXIV. Coeficientes de actividad (Viene de pág. anterior)

### **A1.C2.7. Cálculo de la presión de saturación (2)**

En la sección A1.C2.5, se obtuvo un primer valor de presión de saturación por componente, por aplicación de la ecuación de *Antoine*. En este caso, se recalcularán dichas presiones a través de expresiones deducidas directamente de la ecuación del criterio fundamental del equilibrio termodinámico. Esta primera afinación, permitirá incluir los coeficientes de actividad recién estimados. Sea:

$$y_i \Phi_i P = \gamma_i x_i P_i^0$$

Si se despeja la composición del vapor se obtiene:

$$y_i = \frac{\gamma_i x_i P_i^0}{\Phi_i P} \quad (A1.102)$$

Considerando que en todo sistema en equilibrio se verifica:

$$\sum_i y_i = 1$$

Operando en (A1.102) e igualando:

$$\sum_i y_i = \sum_i \frac{\gamma_i x_i P_i^0}{\Phi_i P} = 1 \quad (A1.103)$$

En (A1.103) puede extraerse la presión del sumatorio, como factor común, de donde:

$$P = \sum_i \frac{\gamma_i x_i P_i^0}{\Phi_i} \quad (A1.104)$$

Multiplicando (A1.104) y dividiendo por una presión de saturación de un componente "j", distinto del componente "i", y despejando en función de ésta última se alcanza:

$$(A1.105) \left\{ \begin{array}{l} P = \frac{P_j^0}{P_j^0} \sum_i \frac{\gamma_i x_i P_i^0}{\Phi_i} \quad (1) \\ P_j^0 = \frac{P}{\sum_i \frac{\gamma_i x_i P_i^0}{\Phi_i P_j^0}} \quad (2) \end{array} \right.$$

Desarrollando (A1.105.2) para el sistema de seis componentes en estudio, se logran las expresiones para el cálculo de la presión de saturación, a partir de la ecuación del criterio fundamental del equilibrio termodinámico. Pese a incluirse de forma general en las expresiones, los  $\Phi_i$  se ajustarán a la unidad, (suponiendo la idealidad), hasta su evaluación.

$$P_1^0 = \frac{P}{\frac{\gamma_1 x_1 P_1^0}{\Phi_1} + \frac{\gamma_2 x_2 P_2^0}{\Phi_2 P_1^0} + \frac{\gamma_3 x_3 P_3^0}{\Phi_3 P_1^0} + \frac{\gamma_4 x_4 P_4^0}{\Phi_4 P_1^0} + \frac{\gamma_5 x_5 P_5^0}{\Phi_5 P_1^0} + \frac{\gamma_6 x_6 P_6^0}{\Phi_6 P_1^0}} \quad (A1.106)$$

$$P_2^0 = \frac{P}{\frac{\gamma_1 x_1 P_1^0}{\Phi_1 P_2^0} + \frac{\gamma_2 x_2}{\Phi_2} + \frac{\gamma_3 x_3 P_3^0}{\Phi_3 P_2^0} + \frac{\gamma_4 x_4 P_4^0}{\Phi_4 P_2^0} + \frac{\gamma_5 x_5 P_5^0}{\Phi_5 P_2^0} + \frac{\gamma_6 x_6 P_6^0}{\Phi_6 P_2^0}} \quad (A1.107)$$

$$P_3^0 = \frac{P}{\frac{\gamma_1 x_1 P_1^0}{\Phi_1 P_3^0} + \frac{\gamma_2 x_2 P_2^0}{\Phi_2 P_3^0} + \frac{\gamma_3 x_3}{\Phi_3} + \frac{\gamma_4 x_4 P_4^0}{\Phi_4 P_3^0} + \frac{\gamma_5 x_5 P_5^0}{\Phi_5 P_3^0} + \frac{\gamma_6 x_6 P_6^0}{\Phi_6 P_3^0}} \quad (A1.108)$$

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

$$P_4^0 = \frac{P}{\frac{\gamma_1 x_1 P_1^0}{\Phi_1 P_4^0} + \frac{\gamma_2 x_2 P_2^0}{\Phi_2 P_4^0} + \frac{\gamma_3 x_3 P_3^0}{\Phi_3 P_4^0} + \frac{\gamma_4 x_4}{\Phi_4} + \frac{\gamma_5 x_5 P_5^0}{\Phi_5 P_4^0} + \frac{\gamma_6 x_6 P_6^0}{\Phi_6 P_4^0}} \quad (A1.109)$$

$$P_5^0 = \frac{P}{\frac{\gamma_1 x_1 P_1^0}{\Phi_1 P_5^0} + \frac{\gamma_2 x_2 P_2^0}{\Phi_2 P_5^0} + \frac{\gamma_3 x_3 P_3^0}{\Phi_3 P_5^0} + \frac{\gamma_4 x_4 P_4^0}{\Phi_4 P_5^0} + \frac{\gamma_5 x_5}{\Phi_5} + \frac{\gamma_6 x_6 P_6^0}{\Phi_6 P_5^0}} \quad (A1.110)$$

$$P_6^0 = \frac{P}{\frac{\gamma_1 x_1 P_1^0}{\Phi_1 P_6^0} + \frac{\gamma_2 x_2 P_2^0}{\Phi_2 P_6^0} + \frac{\gamma_3 x_3 P_3^0}{\Phi_3 P_6^0} + \frac{\gamma_4 x_4 P_4^0}{\Phi_4 P_6^0} + \frac{\gamma_5 x_5 P_5^0}{\Phi_5 P_6^0} + \frac{\gamma_6 x_6}{\Phi_6}} \quad (A1.111)$$

Nº Equilibrio	P <sub>1</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>2</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>3</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>4</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>5</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>6</sub> <sup>0</sup> (atm)
1	2,471	2,679	2,621	1,874	3,083	2,137
2	2,401	2,603	2,547	1,819	2,997	2,076
3	2,403	2,605	2,549	1,821	2,999	2,078
4	2,405	2,607	2,551	1,822	3,001	2,079
5	2,406	2,609	2,552	1,824	3,003	2,081
6	2,408	2,611	2,554	1,825	3,005	2,083
7	2,410	2,613	2,556	1,827	3,007	2,084
8	2,412	2,615	2,558	1,828	3,009	2,086
9	2,414	2,617	2,561	1,830	3,012	2,088
10	2,416	2,619	2,563	1,832	3,014	2,090
11	2,418	2,621	2,565	1,833	3,016	2,091
12	2,420	2,624	2,567	1,835	3,019	2,093
13	2,422	2,626	2,569	1,837	3,021	2,095
14	2,425	2,628	2,571	1,838	3,024	2,097
15	2,427	2,630	2,574	1,840	3,026	2,099
16	2,429	2,633	2,576	1,842	3,029	2,101
17	2,431	2,635	2,578	1,844	3,031	2,103
18	2,433	2,638	2,581	1,845	3,034	2,105
19	2,436	2,640	2,583	1,847	3,036	2,107
20	2,438	2,642	2,585	1,849	3,039	2,109
21	2,500	2,711	2,652	1,894	3,120	2,162

Tabla. A1.XXV. Cálculo de presiones de saturación, según el criterio fundamental del equilibrio

Aplicando (A1.106) a (A1.111) a los datos tabulados en A1.IV, A1.XII y A1.XXIV,  $\Phi_i = 1$  y la presión dada en la sección A1.C2.2, se han obtenido los datos consignados en la Tabla A1.XXV.

### **A1.C2.8. Cálculos de temperatura (2)**

A partir de las presiones de saturación de cada componente en el equilibrio, es posible recalculer la temperatura del mismo aplicando una ligera modificación de la ecuación (A1.88):

$$\ln T_i^0(\text{K}) = \frac{B_i}{A_i - \ln P_i^0(\text{mmHg})} - C_i \quad (\text{A1.112})$$

En este caso, en lugar de tomar la presión del sistema, (como se hizo en la primera sección de cálculos de temperatura), se toman las presiones de saturación de los componentes. Puesto que los componentes constituyen un equilibrio, la aplicación de la ecuación (A1.112) debe rendir temperaturas similares.

La iteración hace converger sucesivamente las diferencias entre magnitudes estimadas. Entre tanto, como temperatura del equilibrio, se tomará el promedio de las temperaturas de saturación de los componentes, (que debe ser similar a las mismas). La aplicación de (A1.112) a los datos de las tablas A1.VI y A1.XXV, junto al promedio de cada una de las temperaturas de saturación; produce la siguiente temperatura, calculada por segunda vez, del equilibrio:

Nº Equilibrio	$T_1^0$ (K)	$T_2^0$ (K)	$T_3^0$ (K)	$T_4^0$ (K)	$T_5^0$ (K)	$T_6^0$ (K)	$T_2$ (K)
1	294,502	294,491	294,493	294,533	294,459	294,507	294,498
2	293,590	293,570	293,573	293,645	293,512	293,599	293,582
3	293,614	293,593	293,597	293,670	293,535	293,622	293,605
4	293,638	293,617	293,621	293,694	293,558	293,647	293,629
5	293,663	293,641	293,645	293,719	293,582	293,671	293,654
6	293,687	293,666	293,670	293,745	293,606	293,696	293,678
7	293,713	293,691	293,695	293,770	293,630	293,721	293,703
8	293,738	293,716	293,720	293,797	293,655	293,747	293,729

Tabla. A1.XXVI. Segundo cálculo de T de equilibrio (Continúa en pág. siguiente)

Nº Equilibrio	T <sub>1</sub> <sup>0</sup> (K)	T <sub>2</sub> <sup>0</sup> (K)	T <sub>3</sub> <sup>0</sup> (K)	T <sub>4</sub> <sup>0</sup> (K)	T <sub>5</sub> <sup>0</sup> (K)	T <sub>6</sub> <sup>0</sup> (K)	T <sub>2</sub> <sup>*</sup> (K)
9	293,764	293,742	293,746	293,823	293,680	293,773	293,755
10	293,790	293,768	293,772	293,850	293,706	293,799	293,781
11	293,817	293,794	293,799	293,877	293,732	293,826	293,807
12	293,844	293,821	293,826	293,904	293,758	293,853	293,834
13	293,871	293,848	293,853	293,932	293,785	293,880	293,862
14	293,899	293,876	293,880	293,960	293,812	293,908	293,889
15	293,927	293,904	293,908	293,989	293,840	293,936	293,917
16	293,956	293,932	293,937	294,017	293,868	293,965	293,946
17	293,984	293,961	293,965	294,046	293,896	293,994	293,974
18	294,014	293,990	293,994	294,076	293,925	294,023	294,004
19	294,043	294,019	294,024	294,106	293,954	294,052	294,033
20	294,073	294,049	294,054	294,136	293,983	294,082	294,063
21	294,866	294,866	294,866	294,866	294,866	294,866	294,866

Tabla. A1.XXVI. Segundo cálculo de T de equilibrio (Viene de pág. anterior)

Con la temperatura recién recalculada debería realizarse lo propio con los coeficientes de actividad, ya que las magnitudes deben mantenerse actualizadas unas con otras. Debido a que, como se ha demostrado en este capítulo, dichos coeficientes son independientes de la temperatura, no es preciso recalcular, exclusivamente en este caso.

### **A1.C2.9. Cálculo de la presión de saturación (3)**

La nueva temperatura del equilibrio permite actualizar las presiones de saturación por aplicación de la ecuación (A1.90). Se precisarán de nuevo los parámetros de *Antoine*, notados en la Tabla A1.VI, así como la segunda temperatura del equilibrio dilucidada en la sección anterior. De esta forma se obtiene:

\* Como en la Tabla A1.XI, el subíndice anejo a T, indica el número de veces que se ha recalculado. Así se indicará en tablas sucesivas.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Nº Equilibrio	P <sub>1</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>2</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>3</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>4</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>5</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>6</sub> <sup>0</sup> (atm)
1	2,471	2,680	2,622	1,871	3,086	2,137
2	2,400	2,604	2,547	1,815	3,003	2,075
3	2,402	2,606	2,549	1,817	3,005	2,077
4	2,404	2,608	2,551	1,818	3,007	2,078
5	2,406	2,610	2,553	1,820	3,009	2,080
6	2,408	2,612	2,555	1,821	3,012	2,082
7	2,410	2,614	2,557	1,823	3,014	2,083
8	2,411	2,616	2,559	1,824	3,016	2,085
9	2,413	2,618	2,561	1,826	3,018	2,087
10	2,415	2,620	2,563	1,827	3,021	2,088
11	2,418	2,623	2,565	1,829	3,023	2,090
12	2,420	2,625	2,568	1,831	3,026	2,092
13	2,422	2,627	2,570	1,832	3,028	2,094
14	2,424	2,629	2,572	1,834	3,031	2,096
15	2,426	2,632	2,574	1,836	3,033	2,098
16	2,428	2,634	2,577	1,837	3,036	2,099
17	2,430	2,636	2,579	1,839	3,038	2,101
18	2,433	2,639	2,581	1,841	3,041	2,103
19	2,435	2,641	2,584	1,843	3,044	2,105
20	2,437	2,644	2,586	1,845	3,046	2,107
21	2,500	2,711	2,652	1,894	3,120	2,162

Tabla. A1.XXVII. Cálculo de presiones de saturación, conocida T

### **A1.C2.10. Cálculo de la composición de vapor**

Con la temperatura del equilibrio y las presiones de saturación actualizadas, pueden determinarse las composiciones de los componentes en el vapor. Para ello, se aplica la ecuación (A1.102), que particularizada a los seis componentes resulta:

$$y_1 = \frac{\gamma_1 x_1 P_1^0}{\Phi_1 P}, \dots, y_6 = \frac{\gamma_6 x_6 P_6^0}{\Phi_6 P} \quad (A1.113)$$

Donde los  $\phi_i$  se igualan a la unidad, puesto que aún no se han estimado por depender precisamente de las composiciones de vapor. Se requieren además datos de las tablas A1.XXIV, A1.IV, A1.XXVII y la presión consignada en la sección A1.C2.2.

Ejecutando las expresiones (A1.113), para tales datos se obtiene:

Nº Equilibrio	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_6$
1	0	0,214	0,212	0,152	0,249	0,173
2	0,439	0,263	0,159	0,089	0,040	0,009
3	0,436	0,262	0,158	0,089	0,039	0,016
4	0,433	0,260	0,157	0,088	0,038	0,022
5	0,431	0,259	0,157	0,088	0,037	0,029
6	0,428	0,257	0,156	0,087	0,037	0,036
7	0,425	0,256	0,155	0,087	0,036	0,042
8	0,421	0,254	0,154	0,086	0,035	0,049
9	0,418	0,253	0,153	0,086	0,034	0,055
10	0,415	0,251	0,153	0,086	0,033	0,062
11	0,412	0,249	0,152	0,085	0,033	0,068
12	0,409	0,248	0,151	0,085	0,032	0,075
13	0,406	0,247	0,150	0,084	0,031	0,081
14	0,403	0,245	0,150	0,084	0,030	0,088
15	0,400	0,244	0,149	0,083	0,030	0,094
16	0,397	0,242	0,148	0,083	0,029	0,101
17	0,394	0,241	0,147	0,083	0,028	0,107
18	0,391	0,239	0,146	0,082	0,028	0,113
19	0,388	0,238	0,146	0,082	0,027	0,120
20	0,385	0,236	0,145	0,081	0,026	0,126
21	1	0	0	0	0	0

Tabla. A1.XXVIII. Cálculo de composiciones de la fase vapor

### **A1.C2.11. Cálculo de los $\phi_i$**

Cuando son conocidas las composiciones de vapor, se ha determinado, junto con la temperatura, las variables perseguidas con-

cordantes con la composición de la fase líquida y presión introducidas. Hasta el momento se ha determinado el valor de los coeficientes de actividad, lo que supone una caracterización de la medida en que la fase líquida se aleja de la idealidad. Resta encontrar el valor de los coeficientes de fugacidad que efectuarán lo propio con la fase vapor, y permitirán recalcular tanto la temperatura de los equilibrios como las composiciones de vapor, hasta la convergencia. Como procede con las variables mostradas, cada vez que se recalculen los coeficientes de fugacidad, se obtendrá una nueva composición de vapor y temperatura de equilibrio hasta lograr tal convergencia.

La sección actual se dividirá en varios apartados donde se calcularán las distintas variables de que dependen los  $\Phi_i$ .

#### A1.C2.11.1. Cálculo de temperaturas reducidas puras y cruzadas

La temperatura reducida cruzada se definió junto con las reglas de combinación de *Prausnitz* en el capítulo previo. Ésta adopta la expresión:

$$T_{rij} = \frac{T}{T_{cij}} \text{ Temperatura reducida cruzada (A1.81.6)}$$

Para la temperatura reducida pura, se indicó también la validez de (A1.86.6), siempre que se hicieran coincidir los subíndices, esto es:

$$T_{rii} = \frac{T}{T_{cii}} \Rightarrow T_{ri} = \frac{T}{T_{ci}} \text{ Temperatura reducida pura (A1.114)}$$

Como se mostró en el apartado A1.C2.3.5, se tienen 15 interacciones "ij", que dan lugar a otras tantas temperaturas reducidas cruzadas. También se tienen seis temperaturas reducidas puras, (una por componente). Aplicando (A1.81.6) y (A1.114) al último dato de temperatura disponible, dado por la Tabla A1.XXVI y a las temperaturas críticas y críticas cruzadas dadas por las tablas A1.VII y A1.IX, se obtiene:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Nº Equilibrio	T <sub>r1</sub>	T <sub>r2</sub>	T <sub>r3</sub>	T <sub>r4</sub>	T <sub>r5</sub>	T <sub>r6</sub>
1	0,693	0,705	0,702	0,676	0,722	0,693
2	0,691	0,703	0,700	0,674	0,719	0,690
3	0,691	0,703	0,700	0,674	0,719	0,691
4	0,691	0,703	0,700	0,674	0,720	0,691
5	0,691	0,703	0,700	0,674	0,720	0,691
6	0,691	0,703	0,700	0,674	0,720	0,691
7	0,691	0,703	0,700	0,674	0,720	0,691
8	0,691	0,703	0,700	0,674	0,720	0,691
9	0,691	0,703	0,700	0,674	0,720	0,691
10	0,691	0,703	0,700	0,674	0,720	0,691
11	0,691	0,703	0,700	0,674	0,720	0,691
12	0,691	0,703	0,700	0,675	0,720	0,691
13	0,691	0,703	0,700	0,675	0,720	0,691
14	0,692	0,703	0,700	0,675	0,720	0,691
15	0,692	0,703	0,700	0,675	0,720	0,691
16	0,692	0,703	0,701	0,675	0,720	0,691
17	0,692	0,703	0,701	0,675	0,720	0,691
18	0,692	0,704	0,701	0,675	0,720	0,691
19	0,692	0,704	0,701	0,675	0,720	0,692
20	0,692	0,704	0,701	0,675	0,721	0,692
21	0,694	0,706	0,703	0,677	0,723	0,693

Tabla. A1.XXIX. Temperaturas reducidas puras

Nº Equilibrio	T <sub>r12</sub>	T <sub>r13</sub>	T <sub>r14</sub>	T <sub>r15</sub>	T <sub>r16</sub>	T <sub>r23</sub>	T <sub>r24</sub>	T <sub>r25</sub>
1	0,699	0,697	0,684	0,707	0,693	0,703	0,690	0,713
2	0,697	0,695	0,682	0,705	0,691	0,701	0,688	0,711
3	0,697	0,695	0,682	0,705	0,691	0,701	0,688	0,711
4	0,697	0,695	0,682	0,705	0,691	0,701	0,688	0,711
5	0,697	0,695	0,682	0,705	0,691	0,701	0,688	0,711
6	0,697	0,695	0,683	0,705	0,691	0,701	0,688	0,711
7	0,697	0,695	0,683	0,705	0,691	0,701	0,688	0,711
8	0,697	0,696	0,683	0,705	0,691	0,701	0,688	0,711
9	0,697	0,696	0,683	0,705	0,691	0,702	0,689	0,711

Tabla. A1.XXX. Temperaturas reducidas cruzadas (Continúa en pág. siguiente)

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Nº Equilibrio	T <sub>r12</sub>	T <sub>r13</sub>	T <sub>r14</sub>	T <sub>r15</sub>	T <sub>r16</sub>	T <sub>r23</sub>	T <sub>r24</sub>	T <sub>r25</sub>
10	0,697	0,696	0,683	0,705	0,691	0,702	0,689	0,711
11	0,697	0,696	0,683	0,705	0,691	0,702	0,689	0,711
12	0,697	0,696	0,683	0,705	0,691	0,702	0,689	0,711
13	0,697	0,696	0,683	0,706	0,691	0,702	0,689	0,712
14	0,697	0,696	0,683	0,706	0,691	0,702	0,689	0,712
15	0,697	0,696	0,683	0,706	0,691	0,702	0,689	0,712
16	0,697	0,696	0,683	0,706	0,691	0,702	0,689	0,712
17	0,697	0,696	0,683	0,706	0,691	0,702	0,689	0,712
18	0,698	0,696	0,683	0,706	0,692	0,702	0,689	0,712
19	0,698	0,696	0,683	0,706	0,692	0,702	0,689	0,712
20	0,698	0,696	0,683	0,706	0,692	0,702	0,689	0,712
21	0,698	0,696	0,683	0,706	0,692	0,702	0,689	0,712

Tabla. A1.XXX. Temperaturas reducidas cruzadas (Viene de pág. anterior)

Nº Equilibrio	T <sub>r26</sub>	T <sub>r34</sub>	T <sub>r35</sub>	T <sub>r36</sub>	T <sub>r45</sub>	T <sub>r46</sub>	T <sub>r56</sub>
1	0,699	0,689	0,712	0,697	0,698	0,684	0,707
2	0,696	0,687	0,709	0,695	0,696	0,682	0,705
3	0,697	0,687	0,710	0,695	0,696	0,682	0,705
4	0,697	0,687	0,710	0,695	0,696	0,682	0,705
5	0,697	0,687	0,710	0,695	0,696	0,682	0,705
6	0,697	0,687	0,710	0,695	0,697	0,682	0,705
7	0,697	0,687	0,710	0,695	0,697	0,682	0,705
8	0,697	0,687	0,710	0,695	0,697	0,683	0,705
9	0,697	0,687	0,710	0,695	0,697	0,683	0,705
10	0,697	0,687	0,710	0,696	0,697	0,683	0,705
11	0,697	0,687	0,710	0,696	0,697	0,683	0,705
12	0,697	0,687	0,710	0,696	0,697	0,683	0,705
13	0,697	0,687	0,710	0,696	0,697	0,683	0,705
14	0,697	0,687	0,710	0,696	0,697	0,683	0,706
15	0,697	0,687	0,710	0,696	0,697	0,683	0,706
16	0,697	0,688	0,710	0,696	0,697	0,683	0,706
17	0,697	0,688	0,710	0,696	0,697	0,683	0,706

Tabla. A1.XXX.bis. Temp. reducidas cruzadas (Continúa en pág. siguiente)

Nº Equilibrio	$T_{r26}$	$T_{r34}$	$T_{r35}$	$T_{r36}$	$T_{r45}$	$T_{r46}$	$T_{r56}$
18	0,697	0,688	0,710	0,696	0,697	0,683	0,706
19	0,698	0,688	0,711	0,696	0,697	0,683	0,706
20	0,698	0,688	0,711	0,696	0,697	0,683	0,706
21	0,700	0,690	0,713	0,698	0,699	0,685	0,708

Tabla. A1.XXX.bis. Temperaturas reducidas cruzadas (Viene de pág. anterior)

### A1.C2.11.2. Cálculo de coeficientes viriales puros y cruzados

Los coeficientes viriales segundos, B, se determinan aplicando (A1.80). Esta ecuación es válida tanto para coeficientes viriales cruzados como para los puros, cuando se hacen coincidir los subíndices:

$$(A1.115) \left\{ \begin{array}{l} \text{Puros} \\ \text{Cruzados} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} B_{ij} = \frac{RT_{cij}}{P_{cij}} (B_{ij}^0 + \omega_{ij} B_{ij}^1) \quad (A1.80.1) \\ B_1 = \frac{RT_{c1}}{P_{c1}} \left[ \left( 0,083 - \frac{0,422}{T_{r1}^{1,6}} \right) + \omega_1 \left( 0,139 - \frac{0,172}{T_{r1}^{4,2}} \right) \right] \quad (1) \\ B_6 = \frac{RT_{c6}}{P_{c6}} \left[ \left( 0,083 - \frac{0,422}{T_{r6}^{1,6}} \right) + \omega_6 \left( 0,139 - \frac{0,172}{T_{r6}^{4,2}} \right) \right] \quad (2) \\ B_{12} = \frac{RT_{c12}}{P_{c12}} \left[ \left( 0,083 - \frac{0,422}{T_{r12}^{1,6}} \right) + \omega_{12} \left( 0,139 - \frac{0,172}{T_{r12}^{4,2}} \right) \right] \quad (3) \\ B_{56} = \frac{RT_{c56}}{P_{c56}} \left[ \left( 0,083 - \frac{0,422}{T_{r56}^{1,6}} \right) + \omega_{56} \left( 0,139 - \frac{0,172}{T_{r56}^{4,2}} \right) \right] \quad (4) \end{array} \right.$$

Como en el apartado anterior, existen tantos coeficientes viriales cruzados como interacciones entre pares de moléculas: 15 coeficientes. También se calculan seis coeficientes viriales puros, uno por componente.

Aplicando (A1.115) a R, cuyo valor se fijó en el apartado A1.C2.3.4, y los datos dados en las tablas A1.VII y A1.IX y las tablas A1.XXIX a A1.XXX y A1.XXX.bis, se obtienen los siguientes coeficientes:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Nº Equilibrio	B <sub>1</sub> (L/mol)	B <sub>2</sub> (L/mol)	B <sub>3</sub> (L/mol)	B <sub>4</sub> (L/mol)	B <sub>5</sub> (L/mol)	B <sub>6</sub> (L/mol)
1	-0,658	-0,670	-0,674	-0,739	-0,672	-0,749
2	-0,663	-0,675	-0,679	-0,745	-0,677	-0,754
3	-0,662	-0,674	-0,678	-0,744	-0,677	-0,754
4	-0,662	-0,674	-0,678	-0,744	-0,677	-0,754
5	-0,662	-0,674	-0,678	-0,744	-0,677	-0,754
6	-0,662	-0,674	-0,678	-0,744	-0,677	-0,754
7	-0,662	-0,674	-0,678	-0,744	-0,677	-0,754
8	-0,662	-0,674	-0,678	-0,744	-0,676	-0,753
9	-0,662	-0,674	-0,678	-0,744	-0,676	-0,753
10	-0,662	-0,674	-0,678	-0,743	-0,676	-0,753
11	-0,661	-0,673	-0,677	-0,743	-0,676	-0,753
12	-0,661	-0,673	-0,677	-0,743	-0,676	-0,753
13	-0,661	-0,673	-0,677	-0,743	-0,676	-0,753
14	-0,661	-0,673	-0,677	-0,743	-0,676	-0,753
15	-0,661	-0,673	-0,677	-0,743	-0,675	-0,752
16	-0,661	-0,673	-0,677	-0,742	-0,675	-0,752
17	-0,660	-0,672	-0,677	-0,742	-0,675	-0,752
18	-0,660	-0,672	-0,676	-0,742	-0,675	-0,752
19	-0,660	-0,672	-0,676	-0,742	-0,675	-0,752
20	-0,660	-0,672	-0,676	-0,742	-0,675	-0,751
21	-0,656	-0,668	-0,672	-0,737	-0,671	-0,747

Tabla. A1.XXXI. Coeficientes viriales puros

Nº Equilibrio	B <sub>12</sub> (L/mol)	B <sub>13</sub> (L/mol)	B <sub>14</sub> (L/mol)	B <sub>15</sub> (L/mol)	B <sub>16</sub> (L/mol)
1	-0,665	-0,666	-0,698	-0,666	-0,703
2	-0,670	-0,671	-0,703	-0,671	-0,708
3	-0,670	-0,671	-0,703	-0,670	-0,708
4	-0,669	-0,671	-0,702	-0,670	-0,708
5	-0,669	-0,671	-0,702	-0,670	-0,708
6	-0,669	-0,671	-0,702	-0,670	-0,708
7	-0,669	-0,670	-0,702	-0,670	-0,708
8	-0,669	-0,670	-0,702	-0,670	-0,708
9	-0,669	-0,670	-0,702	-0,670	-0,707

Tabla. A1.XXXII. Coeficientes viriales cruzados (Continúa en pág. siguiente)

**Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas**

Documento 1. Anexos a la memoria

<b>Nº Equilibrio</b>	<b>B<sub>12</sub> (L/mol)</b>	<b>B<sub>13</sub> (L/mol)</b>	<b>B<sub>14</sub> (L/mol)</b>	<b>B<sub>15</sub> (L/mol)</b>	<b>B<sub>16</sub> (L/mol)</b>
10	-0,669	-0,670	-0,702	-0,670	-0,707
11	-0,669	-0,670	-0,701	-0,669	-0,707
12	-0,668	-0,670	-0,701	-0,669	-0,707
13	-0,668	-0,670	-0,701	-0,669	-0,707
14	-0,668	-0,669	-0,701	-0,669	-0,707
15	-0,668	-0,669	-0,701	-0,669	-0,707
16	-0,668	-0,669	-0,701	-0,669	-0,706
17	-0,668	-0,669	-0,701	-0,669	-0,706
18	-0,668	-0,669	-0,700	-0,668	-0,706
19	-0,667	-0,669	-0,700	-0,668	-0,706
20	-0,667	-0,668	-0,700	-0,668	-0,706
21	-0,663	-0,664	-0,696	-0,664	-0,701

Tabla. A1.XXXII. Coeficientes viriales cruzados (Viene de pág. anterior)

<b>Nº Equilibrio</b>	<b>B<sub>23</sub> (L/mol)</b>	<b>B<sub>24</sub> (L/mol)</b>	<b>B<sub>25</sub> (L/mol)</b>	<b>B<sub>26</sub> (L/mol)</b>	<b>B<sub>34</sub> (L/mol)</b>
1	-0,672	-0,703	-0,671	-0,709	-0,705
2	-0,677	-0,708	-0,676	-0,714	-0,710
3	-0,676	-0,708	-0,676	-0,714	-0,710
4	-0,676	-0,708	-0,676	-0,714	-0,710
5	-0,676	-0,708	-0,676	-0,714	-0,709
6	-0,676	-0,708	-0,675	-0,713	-0,709
7	-0,676	-0,708	-0,675	-0,713	-0,709
8	-0,676	-0,708	-0,675	-0,713	-0,709
9	-0,676	-0,707	-0,675	-0,713	-0,709
10	-0,676	-0,707	-0,675	-0,713	-0,709
11	-0,675	-0,707	-0,675	-0,713	-0,709
12	-0,675	-0,707	-0,675	-0,712	-0,708
13	-0,675	-0,707	-0,675	-0,712	-0,708
14	-0,675	-0,707	-0,674	-0,712	-0,708
15	-0,675	-0,707	-0,674	-0,712	-0,708
16	-0,675	-0,706	-0,674	-0,712	-0,708
17	-0,675	-0,706	-0,674	-0,712	-0,708
18	-0,674	-0,706	-0,674	-0,712	-0,707

Tabla. A1.XXXII.bis. Coeficientes viriales cruzados (Continúa en pág. siguiente)

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Nº Equilibrio	B <sub>23</sub> (L/mol)	B <sub>24</sub> (L/mol)	B <sub>25</sub> (L/mol)	B <sub>26</sub> (L/mol)	B <sub>34</sub> (L/mol)
19	-0,674	-0,706	-0,674	-0,711	-0,707
20	-0,674	-0,706	-0,673	-0,711	-0,707
21	-0,670	-0,701	-0,669	-0,707	-0,703

Tabla. A1.XXXII.bis. Coeficientes viriales cruzados (Viene de pág. anterior)

Nº Equilibrio	B <sub>35</sub> (L/mol)	B <sub>36</sub> (L/mol)	B <sub>45</sub> (L/mol)	B <sub>46</sub> (L/mol)	B <sub>56</sub> (L/mol)
1	-0,673	-0,710	-0,704	-0,744	-0,709
2	-0,677	-0,715	-0,709	-0,749	-0,714
3	-0,677	-0,715	-0,709	-0,749	-0,714
4	-0,677	-0,715	-0,709	-0,749	-0,714
5	-0,677	-0,715	-0,708	-0,749	-0,714
6	-0,677	-0,715	-0,708	-0,749	-0,714
7	-0,677	-0,715	-0,708	-0,749	-0,713
8	-0,677	-0,714	-0,708	-0,748	-0,713
9	-0,676	-0,714	-0,708	-0,748	-0,713
10	-0,676	-0,714	-0,708	-0,748	-0,713
11	-0,676	-0,714	-0,708	-0,748	-0,713
12	-0,676	-0,714	-0,707	-0,748	-0,713
13	-0,676	-0,714	-0,707	-0,748	-0,713
14	-0,676	-0,714	-0,707	-0,747	-0,712
15	-0,676	-0,713	-0,707	-0,747	-0,712
16	-0,675	-0,713	-0,707	-0,747	-0,712
17	-0,675	-0,713	-0,707	-0,747	-0,712
18	-0,675	-0,713	-0,706	-0,747	-0,712
19	-0,675	-0,713	-0,706	-0,747	-0,712
20	-0,675	-0,713	-0,706	-0,746	-0,711
21	-0,671	-0,708	-0,702	-0,742	-0,707

Tabla. A1.XXXII.tris. Coeficientes viriales cruzados

**A1.C2.11.3. Cálculo de coeficientes delta puros y cruzados**

Los coeficientes delta cruzados se obtienen por combinación lineal de los coeficientes viriales segundos como se indicaba en (A1.77.2). Por aplicación de esta ecuación a los datos de las tablas A1.XXXI a A1.XXXII, A1.XXXII.bis y A1.XXXII.tris, se obtienen los 15 coeficientes delta cruzados, correspondientes a las interacciones de pares de moléculas:

<b>Nº Equilibrio</b>	<b><math>\delta_{12} \cdot 10^3</math> (L/mol)</b>	<b><math>\delta_{13} \cdot 10^3</math> (L/mol)</b>	<b><math>\delta_{14} \cdot 10^3</math> (L/mol)</b>	<b><math>\delta_{15} \cdot 10^3</math> (L/mol)</b>	<b><math>\delta_{16} \cdot 10^3</math> (L/mol)</b>
1	-2,331	-0,893	1,664	-1,416	0,073
2	-2,348	-0,899	1,681	-1,425	0,073
3	-2,347	-0,899	1,680	-1,424	0,073
4	-2,347	-0,899	1,680	-1,424	0,073
5	-2,346	-0,899	1,679	-1,424	0,073
6	-2,346	-0,898	1,679	-1,424	0,073
7	-2,346	-0,898	1,678	-1,423	0,073
8	-2,345	-0,898	1,678	-1,423	0,073
9	-2,345	-0,898	1,677	-1,423	0,073
10	-2,344	-0,898	1,677	-1,423	0,073
11	-2,344	-0,898	1,676	-1,423	0,073
12	-2,343	-0,897	1,676	-1,422	0,073
13	-2,343	-0,897	1,675	-1,422	0,073
14	-2,342	-0,897	1,675	-1,422	0,073
15	-2,342	-0,897	1,674	-1,422	0,073
16	-2,341	-0,897	1,674	-1,421	0,073
17	-2,341	-0,896	1,673	-1,421	0,073
18	-2,340	-0,896	1,673	-1,421	0,073
19	-2,340	-0,896	1,672	-1,421	0,073
20	-2,339	-0,896	1,672	-1,420	0,073
21	-2,324	-0,890	1,657	-1,413	0,073

Tabla. A1.XXXIII. Coeficientes delta cruzados

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Nº Equilibrio	$\delta_{23} \cdot 10^3$ (L/mol)	$\delta_{24} \cdot 10^3$ (L/mol)	$\delta_{25} \cdot 10^3$ (L/mol)	$\delta_{26} \cdot 10^3$ (L/mol)	$\delta_{34} \cdot 10^3$ (L/mol)
1	-0,065	2,281	-0,207	1,072	3,596
2	-0,066	2,306	-0,207	1,082	3,630
3	-0,066	2,305	-0,207	1,082	3,629
4	-0,066	2,304	-0,207	1,082	3,629
5	-0,066	2,304	-0,207	1,081	3,628
6	-0,066	2,303	-0,207	1,081	3,627
7	-0,066	2,302	-0,207	1,081	3,626
8	-0,066	2,302	-0,207	1,081	3,625
9	-0,066	2,301	-0,207	1,080	3,624
10	-0,066	2,300	-0,207	1,080	3,623
11	-0,066	2,300	-0,207	1,080	3,622
12	-0,066	2,299	-0,207	1,079	3,621
13	-0,066	2,298	-0,207	1,079	3,620
14	-0,066	2,297	-0,207	1,079	3,619
15	-0,065	2,297	-0,207	1,079	3,618
16	-0,065	2,296	-0,207	1,078	3,617
17	-0,065	2,295	-0,207	1,078	3,616
18	-0,065	2,294	-0,207	1,078	3,614
19	-0,065	2,293	-0,207	1,077	3,613
20	-0,065	2,293	-0,207	1,077	3,612
21	-0,065	2,271	-0,207	1,068	3,582

Tabla. A1.XXXIII.bis. Coeficientes delta cruzados

Nº Equilibrio	$\delta_{35} \cdot 10^3$ (L/mol)	$\delta_{36} \cdot 10^3$ (L/mol)	$\delta_{45} \cdot 10^3$ (L/mol)	$\delta_{46} \cdot 10^3$ (L/mol)	$\delta_{56} \cdot 10^3$ (L/mol)
1	1,173	2,383	4,127	0,489	3,311
2	1,183	2,402	4,175	0,494	3,345
3	1,183	2,402	4,174	0,494	3,344
4	1,183	2,401	4,172	0,493	3,343
5	1,182	2,401	4,171	0,493	3,342
6	1,182	2,400	4,170	0,493	3,341
7	1,182	2,400	4,169	0,493	3,340
8	1,182	2,399	4,167	0,493	3,340
9	1,181	2,399	4,166	0,493	3,339

Tabla. A1.XXXIII.tris. Coeficientes delta cruzados (Continúa en pág. siguiente)

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Nº Equilibrio	$\delta_{35} \cdot 10^3$ (L/mol)	$\delta_{36} \cdot 10^3$ (L/mol)	$\delta_{45} \cdot 10^3$ (L/mol)	$\delta_{46} \cdot 10^3$ (L/mol)	$\delta_{56} \cdot 10^3$ (L/mol)
10	1,181	2,398	4,164	0,493	3,338
11	1,181	2,397	4,163	0,493	3,337
12	1,180	2,397	4,162	0,492	3,336
13	1,180	2,396	4,160	0,492	3,335
14	1,180	2,396	4,159	0,492	3,334
15	1,180	2,395	4,157	0,492	3,333
16	1,179	2,394	4,156	0,492	3,331
17	1,179	2,394	4,154	0,492	3,330
18	1,179	2,393	4,153	0,492	3,329
19	1,178	2,393	4,151	0,491	3,328
20	1,178	2,392	4,150	0,491	3,327
21	1,169	2,375	4,108	0,488	3,298

Tabla. A1.XXXIII.tris. Coeficientes delta cruzados (Viene de pág. anterior)

### A1.C2.11.4. Cálculo de volúmenes de líquido saturado

Los volúmenes de líquido saturado se estiman mediante la ecuación de *Rackett*, propuesta en la expresión (A1.82). Los datos requeridos se toman de las tablas A1.VII y A1.XXIX y los resultados se listan en la siguiente tabla:

Nº Equilibrio	$V_1^L$	$V_2^L$	$V_3^L$	$V_4^L$	$V_5^L$	$V_6^L$
1	0,087	0,096	0,097	0,091	0,110	0,101
2	0,087	0,096	0,097	0,091	0,109	0,101
3	0,087	0,096	0,097	0,091	0,109	0,101
4	0,087	0,096	0,097	0,091	0,109	0,101
5	0,087	0,096	0,097	0,091	0,109	0,101
6	0,087	0,096	0,097	0,091	0,109	0,101
7	0,087	0,096	0,097	0,091	0,109	0,101
8	0,087	0,096	0,097	0,091	0,109	0,101
9	0,087	0,096	0,097	0,091	0,109	0,101
10	0,087	0,096	0,097	0,091	0,109	0,101
11	0,087	0,096	0,097	0,091	0,109	0,101

Tabla. A1.XXXIV. Volúmenes de líquido saturado (Continúa en pág. siguiente)

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Nº Equilibrio	$V_1^L$	$V_2^L$	$V_3^L$	$V_4^L$	$V_5^L$	$V_6^L$
12	0,087	0,096	0,097	0,091	0,109	0,101
13	0,087	0,096	0,097	0,091	0,109	0,101
14	0,087	0,096	0,097	0,091	0,109	0,101
15	0,087	0,096	0,097	0,091	0,109	0,101
16	0,087	0,096	0,097	0,091	0,109	0,101
17	0,087	0,096	0,097	0,091	0,109	0,101
18	0,087	0,096	0,097	0,091	0,109	0,101
19	0,087	0,096	0,097	0,091	0,109	0,101
20	0,087	0,096	0,097	0,091	0,109	0,101
21	0,087	0,096	0,097	0,091	0,110	0,101

Tabla. A1.XXXIV. Volúmenes de líquido saturado (Viene de pág. anterior)

Los volúmenes están dados en L/mol, al igual que los volúmenes críticos.

### A1.C2.11.5. Cálculo de $\Phi_i$

Atendiendo a la ecuación (A1.79.4), se está en disposición de desarrollar el doble sumatorio y calcular los  $\Phi_i$ :

$$\frac{1}{2} \sum_k \sum_j y_k y_j (2\delta_{ki} - \delta_{kj})$$

Donde debe recordarse:

$$(A1.77) \begin{cases} \delta_{ki} = 2B_{ki} - B_{kk} - B_{ii} (1) \\ \delta_{ij} = 2B_{ij} - B_{ii} - B_{jj} (2) \\ \delta_{ii} = \delta_{kk} = \dots = 0 (3) \\ \delta_{ik} = \delta_{ki}, \delta_{ij} = \delta_{ji}, etc. \end{cases}$$

Para el componente  $i=1$  se desarrolla como sigue:

$$\frac{1}{2} [y_1 y_1 (2\delta_{11} - \delta_{11}) + y_1 y_2 (2\delta_{11} - \delta_{12}) + y_1 y_3 (2\delta_{11} - \delta_{13}) + y_1 y_4 (2\delta_{11} - \delta_{14}) + y_1 y_5 (2\delta_{11} - \delta_{15}) + y_1 y_6 (2\delta_{11} - \delta_{16}) + y_2 y_1 (2\delta_{21} - \delta_{21}) + y_2 y_2 (2\delta_{21} - \delta_{22}) + y_2 y_3 (2\delta_{21} - \delta_{23}) + y_2 y_4 (2\delta_{21} - \delta_{24}) + y_2 y_5 (2\delta_{21} - \delta_{25}) + y_2 y_6 (2\delta_{21} - \delta_{26}) + y_3 y_1 (2\delta_{31} - \delta_{31}) + y_3 y_2 (2\delta_{31} - \delta_{32}) + y_3 y_3 (2\delta_{31} - \delta_{33}) + y_3 y_4 (2\delta_{31} - \delta_{34}) + y_3 y_5 (2\delta_{31} - \delta_{35}) + y_3 y_6 (2\delta_{31} - \delta_{36}) + y_4 y_1 (2\delta_{41} - \delta_{41}) + y_4 y_2 (2\delta_{41} - \delta_{42}) + y_4 y_3 (2\delta_{41} - \delta_{43}) + y_4 y_4 (2\delta_{41} - \delta_{44}) + y_4 y_5 (2\delta_{41} - \delta_{45}) + y_4 y_6 (2\delta_{41} - \delta_{46}) + y_5 y_1 (2\delta_{51} - \delta_{51}) + y_5 y_2 (2\delta_{51} - \delta_{52}) + y_5 y_3 (2\delta_{51} - \delta_{53}) + y_5 y_4 (2\delta_{51} - \delta_{54}) + y_5 y_5 (2\delta_{51} - \delta_{55}) + y_5 y_6 (2\delta_{51} - \delta_{56}) + y_6 y_1 (2\delta_{61} - \delta_{61}) + y_6 y_2 (2\delta_{61} - \delta_{62}) + y_6 y_3 (2\delta_{61} - \delta_{63}) + y_6 y_4 (2\delta_{61} - \delta_{64}) + y_6 y_5 (2\delta_{61} - \delta_{65}) + y_6 y_6 (2\delta_{61} - \delta_{66})] \quad (A1.116)$$

Si se efectúan los paréntesis, se intercambian los subíndices cuando proceda ordenarlos de menor a mayor, se aplican las consideraciones de (A1.77) y se extrae factor común, en todos los casos posibles sobre (A1.116), se obtiene:

$$[y_2^2 \delta_{12} + y_3^2 \delta_{13} + y_4^2 \delta_{14} + y_5^2 \delta_{15} + y_6^2 \delta_{16} + y_2 y_3 (\delta_{12} + \delta_{13} - \delta_{23}) + y_2 y_4 (\delta_{12} + \delta_{14} - \delta_{24}) + y_2 y_5 (\delta_{12} + \delta_{15} - \delta_{25}) + y_2 y_6 (\delta_{12} + \delta_{16} - \delta_{26}) + y_3 y_4 (\delta_{13} + \delta_{14} - \delta_{34}) + y_3 y_5 (\delta_{13} + \delta_{15} - \delta_{35}) + y_3 y_6 (\delta_{13} + \delta_{16} - \delta_{36}) + y_4 y_5 (\delta_{14} + \delta_{15} - \delta_{45}) + y_4 y_6 (\delta_{14} + \delta_{16} - \delta_{46}) + y_5 y_6 (\delta_{15} + \delta_{16} - \delta_{56})] \quad (A1.117)$$

De donde el doble sumatorio puede generalizarse según:

$$\sum_{j < i} y_j^2 \delta_{ji} + \sum_{j > i} y_j^2 \delta_{ij} + \sum_{k < i} \sum_{k < j < i} y_k y_j (\delta_{ki} + \delta_{ji} - \delta_{kj}) + \sum_{k < i} \sum_{j > k} y_k y_j (\delta_{ki} + \delta_{ij} - \delta_{kj}) + \sum_{k > i} \sum_{j > k} y_k y_j (\delta_{ik} + \delta_{ij} - \delta_{kj}) \quad (A1.118)$$

Desarrollando (A1.118) para los seis componentes e introduciéndolos en (A1.79.4) se obtienen los distintos  $\Phi_i$ :

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

$$\Phi_1 = e \frac{(P - P_1^0)(B_1 - V_1^L) + P[y_2^2\delta_{12} + y_3^2\delta_{13} + y_4^2\delta_{14} + y_5^2\delta_{15} + y_6^2\delta_{16} + y_2y_3(\delta_{12} + \delta_{13} - \delta_{23}) + y_2y_4(\delta_{12} + \delta_{14} - \delta_{24}) + y_2y_5(\delta_{12} + \delta_{15} - \delta_{25}) + y_2y_6(\delta_{12} + \delta_{16} - \delta_{26}) + y_3y_4(\delta_{13} + \delta_{14} - \delta_{34}) + y_3y_5(\delta_{13} + \delta_{15} - \delta_{35}) + y_3y_6(\delta_{13} + \delta_{16} - \delta_{36}) + y_4y_5(\delta_{14} + \delta_{15} - \delta_{45}) + y_4y_6(\delta_{14} + \delta_{16} - \delta_{46}) + y_5y_6(\delta_{15} + \delta_{16} - \delta_{56})]}{RT} \quad (A1.119)$$

$$\Phi_2 = e \frac{(P - P_2^0)(B_2 - V_2^L) + P[y_1^2\delta_{12} + y_3^2\delta_{23} + y_4^2\delta_{24} + y_5^2\delta_{25} + y_6^2\delta_{26} + y_1y_3(\delta_{12} + \delta_{23} - \delta_{13}) + y_1y_4(\delta_{12} + \delta_{24} - \delta_{14}) + y_1y_5(\delta_{12} + \delta_{25} - \delta_{15}) + y_1y_6(\delta_{12} + \delta_{26} - \delta_{16}) + y_3y_4(\delta_{23} + \delta_{24} - \delta_{34}) + y_3y_5(\delta_{23} + \delta_{25} - \delta_{35}) + y_3y_6(\delta_{23} + \delta_{26} - \delta_{36}) + y_4y_5(\delta_{24} + \delta_{25} - \delta_{45}) + y_4y_6(\delta_{24} + \delta_{26} - \delta_{46}) + y_5y_6(\delta_{25} + \delta_{26} - \delta_{56})]}{RT} \quad (A1.120)$$

$$\Phi_3 = e \frac{(P - P_3^0)(B_3 - V_3^L) + P[y_1^2\delta_{13} + y_2^2\delta_{23} + y_4^2\delta_{34} + y_5^2\delta_{35} + y_6^2\delta_{36} + y_1y_2(\delta_{13} + \delta_{23} - \delta_{12}) + y_1y_4(\delta_{13} + \delta_{34} - \delta_{14}) + y_1y_5(\delta_{13} + \delta_{35} - \delta_{15}) + y_1y_6(\delta_{13} + \delta_{36} - \delta_{16}) + y_2y_4(\delta_{23} + \delta_{34} - \delta_{24}) + y_2y_5(\delta_{23} + \delta_{35} - \delta_{25}) + y_2y_6(\delta_{23} + \delta_{36} - \delta_{26}) + y_4y_5(\delta_{34} + \delta_{35} - \delta_{45}) + y_4y_6(\delta_{34} + \delta_{36} - \delta_{46}) + y_5y_6(\delta_{35} + \delta_{36} - \delta_{56})]}{RT} \quad (A1.121)$$

$$\Phi_4 = e \frac{(P - P_4^0)(B_4 - V_4^L) + P[y_1^2\delta_{14} + y_2^2\delta_{24} + y_3^2\delta_{34} + y_5^2\delta_{45} + y_6^2\delta_{46} + y_1y_2(\delta_{14} + \delta_{24} - \delta_{12}) + y_1y_3(\delta_{14} + \delta_{34} - \delta_{13}) + y_1y_5(\delta_{14} + \delta_{45} - \delta_{15}) + y_1y_6(\delta_{14} + \delta_{46} - \delta_{16}) + y_2y_3(\delta_{24} + \delta_{34} - \delta_{23}) + y_2y_5(\delta_{24} + \delta_{45} - \delta_{25}) + y_2y_6(\delta_{24} + \delta_{46} - \delta_{26}) + y_3y_5(\delta_{34} + \delta_{45} - \delta_{35}) + y_3y_6(\delta_{34} + \delta_{46} - \delta_{36}) + y_5y_6(\delta_{45} + \delta_{46} - \delta_{56})]}{RT} \quad (A1.122)$$

$$\Phi_5 = e^{\frac{(P - P_5^0)(B_5 - V_5^L) + P[y_1^2\delta_{15} + y_2^2\delta_{25} + y_3^2\delta_{35} + y_4^2\delta_{45} + y_6^2\delta_{56} + y_1y_2(\delta_{15} + \delta_{25} - \delta_{12}) + y_1y_3(\delta_{15} + \delta_{35} - \delta_{13}) + y_1y_4(\delta_{15} + \delta_{45} - \delta_{14}) + y_1y_6(\delta_{15} + \delta_{56} - \delta_{16}) + y_2y_3(\delta_{25} + \delta_{35} - \delta_{23}) + y_2y_4(\delta_{25} + \delta_{45} - \delta_{24}) + y_2y_6(\delta_{25} + \delta_{56} - \delta_{26}) + y_3y_4(\delta_{35} + \delta_{45} - \delta_{34}) + y_3y_6(\delta_{35} + \delta_{56} - \delta_{36}) + y_4y_6(\delta_{45} + \delta_{56} - \delta_{46})]}{RT}} \quad (A1.123)$$

$$\Phi_6 = e^{\frac{(P - P_6^0)(B_6 - V_6^L) + P[y_1^2\delta_{16} + y_2^2\delta_{26} + y_3^2\delta_{36} + y_4^2\delta_{46} + y_5^2\delta_{56} + y_1y_2(\delta_{16} + \delta_{26} - \delta_{12}) + y_1y_3(\delta_{16} + \delta_{36} - \delta_{13}) + y_1y_4(\delta_{16} + \delta_{46} - \delta_{14}) + y_1y_5(\delta_{16} + \delta_{56} - \delta_{15}) + y_2y_3(\delta_{26} + \delta_{36} - \delta_{23}) + y_2y_4(\delta_{26} + \delta_{46} - \delta_{24}) + y_2y_5(\delta_{26} + \delta_{56} - \delta_{25}) + y_3y_4(\delta_{36} + \delta_{46} - \delta_{34}) + y_3y_5(\delta_{36} + \delta_{56} - \delta_{35}) + y_4y_5(\delta_{46} + \delta_{56} - \delta_{45})]}{RT}} \quad (A1.124)$$

La aplicación de las ecuaciones (A1.119) a (A1.124) a la presión de trabajo, dada en la sección A1.C2.2, las últimas presiones de saturación de los componentes, listadas en la Tabla A1.XXVII, los coeficientes viriales segundos puros, dados en la Tabla A1.XXXI, los volúmenes de líquido saturado tabulados en A1.XXXIV, las composiciones de vapor consignadas en la Tabla A1.XXVIII, los coeficientes delta cruzados presentados en las tablas A1.XXXIII, A1.XXXIII.bis y A1.XXXIII.tris, y la última temperatura de equilibrio en A1.XXVI, conocido R; se obtiene:

Nº Equilibrio	$\Phi_1$	$\Phi_2$	$\Phi_3$	$\Phi_4$	$\Phi_5$	$\Phi_6$
1	0,999	1,006	1,004	0,979	1,019	0,987
2	0,997	1,003	1,002	0,977	1,017	0,985
3	0,997	1,003	1,002	0,977	1,017	0,985
4	0,997	1,003	1,002	0,977	1,017	0,985
5	0,997	1,003	1,002	0,977	1,017	0,985
6	0,997	1,004	1,002	0,977	1,017	0,985
7	0,997	1,004	1,002	0,977	1,017	0,985

Tabla. A1.XXXV. Cálculo de los  $\Phi_i$  (Continúa en pág. siguiente)

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Nº Equilibrio	$\Phi_1$	$\Phi_2$	$\Phi_3$	$\Phi_4$	$\Phi_5$	$\Phi_6$
8	0,997	1,004	1,002	0,977	1,017	0,985
9	0,997	1,004	1,002	0,977	1,017	0,986
10	0,997	1,004	1,002	0,977	1,017	0,986
11	0,997	1,004	1,002	0,977	1,017	0,986
12	0,997	1,004	1,002	0,977	1,017	0,986
13	0,998	1,004	1,002	0,977	1,017	0,986
14	0,998	1,004	1,002	0,977	1,017	0,986
15	0,998	1,004	1,002	0,978	1,018	0,986
16	0,998	1,004	1,002	0,978	1,018	0,986
17	0,998	1,004	1,003	0,978	1,018	0,986
18	0,998	1,004	1,003	0,978	1,018	0,986
19	0,998	1,004	1,003	0,978	1,018	0,986
20	0,998	1,005	1,003	0,978	1,018	0,986
21	1,000	1,006	1,005	0,980	1,020	0,988

Tabla. A1.XXXV. Cálculo de los  $\Phi_i$  (Viene de pág. anterior)

### **A1.C2.12. Cálculo de la presión de saturación (4)**

Conocidos los  $\Phi_i$ , pueden actualizarse las presiones de saturación de los componentes en equilibrio, por aplicación de las ecuaciones (A1.106) a (A1.111) a los datos de presión, dada en la sección A1.C2.2, los coeficientes de actividad listados en la Tabla A1.XXIV, las composiciones dadas en la Tabla A1.IV, las últimas presiones de saturación calculadas, tabuladas en A1.XXVII y los datos de la Tabla A1.XXXV; se recalculan:

Nº Equilibrio	$P_1^0$ (atm)	$P_2^0$ (atm)	$P_3^0$ (atm)	$P_4^0$ (atm)	$P_5^0$ (atm)	$P_6^0$ (atm)
1	2,474	2,683	2,624	1,873	3,090	2,139
2	2,396	2,599	2,543	1,812	2,997	2,071
3	2,398	2,601	2,545	1,813	2,999	2,073
4	2,399	2,603	2,546	1,815	3,001	2,074
5	2,401	2,605	2,548	1,816	3,004	2,076
6	2,403	2,607	2,550	1,818	3,006	2,077

Tabla. A1.XXXVI. Cálculo de  $P_i^0$  conocidos los  $\Phi_i$ . (Continúa en pág. siguiente)

Nº Equilibrio	$P_1^0$ (atm)	$P_2^0$ (atm)	$P_3^0$ (atm)	$P_4^0$ (atm)	$P_5^0$ (atm)	$P_6^0$ (atm)
7	2,405	2,609	2,552	1,819	3,008	2,079
8	2,407	2,611	2,554	1,821	3,010	2,081
9	2,409	2,613	2,556	1,822	3,012	2,082
10	2,411	2,615	2,558	1,824	3,015	2,084
11	2,413	2,617	2,560	1,825	3,017	2,086
12	2,415	2,619	2,562	1,827	3,019	2,088
13	2,417	2,621	2,564	1,828	3,022	2,089
14	2,419	2,624	2,567	1,830	3,024	2,091
15	2,421	2,626	2,569	1,832	3,027	2,093
16	2,423	2,628	2,571	1,833	3,029	2,095
17	2,425	2,630	2,573	1,835	3,032	2,097
18	2,427	2,633	2,576	1,837	3,034	2,099
19	2,429	2,635	2,578	1,839	3,037	2,101
20	2,432	2,638	2,580	1,840	3,040	2,103
21	2,500	2,711	2,652	1,894	3,120	2,162

Tabla. A1.XXXVI. Cálculo de  $P_i^0$  conocidos los  $\Phi_i$ . (Viene de pág. anterior)

### **A1.C2.13. Cálculos de temperatura (3)**

De nuevo, siguiendo el esquema iterativo, una vez actualizadas las presiones de saturación, procede realizar lo propio con la temperatura del equilibrio. Para ello, se procede como en la sección A1.C2.8, y se obtienen los siguientes datos:

Nº Equilibrio	$T_1^0$ (K)	$T_2^0$ (K)	$T_3^0$ (K)	$T_4^0$ (K)	$T_5^0$ (K)	$T_6^0$ (K)	$T_3$ (K)
1	294,533	294,534	294,534	294,532	294,535	294,533	294,533
2	293,525	293,524	293,524	293,527	293,521	293,525	293,525
3	293,547	293,546	293,547	293,550	293,544	293,548	293,547
4	293,570	293,569	293,570	293,573	293,567	293,571	293,570
5	293,594	293,593	293,593	293,596	293,590	293,594	293,593
6	293,618	293,617	293,617	293,620	293,614	293,618	293,617
7	293,642	293,641	293,641	293,644	293,638	293,642	293,641
8	293,666	293,665	293,665	293,669	293,662	293,667	293,666

Tabla. A1.XXXVII. Tercer cálculo de T de equilibrio. (Continúa en pág. sig.)

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Nº Equilibrio	T <sub>1</sub> <sup>0</sup> (K)	T <sub>2</sub> <sup>0</sup> (K)	T <sub>3</sub> <sup>0</sup> (K)	T <sub>4</sub> <sup>0</sup> (K)	T <sub>5</sub> <sup>0</sup> (K)	T <sub>6</sub> <sup>0</sup> (K)	T <sub>3</sub> (K)
9	293,691	293,690	293,690	293,694	293,687	293,692	293,691
10	293,717	293,716	293,716	293,719	293,713	293,717	293,716
11	293,742	293,741	293,742	293,745	293,738	293,743	293,742
12	293,769	293,767	293,768	293,772	293,764	293,769	293,768
13	293,795	293,794	293,794	293,798	293,791	293,796	293,795
14	293,822	293,821	293,821	293,825	293,818	293,823	293,822
15	293,849	293,848	293,849	293,852	293,845	293,850	293,849
16	293,877	293,876	293,876	293,880	293,873	293,878	293,877
17	293,905	293,904	293,904	293,908	293,901	293,906	293,905
18	293,934	293,933	293,933	293,937	293,930	293,934	293,933
19	293,963	293,962	293,962	293,966	293,958	293,963	293,962
20	293,992	293,991	293,991	293,995	293,988	293,993	293,992
21	294,866	294,866	294,866	294,866	294,866	294,866	294,866

Tabla. A1.XXXVII. Tercer cálculo de T de equilibrio. (Viene de pág. anterior)

Se han utilizado las presiones de saturación más actuales, tomadas del apartado anterior, para repetir la sección A1.C2.8.

Como puede observarse, la dispersión de las temperaturas de saturación alrededor de la media comienza a reducirse, respecto al anterior cálculo de temperaturas, como fruto de la convergencia creciente de los datos en torno al equilibrio. Las temperaturas de saturación deben ser coincidentes, puesto que todos los componentes vaporizan a la misma temperatura en equilibrio.

Si los coeficientes de actividad fuesen dependientes de la temperatura, sus valores habrían de recalcularse. En este caso no lo son y por tanto, puede obviarse dicho paso iterativo. Seguidamente, procedería obtener la presión de saturación, para la nueva temperatura de equilibrio, como se practicó en la sección A1.C2.9, de forma que se ha cerrado el ciclo, puesto que al volver sobre uno de los pasos, estos deberán repetirse tantas veces como se precise, hasta que la convergencia obtenida sea satisfactoria. Desde A1.C2.9 hasta A1.C2.13, se reiterará lo descrito en cada una de tales secciones, a los datos más actuales.

### **A1.C2.14. Comprobación de la convergencia**

Se presenta en esta sección el criterio de evaluación de la convergencia, que permitirá decidir en qué punto puede concluirse el bucle de cálculo: tras cada obtención de una nueva temperatura de equilibrio, (comenzando por la tercera, dada en la sección anterior), se planteará la verificación de la ecuación del criterio del equilibrio termodinámico. A este fin, se calcula para cada componente el valor de cada miembro de la ecuación, y se decide según la diferencia entre ambos, en términos absolutos. La primera verificación se tabula seguidamente:

Nº Equilibrio	$y_1\Phi_1P$	$x_1\gamma_1P_1^0$	$\Delta$	$y_2\Phi_2P$	$x_2\gamma_2P_2^0$	$\Delta$	$y_3\Phi_3P$	$x_3\gamma_3P_3^0$	$\Delta$
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,5384	0,5359	0,0024	0,5325	0,5310	0,0015
2	1,0952	1,0967	0,0015	0,6605	0,6572	0,0033	0,3982	0,3969	0,0013
3	1,0878	1,0892	0,0014	0,6566	0,6532	0,0034	0,3962	0,3948	0,0014
4	1,0805	1,0817	0,0013	0,6527	0,6493	0,0034	0,3942	0,3928	0,0014
5	1,0731	1,0742	0,0012	0,6488	0,6454	0,0035	0,3922	0,3908	0,0014
6	1,0656	1,0667	0,0011	0,6450	0,6415	0,0035	0,3902	0,3888	0,0015
7	1,0582	1,0592	0,0010	0,6412	0,6376	0,0035	0,3883	0,3868	0,0015
8	1,0508	1,0516	0,0009	0,6374	0,6338	0,0036	0,3863	0,3848	0,0015
9	1,0433	1,0441	0,0008	0,6336	0,6300	0,0036	0,3843	0,3828	0,0015
10	1,0359	1,0365	0,0007	0,6299	0,6262	0,0037	0,3824	0,3808	0,0016
11	1,0284	1,0290	0,0006	0,6261	0,6225	0,0037	0,3805	0,3789	0,0016
12	1,0209	1,0214	0,0005	0,6224	0,6187	0,0037	0,3785	0,3769	0,0016
13	1,0134	1,0138	0,0004	0,6187	0,6150	0,0038	0,3766	0,3750	0,0016
14	1,0059	1,0061	0,0003	0,6151	0,6113	0,0038	0,3747	0,3730	0,0017
15	0,9983	0,9985	0,0002	0,6114	0,6076	0,0038	0,3728	0,3711	0,0017
16	0,9907	0,9908	0,0001	0,6078	0,6039	0,0039	0,3709	0,3692	0,0017
17	0,9832	0,9832	0,0000	0,6042	0,6003	0,0039	0,3691	0,3673	0,0018
18	0,9755	0,9755	0,0001	0,6006	0,5966	0,0039	0,3672	0,3654	0,0018
19	0,9679	0,9678	0,0002	0,5970	0,5930	0,0040	0,3653	0,3635	0,0018
20	0,9603	0,9600	0,0002	0,5934	0,5894	0,0040	0,3634	0,3616	0,0018
21	2,5000	2,5000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Tabla. A1.XXXVIII. Verificación del criterio de equilibrio termodinámico

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Nº Equilibrio	$y_4\Phi_4P$	$x_4\gamma_4P_4^0$	$\Delta$	$y_5\Phi_5P$	$x_5\gamma_5P_5^0$	$\Delta$	$y_6\Phi_6P$	$x_6\gamma_6P_6^0$	$\Delta$
1	0,3709	0,3794	0,0085	0,6356	0,6243	0,0113	0,4266	0,4326	0,0059
2	0,2179	0,2226	0,0048	0,1008	0,0989	0,0018	0,0226	0,0229	0,0003
3	0,2167	0,2215	0,0047	0,0988	0,0970	0,0018	0,0389	0,0394	0,0005
4	0,2156	0,2203	0,0047	0,0968	0,0950	0,0018	0,0552	0,0559	0,0007
5	0,2145	0,2192	0,0047	0,0949	0,0931	0,0017	0,0714	0,0723	0,0009
6	0,2134	0,2180	0,0046	0,0929	0,0912	0,0017	0,0875	0,0887	0,0011
7	0,2123	0,2169	0,0046	0,0910	0,0893	0,0017	0,1037	0,1050	0,0013
8	0,2112	0,2158	0,0045	0,0890	0,0874	0,0017	0,1198	0,1213	0,0015
9	0,2102	0,2146	0,0045	0,0871	0,0855	0,0016	0,1359	0,1376	0,0017
10	0,2091	0,2135	0,0044	0,0852	0,0836	0,0016	0,1520	0,1539	0,0019
11	0,2080	0,2124	0,0044	0,0833	0,0817	0,0016	0,1680	0,1701	0,0021
12	0,2069	0,2113	0,0044	0,0813	0,0798	0,0015	0,1840	0,1863	0,0023
13	0,2059	0,2102	0,0043	0,0794	0,0779	0,0015	0,2000	0,2025	0,0025
14	0,2048	0,2091	0,0043	0,0776	0,0761	0,0015	0,2160	0,2186	0,0026
15	0,2038	0,2080	0,0042	0,0757	0,0742	0,0015	0,2320	0,2348	0,0028
16	0,2027	0,2069	0,0042	0,0738	0,0723	0,0014	0,2479	0,2509	0,0030
17	0,2017	0,2058	0,0042	0,0719	0,0705	0,0014	0,2639	0,2670	0,0031
18	0,2006	0,2048	0,0041	0,0700	0,0687	0,0014	0,2798	0,2831	0,0033
19	0,1996	0,2037	0,0041	0,0682	0,0668	0,0013	0,2957	0,2992	0,0035
20	0,1986	0,2026	0,0040	0,0663	0,0650	0,0013	0,3116	0,3153	0,0036
21	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Tabla. A1.XXXVIII.bis. Verificación del criterio de equilibrio termodinámico

Donde se han tomado las composiciones de vapor de la sección A1.C2.10, los  $\Phi_i$  de la sección A1.C2.11, la presión de A1.C2.2, la composición de fase líquida de A1.C2.1, los coeficientes de actividad de la sección A1.C2.6 y las presiones de saturación de A1.C2.12. Cada vez que se reiteran los cálculos de A1.C2.13, se verifica el criterio fundamental del equilibrio termodinámico, con los datos actualizados.

### **A1.C2.15. Datos de equilibrio**

Cuando se reitera el cálculo en nueve ocasiones, se obtienen errores inferiores al octavo decimal. Los datos finales de equilibrio, tomados de la novena iteración, se tabulan para cerrar el capítulo:

Nº Equilibrio	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_6$	$T_{11}$ (K)
1	0,000	0,213	0,212	0,155	0,245	0,175	294,537
2	0,440	0,262	0,158	0,091	0,039	0,009	293,520
3	0,437	0,260	0,158	0,091	0,038	0,016	293,542
4	0,434	0,259	0,157	0,090	0,037	0,023	293,565
5	0,431	0,257	0,156	0,090	0,037	0,029	293,588
6	0,428	0,256	0,155	0,089	0,036	0,036	293,612
7	0,425	0,254	0,154	0,089	0,035	0,043	293,636
8	0,422	0,253	0,154	0,088	0,034	0,049	293,661
9	0,419	0,251	0,153	0,088	0,034	0,056	293,686
10	0,416	0,250	0,152	0,087	0,033	0,062	293,711
11	0,413	0,248	0,151	0,087	0,032	0,069	293,737
12	0,410	0,247	0,150	0,086	0,031	0,076	293,763
13	0,407	0,245	0,150	0,086	0,031	0,082	293,789
14	0,403	0,244	0,149	0,086	0,030	0,089	293,816
15	0,400	0,242	0,148	0,085	0,029	0,095	293,843
16	0,397	0,241	0,147	0,085	0,028	0,102	293,871
17	0,394	0,239	0,147	0,084	0,028	0,108	293,899
18	0,391	0,238	0,146	0,084	0,027	0,115	293,928
19	0,388	0,236	0,145	0,083	0,026	0,121	293,957
20	0,385	0,235	0,144	0,083	0,026	0,128	293,986
21	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	294,866

Tabla. A1.XXXIX. Composiciones de la fase vapor en equilibrio

Donde las composiciones de vapor en la Tabla A1.XXXIX se encuentran en equilibrio, a la temperatura listada en la misma tabla, con las de líquido en la Tabla A1.IV, a la presión recogida en la sección A1.C2.2.



### **Capítulo A1.C3. Equilibrio de fases para “EXTRACTIVA 1”**

En este tercer capítulo del anexo de datos termodinámicos, se procurarán las composiciones de equilibrio a las condiciones requeridas en la operación “EXTRACTIVA 1”. Dado que en el anexo de diseño de unidades se explicitará la idiosincrasia de dicha operación, en este capítulo únicamente se desarrollarán al caso correspondiente, las expresiones obtenidas en el capítulo primero.

La generación de datos de equilibrio es un proceso cíclico donde, en función de datos conocidos, se reiteran los cálculos tanto como sea preciso para lograr una convergencia en el criterio fundamental del equilibrio termodinámico. El procedimiento se ha mostrado en la Figura A1.1 en el capítulo anterior.

Se tiene una iteración en doble bucle, primero para los coeficientes de actividad y luego para la composición del vapor, como se explicó en el mismo capítulo.

El objetivo del capítulo presente estriba en desarrollar y particularizar el ciclo dado en la Figura A1.1. A este fin, se establecerán tantas secciones como pasos requiere el procedimiento.

#### **A1.C3.1. Introducción de la composición de la fase líquida**

La operación “EXTRACTIVA 1” constituye el segundo proceso del tren de separación; su alimentación es el vapor de la operación precedente cuya composición se refiere en la siguiente tabla:

$(x_U)_1$	$(x_U)_2$	$(x_U)_3$	$(x_U)_4$	$(x_U)_5$	$(x_U)_6$
0,349	0,210	0,128	0,074	0,033	0,206
<b>Composición molar de la alimentación</b>					

Tabla. A1.XL. Composición de U, alimentación de “EXTRACTIVA 1”

Donde los componentes son los que se enumeran seguidamente:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

---

1. 1,3-Butadieno ( $C_4H_6$ ).
2. Isobuteno ( $C_4H_8$ ).
3. 1-Buteno ( $C_4H_8$ ).
4. Cis-2-buteno ( $C_4H_8$ ).
5. Isobutano ( $C_4H_{10}$ ).
6. Extractante: 1-metil-2-pirrolidona, NMP, ( $C_5H_9NO$ ).
7. Extractante: furan-2-carbaldehído, furfural, ( $C_5H_4O_2$ ).

La ordenación de los componentes sigue el criterio del capítulo anterior. En este caso, se consideró el contenido en butano despreciable frente a la composición del resto de componentes, y se repartió su cuantía entre el resto de especies, a excepción del butadieno, cuyo caudal no se ha modificado, puesto que se requiere rigurosidad en el tratamiento de las cantidades de butadieno obtenidas tras cada operación, con objeto de lograr exactamente la producción estipulada.

A requerimiento de la operación que, como su nombre indica, se trata de una destilación extractiva, se introduce un sexto componente que hará las veces de extractante. Su función consiste en aumentar la volatilidad relativa de las sustancias más ligeras y enriquecer el líquido en el componente de interés, el butadieno. Aunque el cálculo de la composición de la alimentación de "EXTRACTIVA 1" se justifica en el anexo de diseño de unidades, puede adelantarse que dicha composición se ha ajustado añadiendo una cantidad de extractante igual al 20% del vapor de "SIMPLE", a la sazón la operación precedente.

La operación de purificación del butadieno en la industria suele realizarse mediante algún procedimiento de destilación extractiva con NMP o furfural. En este capítulo se generarán dos sistemas de equilibrio, uno para los componentes de la operación anterior, a excepción hecha del butano, más el primer extractante; y otro con el segundo. El objeto de esto es elegir a la par el disolvente más económico, unido a la operación que menos etapas de equilibrio requiera.

En todo caso, a cualquiera de los dos extractantes se le asignará el subíndice seis.

La destilación extractiva consiste en vaporizar un líquido en múltiples etapas de equilibrio: las corrientes de líquido y vapor emanadas de cada etapa forman un equilibrio, por lo que deberán introducirse una serie de composiciones necesarias para el diseño de la operación: composición del destilado, de la alimentación de “EXTRACTIVA 1”, del residuo y otras composiciones, de cuya aplicación se procurará cumplida justificación en el anexo de diseño de unidades.

De acuerdo con lo anterior, se introducirán los siguientes valores de composición de fase líquida:

	Nº Equilibrio	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>
<b>Extractante furfural o NMP</b>	1	0,011	0,677	0,206	0,000	0,106	0,000
	2	0,501	0,000	0,092	0,108	0,000	0,299
	3	0,349	0,210	0,128	0,074	0,033	0,206
<b>Extractante furfural</b>	4	0,635	0,000	0,132	0,124	0,000	0,109
	5	0,641	0,000	0,133	0,125	0,000	0,101
	6	0,012	0,700	0,215	0,000	0,073	0,000
	7	0,010	0,670	0,200	0,000	0,120	0,000

Tabla. A1.XLI. Lista de composiciones de fase líquida

Los componentes más volátiles vaporizarán selectivamente, por lo que es de esperar un líquido, conteniendo el extractante, menos concentrado en tales componentes. De la misma forma, los compuestos más pesados, (o menos volátiles), enriquecerán preferentemente el líquido rico en extractante. Los equilibrios 1, 2 y 3 corresponden a las composiciones del destilado, el residuo y la alimentación a “EXTRACTIVA 1”, respectivamente. Las composiciones son válidas para cualquiera de los dos extractantes. Los equilibrios 4 y 5 corresponden, para el caso del extractante furfural, a las composiciones del líquido del último plato de columna, que debe vaporizarse para su devolución a ésta. Por último, también para el caso con extrac-

tante furfural, los equilibrios 6 y 7 permiten obtener, conocida la composición del destilado, la temperatura del vapor procedente del primer plato de columna que, parcialmente, se retorna a columna como reflujo, previa condensación total. Para los propósitos del presente anexo de cálculo de datos de equilibrio, es suficiente la explicación dada. Como se mencionó anteriormente, será en el anexo de diseño de unidades donde se amplíe convenientemente la justificación de la elección de estos datos de partida.

### **A1.C3.2. Introducción de la presión de equilibrio**

La presión se introduce como dato considerando la temperatura del equilibrio que generará. Una presión elevada aumenta la temperatura de los equilibrios, puesto que se fuerza a los componentes a permanecer en fase líquida a una misma temperatura de referencia.

La presión baja incrementa la volatilidad del sistema, por lo que disminuye la temperatura del equilibrio y favorece la separación, (lo que se traduce en menor número de platos).

La idiosincrasia del sistema en juego obliga a obtener una solución de compromiso: De un lado, un defecto de presión, pese a reducir el número de etapas de separación requeridas, disminuye la temperatura hasta límites no operativos, (en torno 0 °C). Por otro lado, un exceso de presión aumenta el número de etapas hasta límites no asumibles económicamente.

De esta forma, la solución intermedia se establecerá en base a la temperatura del equilibrio: aquella presión que garantice una temperatura similar a la ambiente será tomada como la presión del sistema como criterio optimizador.

La vía para averiguar el extremo antedicho, consiste en la ecuación de *Antoine*. Se prueba con una presión, (atmosférica para comenzar), y se obtiene la temperatura de saturación de los componentes, despejando convenientemente de la ecuación. Al promediar

cada una de las temperaturas de saturación se obtiene una temperatura del equilibrio, (que no coincidirá con la final puesto que se trata de la primera de varias iteraciones, si bien proporciona una aproximación razonable).

Tras varias pruebas, se llega a la conclusión de que una presión de 3 atm concuerda con una temperatura de los equilibrios próxima a la ambiental, como se mostrará en próximas tablas. Por tanto, la elección de la presión, para el sistema con extractante NMP y también furfural queda fijada en:

$$P = 3 \text{ atm}$$

### **A1.C3.3. Introducción de datos**

Los datos que requerirá la generación de composiciones de equilibrio son los que se enumeran seguidamente:

- Parámetros *UNIFAC*
  - o Parámetros de subgrupo,  $R_k$  y  $Q_k$ .
  - o Número de subgrupos,  $\nu_k^{(i)}$ .
  - o Parámetros de interacción,  $a_{mk}$ .
- Coeficientes de *Antoine*,  $A_i$ ,  $B_i$  y  $C_i$ .
- Propiedades críticas
  - o Temperatura crítica,  $T_{ci}$ .
  - o Presión crítica,  $P_{ci}$ .
  - o Volumen crítico,  $V_{ci}$ .
  - o Factor de compresibilidad crítico,  $Z_{ci}$ .
  - o Factor acéntrico crítico,  $\omega_{ci}$ .
- Otras propiedades
  - o Peso molecular,  $PM_i$ .
  - o Temperatura normal de ebullición,  $T_i^0$  (normal).
  - o Parámetro  $k_{ij}$  de interacción, (véase capítulo primero).
  - o Constante universal de los gases,  $R$  en (atm·L/mol·K).
- Reglas de *Prausnitz*, (véase capítulo primero).

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Tales datos junto a sus particularidades, se presentan en los siguientes apartados en forma tabular, junto a las oportunas acotaciones.

### A1.C3.3.1. Parámetros UNIFAC

Previa consigna de los parámetros es preciso desglosar en sus subgrupos constituyentes, cada una de las moléculas de las especies del sistema en cuestión. En la figura que sigue, se presentan los componentes de la alimentación de la operación “EXTRACTIVA 1”, por sus fórmulas desarrolladas:

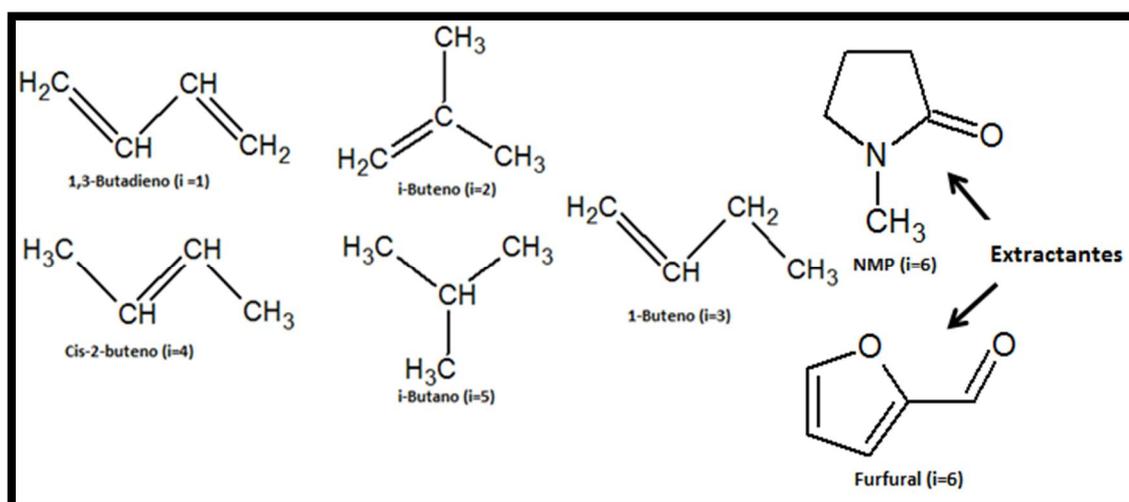


Figura. A1.3. Componentes de la alimentación U. (Elaboración propia)

De donde, atendiendo a la Tabla A1.I del capítulo primero, pueden discriminarse los siguientes subgrupos:

- 1,3-Butadieno: Dos subgrupos  $\text{CH}_2$  y dos CH.
- Isobuteno: Dos subgrupos  $\text{CH}_3$ , uno  $\text{CH}_2$  y uno C.
- 1-Buteno: Dos subgrupos  $\text{CH}_2$ , uno  $\text{CH}_3$  y uno CH.
- Cis-2-buteno: Dos subgrupos  $\text{CH}_3$  y dos CH.
- Isobutano: Tres subgrupos  $\text{CH}_3$  y uno CH.
- NMP: Corresponde con su grupo principal.
- Furfural: *Ídem ibídem*.

En este caso, dado que no todos los subgrupos pertenecen al grupo principal “Alcanos”, como se mostró en el capítulo anterior, las interacciones entre los mismos no son nulas y deberán recogerse en tabla aparte, según lo dispuesto en la Tabla A1.II.

Con lo anterior, tomando los datos listados en las tablas A1.I a A1.II, se tiene:

				Parámetros de subgrupo <i>UNIFAC</i>					
				i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6 (NMP)
Grupo	k	R <sub>k</sub>	Q <sub>k</sub>	v <sub>k</sub> <sup>(1)</sup>	v <sub>k</sub> <sup>(2)</sup>	v <sub>k</sub> <sup>(3)</sup>	v <sub>k</sub> <sup>(4)</sup>	v <sub>k</sub> <sup>(5)</sup>	v <sub>k</sub> <sup>(6)</sup>
CH <sub>3</sub>	1	0,9011	0,8480	0	2	1	2	3	0
CH <sub>2</sub>	2	0,6744	0,5400	2	1	2	0	0	0
CH	3	0,4469	0,2280	2	0	1	2	1	0
C	4	0,2195	0,0000	0	1	0	0	0	0
NMP	85	3,9810	3,2000	0	0	0	0	0	1

Tabla. A1.XLII. Parámetros de subgrupo *UNIFAC*. Extractante: NMP

				Parámetros de subgrupo <i>UNIFAC</i>					
				i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6 (Furfural)
Grupo	k	R <sub>k</sub>	Q <sub>k</sub>	v <sub>k</sub> <sup>(1)</sup>	v <sub>k</sub> <sup>(2)</sup>	v <sub>k</sub> <sup>(3)</sup>	v <sub>k</sub> <sup>(4)</sup>	v <sub>k</sub> <sup>(5)</sup>	v <sub>k</sub> <sup>(6)</sup>
CH <sub>3</sub>	1	0,9011	0,8480	0	2	1	2	3	0
CH <sub>2</sub>	2	0,6744	0,5400	2	1	2	0	0	0
CH	3	0,4469	0,2280	2	0	1	2	1	0
C	4	0,2195	0,0000	0	1	0	0	0	0
Furfural	61	3,1680	2,4810	0	0	0	0	0	1

Tabla. A1.XLIII. Parámetros de subgrupo *UNIFAC*. Extractante: Furfural

Parámetros de interacción a <sub>mk</sub> (K) (NMP)					
m	k = 1	k = 2	k = 3	k = 4	k = 85
1	0,000	0,000	0,000	0,000	220,300
2	0,000	0,000	0,000	0,000	220,300
3	0,000	0,000	0,000	0,000	220,300
4	0,000	0,000	0,000	0,000	220,300
85	13,890	13,890	13,890	13,890	0,000

Tabla. A1.XLIV. Parámetros de interacción *UNIFAC*. Extractante: NMP

Parámetros de interacción $a_{mk}$ (K) (Furfural)					
m	k = 1	k = 2	k = 3	k = 4	k = 61
1	0,000	0,000	0,000	0,000	354,600
2	0,000	0,000	0,000	0,000	354,600
3	0,000	0,000	0,000	0,000	354,600
4	0,000	0,000	0,000	0,000	354,600
61	-25,310	-25,310	-25,310	-25,310	0,000

Tabla. A1.XLV. Parámetros de interacción *UNIFAC*. Extractante: Furfural

### A1.C3.3.2. Coeficientes de Antoine

Los coeficientes de *Antoine* son números adimensionales que permiten, por la ecuación del mismo autor, encontrar la presión de saturación de un vapor conocida la temperatura del equilibrio, o bien la temperatura de saturación conocida la presión del sistema. En este caso, para los componentes de  $i=1$  a  $i=5$ , esto es, los hidrocarburos, la ecuación de *Antoine* responde a la siguiente expresión:

$$\ln P_i^0(\text{mmHg}) = A_i - \frac{B_i}{T(\text{K}) + C_i} \quad \text{Ecuación de Antoine (A1.87)}$$

Ecuación, que despejada para el caso de la temperatura de saturación, se escribe como sigue:

$$T_i^0(\text{K}) = \frac{B_i}{A_i - \ln P(\text{mmHg})} - C_i \quad (\text{A1.88})$$

Para el componente  $i=6$ , cuando este es NMP, es de aplicación la siguiente ecuación:

$$\ln P_6^0(\text{atm}) = A_6 + \frac{B_6}{T(\text{K}) + C_6} \quad \text{Ecuación de Antoine (A1.125)}$$

Ecuación, que despejada para el caso de la temperatura de saturación, se escribe como sigue:

$$T_6^0(\text{K}) = \frac{B_6}{\ln P(\text{atm}) - A_6} - C_6 \quad (\text{A1.126})$$

Para el componente  $i=6$ , cuando este es furfural, son aplicables las ecuaciones (A1.87) y (A1.88), considerando que la presión se expresa en bar y no en milímetros de mercurio.

Los coeficientes de *Antoine* se tabulan a renglón seguido:

Coeficientes de <i>Antoine</i>			
Butadieno ( $i = 1$ ) $\text{C}_4\text{H}_6$		i-Buteno ( $i = 2$ ) $\text{C}_4\text{H}_8$	
$A_1$	15,7727	$A_2$	15,7528
$B_1$	2142,66	$B_2$	2125,75
$C_1$	-34,30	$C_2$	-33,15
1-Buteno ( $i = 3$ ) $\text{C}_4\text{H}_8$		Cis-2-buteno ( $i = 4$ ) $\text{C}_4\text{H}_8$	
$A_3$	15,7564	$A_4$	15,8171
$B_3$	2132,42	$B_4$	2210,71
$C_3$	-33,15	$C_4$	-36,15
i-Butano ( $i = 5$ ) $\text{C}_4\text{H}_{10}$		NMP ( $i = 6$ ) $\text{C}_5\text{H}_9\text{NO}$	
$A_5$	15,5381	$A_6$	11,169384
$B_5$	2032,73	$B_6$	-4967,559
$C_5$	-33,15	$C_6$	-30,659
Furfural ( $i = 6$ ) $\text{C}_5\text{H}_4\text{O}_2$			
$A_6$	8,5214		
$B_6$	2760,09		
$C_6$	-110,4		

Tabla. A1.XLVI. Coeficientes de *Antoine*

### A1.C3.3.3. Propiedades críticas y temperaturas de ebullición normal

Se consignan en tabla las propiedades críticas precisadas y listadas *ut supra*, así como las temperaturas de ebullición normales:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Propiedades críticas y temperaturas normales de ebullición						
	$T_1^0$ (K) (normal)	268,7	$P_{c1}$ (atm)	42,7	$Z_{c1}$	0,270
	$T_2^0$ (K) (normal)	266,3	$P_{c2}$ (atm)	39,5	$Z_{c2}$	0,275
	$T_3^0$ (K) (normal)	266,9	$P_{c3}$ (atm)	39,7	$Z_{c3}$	0,277
	$T_4^0$ (K) (normal)	276,9	$P_{c4}$ (atm)	41,5	$Z_{c4}$	0,272
	$T_5^0$ (K) (normal)	261,3	$P_{c5}$ (atm)	36,0	$Z_{c5}$	0,283
NMP	$T_6^0$ (K) (normal)	475,2	$P_{c6}$ (atm)	47,4	$Z_{c6}$	0,253
Furfural	$T_6^0$ (K) (normal)	434,9	$P_{c6}$ (atm)	55,9	$Z_{c6}$	0,256
	$T_{c1}$ (K)	425,0	$V_{c1}$ (L/mol)	0,221	$\omega_1$	0,195
	$T_{c2}$ (K)	417,9	$V_{c2}$ (L/mol)	0,239	$\omega_2$	0,190
	$T_{c3}$ (K)	419,6	$V_{c3}$ (L/mol)	0,240	$\omega_3$	0,187
	$T_{c4}$ (K)	435,6	$V_{c4}$ (L/mol)	0,234	$\omega_4$	0,202
	$T_{c5}$ (K)	408,1	$V_{c5}$ (L/mol)	0,263	$\omega_5$	0,176
NMP	$T_{c6}$ (K)	710,2	$V_{c6}$ (L/mol)	0,311	$\omega_6$	0,443
Furfural	$T_{c6}$ (K)	670,2	$V_{c6}$ (L/mol)	0,252	$\omega_6$	0,3678

Tabla. A1.XLVII. Propiedades críticas y temperaturas normales de ebullición

Tales propiedades se han plasmado respetándose el número de cifras significativas con que figuran en la bibliografía\*.

### A1.C3.3.4. Otras propiedades

Los pesos moleculares de las sustancias implicadas en el equilibrio se tabulan seguidamente:

Pesos moleculares	
$PM_1$ (g/mol)	54,092
$PM_2$ (g/mol)	56,108
$PM_3$ (g/mol)	56,108
$PM_4$ (g/mol)	56,108

Tabla. A1.XLVIII. Pesos moleculares. (Continúa en pág. siguiente)

\* The properties of gases & liquids. R. C. Reid, J. M. Prausnitz, B. E. Poling. McGraw-Hill. 4ª Edición.

Modelado del equilibrio líquido-vapor en mezclas binarias y ternarias de interés en destilación vínica. J. O. Valderrama, C. A. Faúndez. Revista Inf. Tecnol. Vol. 14 n° 1 (2003). Págs. 83-92.

Pesos moleculares		
	PM <sub>5</sub> (g/mol)	58,124
NMP	PM <sub>6</sub> (g/mol)	99,134
Furfural	PM <sub>6</sub> (g/mol)	96,1

Tabla. A1.XLVIII. Pesos moleculares. (Viene de pág. anterior)

El parámetro de interacción  $k_{ij}$ , será despreciado debido al similar carácter químico de las especies hidrocarbonadas en equilibrio. No se presenta en la bibliografía indicación sobre la interacción posible entre los extractantes y el resto de componentes, por lo que se decide hacer nulos todos los  $k_{ij}$ . La constante universal de los gases se tomará en el valor y unidades indicadas abajo:

$$k_{ij} = 0$$

$$R = 0,082057 \text{ atm}\cdot\text{L/mol}\cdot\text{K}$$

#### A1.C3.3.5. Reglas de combinación de Prausnitz

La aplicación de las ecuaciones (A1.81.1) a (A1.81.5), proporciona el valor de las distintas variables cruzadas. Se considerará, además de los datos de  $R$  y  $k_{ij}$  del apartado anterior, los datos de la Tabla A1.XLVII. Se obtendrán, por el siguiente orden:  $T_{cij}$ ,  $Z_{cij}$ ,  $V_{cij}$ ,  $P_{cij}$  y  $\omega_{cij}$ . Puesto que se tienen seis componentes, las interacciones de pares serán: 1-2, 1-3, 1-4, 1-5, 1-6, 2-3, 2-4, 2-5, 2-6, 3-4, 3-5, 3-6, 4-5, 4-6 y 5-6, en total 15 interacciones, (considerando que la interacción “ $ij$ ” es la misma que la inversa “ $ji$ ” y que la interacción “ $ii$ ” es la propiedad pura ya tabulada en la Tabla A1.XLVII).

Los resultados se consignan en la tabla siguiente:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Reglas de combinación de <i>Prausnitz</i> (NMP)									
$T_{c12}$ (K)	421,4350	$Z_{c12}$	0,2725	$V_{c12}$ (L/mol)	0,2299	$P_{c12}$ (atm)	40,9927	$\omega_{12}$	0,1925
$T_{c13}$ (K)	422,2914	$Z_{c13}$	0,2735	$V_{c13}$ (L/mol)	0,2304	$P_{c13}$ (atm)	41,1396	$\omega_{13}$	0,1910
$T_{c14}$ (K)	430,2674	$Z_{c14}$	0,2710	$V_{c14}$ (L/mol)	0,2274	$P_{c14}$ (atm)	42,0688	$\omega_{14}$	0,1985
$T_{c15}$ (K)	416,4643	$Z_{c15}$	0,2765	$V_{c15}$ (L/mol)	0,2414	$P_{c15}$ (atm)	39,1441	$\omega_{15}$	0,1855
$T_{c16}$ (K)	549,3951	$Z_{c16}$	0,2615	$V_{c16}$ (L/mol)	0,2634	$P_{c16}$ (atm)	44,7492	$\omega_{16}$	0,3190
$T_{c23}$ (K)	418,7491	$Z_{c23}$	0,2760	$V_{c23}$ (L/mol)	0,2395	$P_{c23}$ (atm)	39,5980	$\omega_{23}$	0,1885
$T_{c24}$ (K)	426,6582	$Z_{c24}$	0,2735	$V_{c24}$ (L/mol)	0,2365	$P_{c24}$ (atm)	40,4891	$\omega_{24}$	0,1960
$T_{c25}$ (K)	412,9709	$Z_{c25}$	0,2790	$V_{c25}$ (L/mol)	0,2508	$P_{c25}$ (atm)	37,6961	$\omega_{25}$	0,1830
$T_{c26}$ (K)	544,7867	$Z_{c26}$	0,2640	$V_{c26}$ (L/mol)	0,2734	$P_{c26}$ (atm)	43,1631	$\omega_{26}$	0,3165
$T_{c34}$ (K)	427,5252	$Z_{c34}$	0,2745	$V_{c34}$ (L/mol)	0,2370	$P_{c34}$ (atm)	40,6345	$\omega_{34}$	0,1945
$T_{c35}$ (K)	413,8100	$Z_{c35}$	0,2800	$V_{c35}$ (L/mol)	0,2513	$P_{c35}$ (atm)	37,8303	$\omega_{35}$	0,1815
$T_{c36}$ (K)	545,8937	$Z_{c36}$	0,2650	$V_{c36}$ (L/mol)	0,2740	$P_{c36}$ (atm)	43,3280	$\omega_{36}$	0,3150
$T_{c45}$ (K)	421,6258	$Z_{c45}$	0,2775	$V_{c45}$ (L/mol)	0,2482	$P_{c45}$ (atm)	38,6788	$\omega_{45}$	0,1890
$T_{c46}$ (K)	556,2042	$Z_{c46}$	0,2625	$V_{c46}$ (L/mol)	0,2707	$P_{c46}$ (atm)	44,2616	$\omega_{46}$	0,3225
$T_{c56}$ (K)	538,3610	$Z_{c56}$	0,2680	$V_{c56}$ (L/mol)	0,2863	$P_{c56}$ (atm)	41,3483	$\omega_{56}$	0,3095

Tabla. A1.XLIX. Aplicación de las reglas de combinación de *Prausnitz* para NMP como extractante

Reglas de combinación de <i>Prausnitz</i> (Furfural)									
$T_{c16}$ (K)	533,6794	$Z_{c16}$	0,2630	$V_{c16}$ (L/mol)	0,2362	$P_{c16}$ (atm)	48,7675	$\omega_{16}$	0,2814
$T_{c26}$ (K)	529,2029	$Z_{c26}$	0,2655	$V_{c26}$ (L/mol)	0,2454	$P_{c26}$ (atm)	46,9720	$\omega_{26}$	0,2789
$T_{c36}$ (K)	530,2782	$Z_{c36}$	0,2665	$V_{c36}$ (L/mol)	0,2460	$P_{c36}$ (atm)	47,1471	$\omega_{36}$	0,2774
$T_{c46}$ (K)	540,2938	$Z_{c46}$	0,2640	$V_{c46}$ (L/mol)	0,2429	$P_{c46}$ (atm)	48,1869	$\omega_{46}$	0,2849
$T_{c56}$ (K)	522,9610	$Z_{c56}$	0,2695	$V_{c56}$ (L/mol)	0,2575	$P_{c56}$ (atm)	44,9179	$\omega_{56}$	0,2719

Tabla. A1.L. Aplicación de las reglas de combinación de *Prausnitz* para furfural como extractante

### A1.C3.4. Cálculos de temperatura (1)

Conocidas las composiciones de fase líquida de cada equilibrio, así como los datos previos, puede iniciarse la secuencia de cálculo, tal como se desarrollará a partir de la presente sección.

Haciendo uso de los coeficientes de *Antoine*, listados en la Tabla A1.XLVI, se obtienen las temperaturas de saturación de cada componente en el equilibrio, por aplicación de las ecuaciones (A1.88) y (A1.126) a la presión de trabajo de 3 atm.

Las temperaturas de saturación obtenidas de esta forma se listan a continuación:

$T_1^0$ (K)	$T_2^0$ (K)	$T_3^0$ (K)	$T_4^0$ (K)	$T_5^0$ (K)	$T_6^0$ (K)	$T_6^0$ (K)
300,775	298,177	298,890	309,578	293,550	523,924	482,901
					NMP	Furfural

Tabla. A1.LI. Temperaturas de saturación a la presión de trabajo

Donde debe indicarse que la presión debe cambiarse convenientemente de unidades previa introducción en las ecuaciones (A1.88) y (A1.126).

Las temperaturas de saturación por componente permiten evaluar una primera temperatura de equilibrio. Si se promedian los datos de la Tabla A1.LI, ponderándose por las composiciones dadas en la Tabla A1.XLI según:

$$T = \sum_i x_i T_i^0 = x_1 T_1^0 + \dots + x_6 T_6^0 \quad (A1.89)$$

Se encuentra, para el sistema de equilibrio con extractante furfural:

Nº Equilibrio	$T_1$ (K)
1	297,864
2	356,002
3	337,987
4	321,559
5	319,998
6	298,024
7	297,791

Tabla. A1.LII. Primer cálculo de temperatura de equilibrio. Sistema furfural

Y para el sistema con extractante NMP:

Nº Equilibrio	T <sub>1</sub> (K)
1	297,864
2	368,268
3	346,452

Tabla. A1.LIII. Primer cálculo de temperatura de equilibrio. Sistema NMP

### **A1.C3.5. Cálculo de presión de saturación (1)**

Conocidas las temperaturas de cada equilibrio para los sistemas con NMP y furfural, dadas en las tablas A1.LII y A1.LIII, puede calcularse la presión de saturación de los componentes en cada equilibrio, aplicando la ecuación (A1.87), convenientemente despejada para la anterior magnitud:

$$(A1.127) \begin{cases} P_i^0(\text{mmHg}) = e^{A_i - \frac{B_i}{T(\text{K}) + C_i}} (A1.90) \\ P_6^0(\text{bar}) = e^{A_6 - \frac{B_6}{T(\text{K}) + C_6}} (1) \end{cases}$$

Donde (A1.90) continúa siendo válida para los hidrocarburos, mientras que para el furfural, debe considerarse (A1.127.1), idéntica en forma a (A1.90), con distintas unidades.

Para el caso con NMP, la única variación viene dada por la ecuación siguiente, despejada de (A1.125):

$$P_6^0(\text{atm}) = e^{A_6 + \frac{B_6}{T(\text{K}) + C_6}} (A1.128)$$

Operando con los datos de la Tabla A1.XLVI se obtiene:

Nº Equilibrio	P <sub>1</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>2</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>3</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>4</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>5</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>6</sub> <sup>0</sup> (atm)
1	2,745	2,972	2,908	2,089	3,407	0,002
2	11,929	12,619	12,405	9,700	13,580	0,065
3	8,036	8,551	8,396	6,421	9,361	0,027
4	5,368	5,748	5,637	4,212	6,403	0,010
5	5,153	5,522	5,415	4,037	6,162	0,009
6	2,759	2,986	2,922	2,100	3,423	0,002
7	2,739	2,965	2,902	2,084	3,400	0,002

Tabla. A1.LIV. Cálculo de presiones de saturación, conocida T. Sistema furfural

Nº Equilibrio	P <sub>1</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>2</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>3</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>4</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>5</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>6</sub> <sup>0</sup> (atm)
1	2,745	2,972	2,908	2,089	3,407	0,001
2	15,235	16,058	15,798	12,521	17,100	0,029
3	9,730	10,324	10,143	7,841	11,209	0,010

Tabla. A1.LV. Cálculo de presiones de saturación, conocida T. Sistema NMP

### **A1.C3.6. Cálculo de los coeficientes de actividad**

En esta sección se desarrollarán las ecuaciones del método *UNIFAC*, proporcionadas en el capítulo primero, a los sistemas en cuestión. Se presentará el proceso secuenciado de cálculo en distintos apartados.

#### A1.C3.6.1. Cálculo de r<sub>i</sub>

De acuerdo a la ecuación (A1.86.1), para un sistema de seis componentes, los desarrollos consisten en las siguientes expresiones:

$$(A1.91) \left\{ \begin{array}{l} r_i = \sum_k v_k^{(i)} R_k \text{ (A1.86.1)} \\ r_1 = \sum_k v_k^{(1)} R_k \text{ (1)} \\ \dots \\ r_6 = \sum_k v_k^{(6)} R_k \text{ (2)} \end{array} \right.$$

Donde se calcularán tantos  $r_i$  como componentes, multiplicando cada subgrupo por el número en que están presentes en la molécula que defina al compuesto “ $i$ ”, y sumando todos los productos. Los datos para ejecutar este cálculo vienen dados en las tablas A1.XLII y A1.XLIII. Los distintos  $r_i$  así obtenidos se consignan en la siguiente:

$r_1$	2,2426	$r_2$	2,6961	$r_3$	2,6968		
$r_4$	2,6960	$r_5$	3,1502	$r_6$	3,9810	$r_6$	3,1680
				NMP		Furfural	

Tabla. A1.LVI. Cálculo de  $r_i$

### A1.C3.6.2. Cálculo de $q_i$

De acuerdo a la ecuación (A1.86.2), para un sistema de seis componentes, los desarrollos se expresan como sigue:

$$(A1.92) \left\{ \begin{array}{l} q_i = \sum_k v_k^{(i)} Q_k \text{ (A1.86.2)} \\ q_1 = \sum_k v_k^{(1)} Q_k \text{ (1)} \\ \dots \\ q_6 = \sum_k v_k^{(6)} Q_k \text{ (2)} \end{array} \right.$$

Donde se calcularán tantos  $q_i$  como componentes, multiplicando cada subgrupo por el número en que están presentes en la molécula que defina al compuesto “ $i$ ”, y sumando todos los productos. Los datos para ejecutar este cálculo vienen dados en las tablas A1.XLII y A1.XLIII. Los distintos  $q_i$  así obtenidos se consignan en la siguiente:

$q_1$	1,5360	$q_2$	2,2360	$q_3$	2,1560		
$q_4$	2,1520	$q_5$	2,7720	$q_6$	3,2000	$q_6$	2,4810
				NMP		Furfural	

Tabla. A1.LVII. Cálculo de  $q_i$

### A1.C3.6.3. Cálculo de $e_{ki}$

El cálculo de  $e_{ki}$  está basado en la ecuación (A1.86.5). Dicha expresión implica todos los subgrupos  $k$  (del 1 al 4, 61 para furfural y 85 para NMP), así como todas las especies desde  $i=1$  hasta  $i=6$ . Dado que para cada subgrupo, debe obtenerse una ecuación por componente, se precisarán 36 ecuaciones, de las que, las 24 primeras pueden tomarse del capítulo previo, de la expresión (A1.93). Las doce restantes se listan a continuación:

$$(A1.129) \left\{ \begin{array}{l} \text{NMP} \left\{ \begin{array}{l} e_{ki} = \frac{v_k^{(i)} Q_k}{q_i} \quad (A1.86.5) \\ e_{85,1}^* = \frac{v_{85}^{(1)} Q_{85}}{q_1} (1); e_{85,2} = \frac{v_{85}^{(2)} Q_{85}}{q_2} (2); e_{85,3} = \frac{v_{85}^{(3)} Q_{85}}{q_3} (3) \\ e_{85,4} = \frac{v_{85}^{(4)} Q_{85}}{q_4} (4); e_{85,5} = \frac{v_{85}^{(5)} Q_{85}}{q_5} (5); e_{85,6} = \frac{v_{85}^{(6)} Q_{85}}{q_6} (6) \end{array} \right. \\ \text{Furfural} \left\{ \begin{array}{l} e_{61,1} = \frac{v_{61}^{(1)} Q_{61}}{q_1} (7); e_{61,2} = \frac{v_{61}^{(2)} Q_{61}}{q_2} (8); e_{61,3} = \frac{v_{61}^{(3)} Q_{61}}{q_3} (9) \\ e_{61,4} = \frac{v_{61}^{(4)} Q_{61}}{q_4} (10); e_{61,5} = \frac{v_{61}^{(5)} Q_{61}}{q_5} (11); e_{61,6} = \frac{v_{61}^{(6)} Q_{61}}{q_6} (12) \end{array} \right. \end{array} \right.$$

$e_{ki}$						
$k$	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	$i=6$
1	0	0,758	0,393	0,788	0,918	0
2	0,703	0,242	0,501	0	0	0
3	0,297	0	0,106	0,212	0,082	0
4	0	0	0	0	0	0
85/61	0	0	0	0	0	1,000

Tabla. A1.LVIII. Cálculo de  $e_{ki}$ .

Aplicando las ecuaciones (A1.93) y (A1.129) sobre los datos consignados en las tablas A1.XLII a A1.XLIII y A1.LVII, se ha obtenido lo presentado en la Tabla A1.LVIII, donde la última fila representa,

\* Para  $k=61$  ó  $k=85$ , se está usando separador coma [,] en combinación con otros subíndices, con intención clarificadora.

indistintamente, los  $e_{ki}$  tanto para el sistema con extractante NMP, como con extractante furfural.

#### A1.C3.6.4. Cálculo de $\tau_{mk}$

La ecuación (A1.86.6), proporciona el valor de  $\tau_{mk}$  mediante una función dependiente del parámetro de interacción,  $a_{mk}$ , (tabulado en A1.XLIV a A1.XLV) y la temperatura de equilibrio más actual, dada en A1.LII a A1.LIII, para los distintos sistemas.

A diferencia del capítulo anterior, el presente sistema involucra subgrupos correspondientes a distintos grupos principales, de modo que será preciso distinguir entre los  $\tau_{mk}$  derivados del cálculo de parámetros de interacción distintos de cero, de aquellos resultantes de interacciones nulas, (por corresponder los subgrupos al mismo grupo principal), cuyo valor sigue siendo la unidad por mor de lo expuesto en el capítulo previo. Sea por tanto:

$\tau_{mk} = \tau_{kk}$
1

Tabla. A1.LIX. Valor de los  $\tau_{mk}$  para m y k distintos de 61 u 85

Los  $\tau_{mk}$ , para un subgrupo k distinto de 61 u 85, (los correspondientes a los extractantes) equivalen a la unidad, dado que los parámetros de interacción  $a_{mk}$  que les conciernen, pertenecen al mismo grupo principal, de donde la exponencial de (A1.86.6) se anula.

No puede establecerse lo mismo para aquéllos  $\tau_{mk}$ , donde los subíndices representen la interacción entre los extractantes y cualquiera de los demás componentes. A continuación se presentarán en tablas. Lo que sí puede añadirse a la Tabla A1.LIX, es  $\tau_{kk}=1$ , cualquiera que sea k, como corresponde a las interacciones de un subgrupo consigo mismo.

Por todo lo razonado, los  $\tau_{mk}$  distintos de la unidad deben ser:  $\tau_{1,85}$ ,  $\tau_{2,85}$ ,  $\tau_{3,85}$ ,  $\tau_{4,85}$ ,  $\tau_{85,1}$ ,  $\tau_{85,2}$ ,  $\tau_{85,3}$  y  $\tau_{85,4}$ . Estos mismos cambiando

el subíndice 61 por el 85, (furfural por NMP), también deben ser distintos de la unidad.

Considerando que todos los subgrupos pertenecientes a un mismo grupo principal presentan la misma interacción con los subgrupos de otro grupo, (atendiendo a la Tabla A1.II), se tiene que los  $\tau_{61,k}$  y los  $\tau_{85,k}$  son iguales para  $k$  de 1 a 4, puesto que tales subgrupos pertenecen a un mismo grupo, como queda explicado. De la misma forma los  $\tau_{m,61}$  y los  $\tau_{m,85}$  son también iguales para  $m$  de 1 a 4. Argumentadas estas peculiaridades del parámetro  $\tau_{mk}$  y aplicando (A1.86.6), sobre los datos mencionados al comienzo de este apartado se obtiene:

Nº Equilibrio	$\tau_{1,61} = \tau_{2,61} = \tau_{3,61} = \tau_{4,61}$	$\tau_{61,1} = \tau_{61,2} = \tau_{61,3} = \tau_{61,4}$
1	0,304	1,089
2	0,369	1,074
3	0,350	1,078
4	0,332	1,082
5	0,330	1,082
6	0,304	1,089
7	0,304	1,089

Tabla. A1.LX. Valor de los  $\tau_{mk}$ . Sistema furfural

Nº Equilibrio	$\tau_{1,85} = \tau_{2,85} = \tau_{3,85} = \tau_{4,85}$	$\tau_{85,1} = \tau_{85,2} = \tau_{85,3} = \tau_{85,4}$
1	0,477	0,954
2	0,550	0,963
3	0,529	0,961

Tabla. A1.LXI. Valor de los  $\tau_{mk}$ . Sistema NMP

De lo que se deduce que, si este parámetro, el único dependiente de la temperatura para el cálculo de los coeficientes de actividad, en este caso es variable debido a la interacción de los subgrupos; obligatoriamente será preciso recalcular tanto los  $\tau_{mk}$  como los propios coeficientes de actividad, cada vez que se actualice la temperatura. De forma contraria al caso anterior, en esta ocasión no se

ahorra el bucle iterativo de los coeficientes de actividad, y el proceso de cálculo será tan completo como muestra la Figura A1.1.

#### A1.C3.6.5. Cálculo de $\beta_{ik}$

Partiendo de la ecuación (A1.86.7), se tiene una expresión que va en todos los componentes y subgrupos, de donde el desarrollo pertinente, incluye 30 ecuaciones. La expresión (A1.94), recogió las expresiones precisas para el cálculo de  $\beta_{ik}$ , considerando que todos los  $\tau_{mk}$  valían la unidad, dado que no entraba en juego ningún subgrupo que presentase interacción con el resto. En este caso no se verifica este hecho para todos los casos, si bien pueden efectuarse las simplificaciones que seguidamente se razonan. Sea:

$$\beta_{ik} = \sum_m e_{mi} \tau_{mk} \quad (A1.86.7)$$

Desarrollando para  $i=1$ , se obtiene:

$$(A1.130) \left\{ \begin{array}{l} \beta_{11} = e_{11}\tau_{11} + e_{21}\tau_{21} + e_{31}\tau_{31} + e_{41}\tau_{41} + e_{61,1}\tau_{61,1} \quad (1) \\ \beta_{12} = e_{11}\tau_{12} + e_{21}\tau_{22} + e_{31}\tau_{32} + e_{41}\tau_{42} + e_{61,1}\tau_{61,2} \quad (2) \\ \beta_{13} = e_{11}\tau_{13} + e_{21}\tau_{23} + e_{31}\tau_{33} + e_{41}\tau_{43} + e_{61,1}\tau_{61,3} \quad (3) \\ \beta_{14} = e_{11}\tau_{14} + e_{21}\tau_{24} + e_{31}\tau_{34} + e_{41}\tau_{44} + e_{61,1}\tau_{61,4} \quad (4) \\ \beta_{1,61} = e_{11}\tau_{1,61} + e_{21}\tau_{2,61} + e_{31}\tau_{3,61} + e_{41}\tau_{4,61} + e_{61,1}\tau_{61,61} \quad (5) \end{array} \right.$$

Se ha tomado el extractante furfural, con  $k=61$ . Los desarrollos son equivalentes, *mutatis mutandis*, para el extractante NMP, con  $k=85$ . Se observa que los primeros cuatro sumandos de las  $\beta_{ik}$  para cualquier  $k$  del grupo "Alcano", multiplican por un  $\tau_{mk}$  que supone la unidad, según lo ya demostrado; el quinto sumando multiplica por un  $e_{ki}$ , que según la Tabla A1.LVIII, es nulo, por lo que no contribuye a la suma. De esta forma, las ecuaciones (A1.130.1) a (A1.130.4), se reducen a las dadas en (A1.94), por lo que puede generalizarse lo siguiente:

$\beta_{ik}$
1

Tabla. A1.LXII. Valores de  $\beta_{ik}$  con  $k \neq 65$ ,  $k \neq 81$  e  $i \neq 6$

Cuando  $k$  corresponde a cualquiera de los subgrupos de los extractantes, se observa, en (A1.130.5), que los cuatro primeros  $\tau_{mk}$ , según el apartado anterior, son coincidentes en valor, por lo que pueden extraerse como factor común:

$$\beta_{1,61} = \tau_{1,61}(e_{11} + e_{21} + e_{31} + e_{41})$$

El último sumando de (A1.130.5) se anula, puesto que  $e_{61,1}$  es cero, como se apuntó anteriormente. Asimismo, se demostró en el capítulo anterior, que la suma de los  $e_{ki}$  para un componente fijo resulta la unidad, de donde:

$$\beta_{1,61} = \tau_{1,61}$$

Lo que puede generalizarse como:

$$\beta_{ik} = \tau_{ik}$$

Para cualquier componente distinto del seis, (el extractante) y para  $k$  correspondiente al furfural o al NMP. Por último, para  $i=6$ , se tiene:

$$(A1.131) \left\{ \begin{array}{l} \beta_{61} = e_{16}\tau_{11} + e_{26}\tau_{21} + e_{36}\tau_{31} + e_{46}\tau_{41} + e_{61,6}\tau_{61,1} \quad (1) \\ \beta_{62} = e_{16}\tau_{12} + e_{26}\tau_{22} + e_{36}\tau_{32} + e_{46}\tau_{42} + e_{61,6}\tau_{61,2} \quad (2) \\ \beta_{63} = e_{16}\tau_{13} + e_{26}\tau_{23} + e_{36}\tau_{33} + e_{46}\tau_{43} + e_{61,6}\tau_{61,3} \quad (3) \\ \beta_{64} = e_{16}\tau_{14} + e_{26}\tau_{24} + e_{36}\tau_{34} + e_{46}\tau_{44} + e_{61,6}\tau_{61,4} \quad (4) \\ \beta_{6,61} = e_{16}\tau_{1,61} + e_{26}\tau_{2,61} + e_{36}\tau_{3,61} + e_{46}\tau_{4,61} + e_{61,6}\tau_{61,61} \quad (5) \end{array} \right.$$

En la expresión (A1.131), en todas las ecuaciones los cuatro primeros sumandos multiplican por  $e_{ki}$  nulos, mientras que  $e_{61,6}$  supone la unidad, (se reitera la validez de toda la demostración para  $k=85$ ); luego (A1.131) se reduce a lo que sigue:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta_{61} = \tau_{61,1} (1) \\ \beta_{62} = \tau_{61,2} (2) \\ \beta_{63} = \tau_{61,3} (3) \\ \beta_{64} = \tau_{61,4} (4) \\ \beta_{6,61} = \tau_{61,61} = 1 (5) \end{array} \right.$$

En definitiva, se tiene:

Nº Equilibrio	$\beta_{1,61} = \beta_{2,61} = \beta_{3,61} = \beta_{4,61} = \beta_{5,61}$	$\beta_{6,1} = \beta_{6,2} = \beta_{6,3} = \beta_{6,4}$
1	0,304	1,089
2	0,369	1,074
3	0,350	1,078
4	0,332	1,082
5	0,330	1,082
6	0,304	1,089
7	0,304	1,089

Tabla. A1.LXIII. Valor de las  $\beta_{ik}$ . Sistema furfural

Nº Equilibrio	$\beta_{1,85} = \beta_{2,85} = \beta_{3,85} = \beta_{4,85} = \beta_{5,85}$	$\beta_{6,1} = \beta_{6,2} = \beta_{6,3} = \beta_{6,4}$
1	0,477	0,954
2	0,550	0,963
3	0,529	0,961

Tabla. A1.LXIV. Valor de las  $\beta_{ik}$ . Sistema NMP

La quinta expresión de la última llave produce:

$\beta_{6,61} = \beta_{6,85}$
1

Tabla. A1.LXV. Valores de  $\beta_{ik}$

El razonamiento del presente apartado, que ha permitido tabular los datos de las  $\beta_{ik}$  ha requerido datos de las tablas A1.LVIII a A1.LXI.

### A1.C3.6.6. Cálculo de $\theta_k$

Se parte de la ecuación (A1.86.8) y, puesto que ésta sólo va en los subgrupos k, se tendrán cinco ecuaciones. Las cuatro primeras se dieron en (A1.95) y continúan siendo válidas. La quinta se nota seguidamente:

$$(A1.132) \left\{ \begin{array}{l} \theta_k = \frac{\sum_i x_i q_i e_{ki}}{\sum_j x_j q_j} \quad (A1.86.8) \\ \theta_{61} = \frac{x_1 q_1 e_{61,1} + x_2 q_2 e_{61,2} + x_3 q_3 e_{61,3} + x_4 q_4 e_{61,4} + x_5 q_5 e_{61,5} + x_6 q_6 e_{61,6}}{x_1 q_1 + x_2 q_2 + x_3 q_3 + x_4 q_4 + x_5 q_5 + x_6 q_6} \quad (1) \\ \theta_{85} = \frac{x_1 q_1 e_{85,1} + x_2 q_2 e_{85,2} + x_3 q_3 e_{85,3} + x_4 q_4 e_{85,4} + x_5 q_5 e_{85,5} + x_6 q_6 e_{86,6}}{x_1 q_1 + x_2 q_2 + x_3 q_3 + x_4 q_4 + x_5 q_5 + x_6 q_6} \quad (2) \end{array} \right.$$

Para la obtención de los  $\theta_k$ , se aplican (A1.95) y (A1.132), según corresponda sobre los datos consignados en las tablas A1.XLI y A1.LVII a A1.LVIII. Se obtiene:

Nº Equilibrio	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_{61}$
1	0,702	0,265	0,034	0,000	0,000
2	0,134	0,330	0,154	0,000	0,382
3	0,329	0,308	0,112	0,000	0,251
4	0,179	0,460	0,209	0,000	0,151
5	0,181	0,467	0,212	0,000	0,140
6	0,691	0,277	0,032	0,000	0,000
7	0,707	0,258	0,034	0,000	0,000

Tabla. A1.LXVI. Cálculo de  $\theta_k$ . Sistema furfural

Nº Equilibrio	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_{85}$
1	0,702	0,265	0,034	0,000	0,000
2	0,121	0,297	0,138	0,000	0,444
3	0,307	0,287	0,105	0,000	0,301

Tabla. A1.LXVII. Cálculo de  $\theta_k$ . Sistema NMP

### A1.C3.6.7. Cálculo de $s_k$

Atendiendo a la ecuación (A1.86.9), se desarrolla:

$$(A1.133) \left\{ \begin{array}{l} s_k = \sum_m \theta_m \tau_{mk} \quad (A1.96) \\ s_1 = \theta_1 \tau_{11} + \theta_2 \tau_{21} + \theta_3 \tau_{31} + \theta_4 \tau_{41} + \theta_{61} \tau_{61,1} \quad (1) \\ s_2 = \theta_1 \tau_{12} + \theta_2 \tau_{22} + \theta_3 \tau_{32} + \theta_4 \tau_{42} + \theta_{61} \tau_{61,2} \quad (2) \\ s_3 = \theta_1 \tau_{13} + \theta_2 \tau_{23} + \theta_3 \tau_{33} + \theta_4 \tau_{43} + \theta_{61} \tau_{61,3} \quad (3) \\ s_4 = \theta_1 \tau_{14} + \theta_2 \tau_{24} + \theta_3 \tau_{34} + \theta_4 \tau_{44} + \theta_{61} \tau_{61,4} \quad (4) \\ s_{61} = \theta_1 \tau_{1,61} + \theta_2 \tau_{2,61} + \theta_3 \tau_{3,61} + \theta_4 \tau_{4,61} + \theta_{61} \tau_{61,61} \quad (5) \end{array} \right.$$

Como en otros apartados, las ecuaciones también son válidas cuando se cambia  $k=61$  por  $k=85$ . Aplicando (A1.133) a los datos consignados en las tablas A1.LIX a A1.LXI y A1.LXVI a A1.LXVII, se obtiene:

Nº Equilibrio	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>61</sub>
1	1,000	1,000	1,000	1,000	0,304
2	1,028	1,028	1,028	1,028	0,610
3	1,019	1,019	1,019	1,019	0,513
4	1,012	1,012	1,012	1,012	0,433
5	1,012	1,012	1,012	1,012	0,424
6	1,000	1,000	1,000	1,000	0,304
7	1,000	1,000	1,000	1,000	0,304

Tabla. A1.LXVIII. Cálculo de  $s_k$ . Sistema furfural

Nº Equilibrio	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>85</sub>
1	1,000	1,000	1,000	1,000	0,477
2	0,984	0,984	0,984	0,984	0,749
3	0,988	0,988	0,988	0,988	0,671

Tabla. A1.LXIX. Cálculo de  $s_k$ . Sistema NMP

### A1.C3.6.8. Cálculo de $J_i$

La ecuación (A1.86.3) proporciona el valor de  $J_i$ . Al desarrollar para los seis componentes involucrados en el sistema descrito en el

presente capítulo, se tienen las ecuaciones dadas por (A1.97), que continúan siendo válidas.

Por aplicación de dichas ecuaciones a los datos consignados en las tablas A1.XLI y AI.LVI, se calcula:

Nº Equilibrio	J <sub>1</sub>	J <sub>2</sub>	J <sub>3</sub>	J <sub>4</sub>	J <sub>5</sub>	J <sub>6</sub>
1	0,819	0,984	0,985	0,984	1,150	1,157
2	0,859	1,033	1,033	1,033	1,207	1,214
3	0,846	1,017	1,018	1,017	1,189	1,195
4	0,912	1,096	1,096	1,096	1,281	1,288
5	0,914	1,099	1,099	1,099	1,284	1,291
6	0,823	0,990	0,990	0,990	1,156	1,163
7	0,817	0,982	0,982	0,982	1,147	1,154

Tabla. A1.LXX. Cálculo de J<sub>i</sub>. Sistema furfural

Nº Equilibrio	J <sub>1</sub>	J <sub>2</sub>	J <sub>3</sub>	J <sub>4</sub>	J <sub>5</sub>	J <sub>6</sub>
1	0,819	0,984	0,985	0,984	1,150	1,453
2	0,786	0,945	0,945	0,945	1,104	1,395
3	0,796	0,957	0,957	0,957	1,118	1,413

Tabla. A1.LXXI. Cálculo de J<sub>i</sub>. Sistema NMP

#### A1.C3.6.9. Cálculo de L<sub>i</sub>

La ecuación (A1.86.4) proporciona el valor de L<sub>i</sub>. Al desarrollar para los seis componentes involucrados en el sistema descrito en el presente capítulo, se tienen las ecuaciones dadas por (A1.98), que continúan siendo válidas.

Por aplicación de dichas ecuaciones a los datos consignados en las tablas A1.XLI y AI.LVII, se calcula:

Nº Equilibrio	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>	L <sub>5</sub>	L <sub>6</sub>
1	0,677	0,986	0,950	0,949	1,222	1,411
2	0,712	1,037	0,999	0,998	1,285	1,483
3	0,701	1,020	0,984	0,982	1,265	1,460

Tabla. A1.LXXII. Cálculo de L<sub>i</sub>. Sistema NMP

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Nº Equilibrio	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>	L <sub>5</sub>	L <sub>6</sub>
1	0,677	0,986	0,950	0,949	1,222	1,094
2	0,791	1,151	1,110	1,108	1,427	1,277
3	0,752	1,094	1,055	1,053	1,357	1,214
4	0,854	1,244	1,199	1,197	1,542	1,380
5	0,858	1,248	1,204	1,202	1,548	1,385
6	0,683	0,994	0,958	0,957	1,232	1,103
7	0,674	0,982	0,947	0,945	1,217	1,089

Tabla. A1.LXXIII. Cálculo de L<sub>i</sub>. Sistema furfural

### A1.C3.6.10. Cálculo del coeficiente de actividad combinatorio

El coeficiente de actividad combinatorio se calcula, para cada especie, según la expresión (A1.85.1). Su desarrollo produce las ecuaciones mostradas en (A1.99), que continúan siendo válidas. Por aplicación de tales ecuaciones a los datos consignados en las tablas A1.LVII y A1.LXX a A1.LXXIII, se obtiene:

Nº Equilibrio	ln $\gamma_1^C$	ln $\gamma_2^C$	ln $\gamma_3^C$	ln $\gamma_4^C$	ln $\gamma_5^C$	ln $\gamma_6^C$
1	0,129	0,000	0,007	0,007	0,015	0,009
2	0,016	0,063	0,027	0,025	0,166	-0,004
3	0,043	0,029	0,007	0,006	0,100	-0,015
4	0,012	0,082	0,038	0,036	0,192	-0,006
5	0,012	0,083	0,038	0,037	0,193	-0,006
6	0,125	0,000	0,006	0,006	0,016	0,006
7	0,131	0,000	0,007	0,008	0,014	0,010

Tabla. A1.LXXIV. Cálculo del coef. de actividad combinatorio. Sistema furfural

Nº Equilibrio	ln $\gamma_1^C$	ln $\gamma_2^C$	ln $\gamma_3^C$	ln $\gamma_4^C$	ln $\gamma_5^C$	ln $\gamma_6^C$
1	0,129	0,000	0,007	0,007	0,015	-0,072
2	0,012	0,045	0,015	0,014	0,147	-0,033
3	0,041	0,022	0,003	0,003	0,095	-0,059

Tabla. A1.LXXV. Cálculo del coef. de actividad combinatorio. Sistema NMP

### A1.C3.6.11. Cálculo del coeficiente de actividad residual

La evaluación del coeficiente de actividad residual requiere el desarrollo de la ecuación (A1.85.2). En esta ocasión no pueden efectuarse las simplificaciones del capítulo anterior en todos los casos, por lo que el desarrollo de la expresión para el coeficiente de actividad residual produce:

$$\ln\gamma_1^R = q_1 \left[ 1 - \left[ \left( \theta_1 \frac{\beta_{11}}{s_1} - e_{11} \ln \frac{\beta_{11}}{s_1} \right) + \left( \theta_2 \frac{\beta_{12}}{s_2} - e_{21} \ln \frac{\beta_{12}}{s_2} \right) + \left( \theta_3 \frac{\beta_{13}}{s_3} - e_{31} \ln \frac{\beta_{13}}{s_3} \right) + \left( \theta_4 \frac{\beta_{14}}{s_4} - e_{41} \ln \frac{\beta_{14}}{s_4} \right) + \left( \theta_{61} \frac{\beta_{1,61}}{s_{61}} - e_{61,1} \ln \frac{\beta_{1,61}}{s_{61}} \right) \right] \right] \quad (A1.134)$$

$$\ln\gamma_2^R = q_2 \left[ 1 - \left[ \left( \theta_1 \frac{\beta_{21}}{s_1} - e_{12} \ln \frac{\beta_{21}}{s_1} \right) + \left( \theta_2 \frac{\beta_{22}}{s_2} - e_{22} \ln \frac{\beta_{22}}{s_2} \right) + \left( \theta_3 \frac{\beta_{23}}{s_3} - e_{32} \ln \frac{\beta_{23}}{s_3} \right) + \left( \theta_4 \frac{\beta_{24}}{s_4} - e_{42} \ln \frac{\beta_{24}}{s_4} \right) + \left( \theta_{61} \frac{\beta_{2,61}}{s_{61}} - e_{61,2} \ln \frac{\beta_{2,61}}{s_{61}} \right) \right] \right] \quad (A1.135)$$

$$\ln\gamma_3^R = q_3 \left[ 1 - \left[ \left( \theta_1 \frac{\beta_{31}}{s_1} - e_{13} \ln \frac{\beta_{31}}{s_1} \right) + \left( \theta_2 \frac{\beta_{32}}{s_2} - e_{23} \ln \frac{\beta_{32}}{s_2} \right) + \left( \theta_3 \frac{\beta_{33}}{s_3} - e_{33} \ln \frac{\beta_{33}}{s_3} \right) + \left( \theta_4 \frac{\beta_{34}}{s_4} - e_{43} \ln \frac{\beta_{34}}{s_4} \right) + \left( \theta_{61} \frac{\beta_{3,61}}{s_{61}} - e_{61,3} \ln \frac{\beta_{3,61}}{s_{61}} \right) \right] \right] \quad (A1.136)$$

$$\ln\gamma_4^R = q_4 \left[ 1 - \left[ \left( \theta_1 \frac{\beta_{41}}{s_1} - e_{14} \ln \frac{\beta_{41}}{s_1} \right) + \left( \theta_2 \frac{\beta_{42}}{s_2} - e_{24} \ln \frac{\beta_{42}}{s_2} \right) + \left( \theta_3 \frac{\beta_{43}}{s_3} - e_{34} \ln \frac{\beta_{43}}{s_3} \right) + \left( \theta_4 \frac{\beta_{44}}{s_4} - e_{44} \ln \frac{\beta_{44}}{s_4} \right) + \left( \theta_{61} \frac{\beta_{4,61}}{s_{61}} - e_{61,4} \ln \frac{\beta_{4,61}}{s_{61}} \right) \right] \right] \quad (A1.137)$$

$$\ln\gamma_5^R = q_5 \left[ 1 - \left[ \left( \theta_1 \frac{\beta_{51}}{s_1} - e_{15} \ln \frac{\beta_{51}}{s_1} \right) + \left( \theta_2 \frac{\beta_{52}}{s_2} - e_{25} \ln \frac{\beta_{52}}{s_2} \right) + \left( \theta_3 \frac{\beta_{53}}{s_3} - e_{35} \ln \frac{\beta_{53}}{s_3} \right) + \left( \theta_4 \frac{\beta_{54}}{s_4} - e_{45} \ln \frac{\beta_{54}}{s_4} \right) + \left( \theta_{61} \frac{\beta_{5,61}}{s_{61}} - e_{61,5} \ln \frac{\beta_{5,61}}{s_{61}} \right) \right] \right] \quad (A1.138)$$

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

$$\ln \gamma_6^R = q_6 \left[ 1 - \left[ \left( \theta_1 \frac{\beta_{61}}{s_1} - e_{16} \ln \frac{\beta_{61}}{s_1} \right) + \left( \theta_2 \frac{\beta_{62}}{s_2} - e_{26} \ln \frac{\beta_{62}}{s_2} \right) + \left( \theta_3 \frac{\beta_{63}}{s_3} - e_{36} \ln \frac{\beta_{63}}{s_3} \right) + \left( \theta_4 \frac{\beta_{64}}{s_4} - e_{46} \ln \frac{\beta_{64}}{s_4} \right) + \left( \theta_{61} \frac{\beta_{6,61}}{s_{61}} - e_{61,6} \ln \frac{\beta_{6,61}}{s_{61}} \right) \right] \right] \quad (A1.139)$$

Las ecuaciones se han desarrollado sobre el supuesto de emplear disolvente furfural, toda vez que son válidas, intercambiando el subíndice 61 por el 85, para el extractante NMP.

Aplicando (A1.134) a (A1.139) a los  $q_i$  listados en la Tabla A1.LVII, los  $\theta_k$  mostrados en las tablas A1.LXVI a A1.LXVII, las  $\beta_{ik}$  consignadas en las tablas A1.LXII a A1.LXV, los  $s_k$  tabulados en A1.LXVIII a A1.LXIX y los  $e_{ki}$  dados en la Tabla A1.LVIII, se obtiene, para cada sistema:

Nº Equilibrio	$\ln \gamma_1^R$	$\ln \gamma_2^R$	$\ln \gamma_3^R$	$\ln \gamma_4^R$	$\ln \gamma_5^R$	$\ln \gamma_6^R$
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,734
2	0,215	0,313	0,302	0,301	0,388	0,552
3	0,114	0,167	0,161	0,160	0,207	0,959
4	0,051	0,074	0,072	0,072	0,092	1,441
5	0,045	0,065	0,063	0,063	0,081	1,509
6	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,732
7	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,734

Tabla. A1.LXXVI. Cálculo del coeficiente de actividad residual. Sistema furfural

Nº Equilibrio	$\ln \gamma_1^R$	$\ln \gamma_2^R$	$\ln \gamma_3^R$	$\ln \gamma_4^R$	$\ln \gamma_5^R$	$\ln \gamma_6^R$
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,513
2	0,193	0,280	0,270	0,270	0,348	0,486
3	0,103	0,150	0,145	0,145	0,186	0,866

Tabla. A1.LXXVII. Cálculo del coeficiente de actividad residual. Sistema NMP

### A1.C3.6.12. Cálculo del coeficiente de actividad

Conocidos los coeficientes de actividad combinatorio y residual, aplicando exponenciales en la expresión (A1.84) y despejando con-

venientemente se obtiene (A1.101), que continúa siendo de aplicación. Introduciendo en tal expresión los datos de las tablas A1.LXXVI a A1.LXXVII, se obtiene, para cada sistema:

Nº Equilibrio	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$	$\gamma_4$	$\gamma_5$	$\gamma_6$
1	1,138	1,000	1,007	1,007	1,015	15,520
2	1,260	1,456	1,389	1,386	1,739	1,730
3	1,170	1,216	1,182	1,181	1,359	2,570
4	1,066	1,169	1,116	1,114	1,329	4,203
5	1,059	1,159	1,107	1,105	1,315	4,497
6	1,134	1,000	1,006	1,006	1,016	15,454
7	1,140	1,000	1,007	1,008	1,014	15,552

Tabla. A1.LXXVIII. Primer cálculo de coeficientes de actividad. Sistema furfural

Nº Equilibrio	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$	$\gamma_4$	$\gamma_5$	$\gamma_6$
1	1,138	1,000	1,007	1,007	1,015	11,475
2	1,227	1,385	1,330	1,328	1,640	1,573
3	1,155	1,187	1,159	1,159	1,325	2,241

Tabla. A1.LXXIX. Primer cálculo de coeficientes de actividad. Sistema NMP

### **A1.C3.7. Cálculo de la presión de saturación (2)**

En la sección A1.C3.5, se obtuvo un primer valor de presión de saturación por componente, por aplicación de la ecuación de *Antoine*. En este caso, se recalcularán dichas presiones a través de expresiones deducidas directamente de la ecuación del criterio fundamental del equilibrio termodinámico. Esta primera afinación, permitirá incluir los coeficientes de actividad recién estimados. Serán de aplicación las ecuaciones (A1.106) a (A1.111) deducidas en el capítulo previo. Tales expresiones se aplican a la presión de trabajo dada en la sección A1.C3.2, los coeficientes de actividad recién dilucidados, tablas A1.LXXVIII a A1.LXXIX, las composiciones de fase líquida dadas en la Tabla A1.XLI y las presiones de saturación más actuales, consignadas en las tablas A1.LIV a A1.LV. Fijando los  $\phi_i$  a la unidad, suponiendo idealidad del sistema, se obtiene:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Nº Equilibrio	P <sub>1</sub> <sup>o</sup> (atm)	P <sub>2</sub> <sup>o</sup> (atm)	P <sub>3</sub> <sup>o</sup> (atm)	P <sub>4</sub> <sup>o</sup> (atm)	P <sub>5</sub> <sup>o</sup> (atm)	P <sub>6</sub> <sup>o</sup> (atm)
1	2,731	2,956	2,893	2,078	3,390	0,002
2	3,375	3,570	3,510	2,744	3,842	0,018
3	3,120	3,320	3,260	2,493	3,634	0,010
4	3,191	3,417	3,351	2,504	3,807	0,006
5	3,183	3,411	3,345	2,493	3,806	0,006
6	2,746	2,972	2,909	2,090	3,407	0,002
7	2,725	2,950	2,887	2,073	3,382	0,002

Tabla. A1.LXXX. Cálculo de presiones de saturación, según el criterio fundamental del equilibrio. Sistema furfural

Nº Equilibrio	P <sub>1</sub> <sup>o</sup> (atm)	P <sub>2</sub> <sup>o</sup> (atm)	P <sub>3</sub> <sup>o</sup> (atm)	P <sub>4</sub> <sup>o</sup> (atm)	P <sub>5</sub> <sup>o</sup> (atm)	P <sub>6</sub> <sup>o</sup> (atm)
1	2,731	2,956	2,893	2,078	3,390	0,001
2	3,486	3,674	3,615	2,865	3,912	0,007
3	3,186	3,381	3,321	2,568	3,670	0,003

Tabla. A1.LXXXI. Cálculo de presiones de saturación, según el criterio fundamental del equilibrio. Sistema NMP

### **A1.C3.8. Cálculos de temperatura y coef. de actividad (2)**

A partir de las presiones de saturación de cada componente en el equilibrio, es posible recalcular la temperatura del mismo aplicando la ecuación (A1.112) y promediando las temperaturas de cada componente en el equilibrio. Los datos requeridos vienen dados por la Tabla A1.XLVI y las tablas A1.LXXX a A1.LXXXI, esto es, las presiones de saturación más recientes. Se obtiene, para cada sistema:

Nº Equilibrio	T <sub>1</sub> <sup>o</sup> (K)	T <sub>2</sub> <sup>o</sup> (K)	T <sub>3</sub> <sup>o</sup> (K)	T <sub>4</sub> <sup>o</sup> (K)	T <sub>5</sub> <sup>o</sup> (K)	T <sub>6</sub> <sup>o</sup> (K)	T <sub>2</sub> (K)
1	297,698	297,695	297,696	297,705	297,688	297,799	297,714
2	304,738	304,056	304,192	306,600	302,076	331,197	308,810
3	302,079	301,569	301,669	303,457	300,109	321,517	305,067
4	302,839	302,554	302,609	303,605	301,744	313,480	304,472
5	302,753	302,488	302,540	303,463	301,738	312,600	304,264
6	297,876	297,873	297,874	297,882	297,866	297,966	297,890
7	297,622	297,619	297,620	297,629	297,611	297,724	297,638

Tabla. A1.LXXXII. Segundo cálculo de T de equilibrio. Sistema furfural

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Nº Equilibrio	T <sub>1</sub> <sup>0</sup> (K)	T <sub>2</sub> <sup>0</sup> (K)	T <sub>3</sub> <sup>0</sup> (K)	T <sub>4</sub> <sup>0</sup> (K)	T <sub>5</sub> <sup>0</sup> (K)	T <sub>6</sub> <sup>0</sup> (K)	T <sub>2</sub> (K)
1	297,698	297,695	297,696	297,705	297,688	297,791	297,712
2	305,844	305,048	305,209	308,027	302,721	337,510	310,727
3	302,783	302,183	302,302	304,413	300,455	325,524	306,277

Tabla. A1.LXXXIII. Segundo cálculo de T de equilibrio. Sistema NMP

Con la temperatura recién recalculada\*, debe reiterarse el cálculo de los coeficientes de actividad, operación que en el capítulo anterior se vinculó a la actualización de la temperatura, si bien no se practicó debido a la invariabilidad de dichos coeficientes.

Deben por tanto rehacerse los cálculos presentados en los apartados A1.C3.6.1 a A1.C3.6.12. Los resultados correspondientes a los tres primeros apartados permanecen invariantes, dado que son independientes de la temperatura. En el apartado A1.C3.6.4, donde se piden datos de temperatura de las tablas A1.LII a A1.LIII, (correspondientes a la primera temperatura calculada), se sustituyen por los de las tablas A1.LXXXII a A1.LXXXIII, esto es, las temperaturas recién recalculadas, y se opera de la misma forma, para obtener una segunda batería de coeficientes de actividad vinculados a la segunda temperatura calculada del equilibrio:

Nº Equilibrio	γ <sub>1</sub>	γ <sub>2</sub>	γ <sub>3</sub>	γ <sub>4</sub>	γ <sub>5</sub>	γ <sub>6</sub>
1	1,138	1,000	1,007	1,007	1,015	15,541
2	1,299	1,522	1,449	1,447	1,838	1,796
3	1,186	1,240	1,205	1,204	1,393	2,723
4	1,069	1,175	1,122	1,120	1,338	4,442
5	1,062	1,164	1,112	1,110	1,323	4,749
6	1,134	1,000	1,006	1,006	1,016	15,473
7	1,140	1,000	1,007	1,008	1,014	15,574

Tabla. A1.LXXXIV. Segundo cálculo de coef. de actividad. Sistema furfural

\* La ecuación (A1.112) es de aplicación para los compuestos de 1 a 5. También lo es para el extractante furfural introduciendo la presión en bar. Para el extractante NMP, se introduce la presión en atm y se cambia el signo del denominador.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Nº Equilibrio	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>5</sub>	Y <sub>6</sub>
1	1,138	1,000	1,007	1,007	1,015	11,490
2	1,270	1,456	1,396	1,394	1,745	1,674
3	1,171	1,213	1,183	1,182	1,360	2,442

Tabla. A1.LXXXV. Segundo cálculo de coeficientes de actividad. Sistema NMP

### **A1.C3.9. Cálculo de la presión de saturación (3)**

La nueva temperatura del equilibrio permite actualizar, así como los coeficientes de actividad, las presiones de saturación por aplicación de las ecuaciones (A1.90), (A1.127.1) y (A1.128), según convenga, a los parámetros de *Antoine* listados en la Tabla A1.XLVI y las temperaturas obtenidas en la sección anterior. Así, se obtiene:

Nº Equilibrio	P <sub>1</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>2</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>3</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>4</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>5</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>6</sub> <sup>0</sup> (atm)
1	2,732	2,958	2,895	2,079	3,392	0,002
2	3,796	4,088	4,004	2,932	4,622	0,005
3	3,408	3,676	3,600	2,619	4,175	0,003
4	3,349	3,614	3,539	2,572	4,108	0,003
5	3,329	3,592	3,517	2,556	4,084	0,003
6	2,747	2,974	2,910	2,091	3,409	0,002
7	2,726	2,951	2,888	2,074	3,385	0,002

Tabla. A1.LXXXVI. Cálculo de presiones de sat., conocida T. Sistema furfural

Nº Equilibrio	P <sub>1</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>2</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>3</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>4</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>5</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>6</sub> <sup>0</sup> (atm)
1	2,732	2,958	2,895	2,079	3,392	0,001
2	4,007	4,311	4,224	3,103	4,863	0,001
3	3,530	3,806	3,727	2,718	4,316	0,001

Tabla. A1.LXXXVII. Cálculo de presiones de sat., conocida T. Sistema NMP

### **A1.C3.10. Cálculo de la composición de vapor**

Con la temperatura del equilibrio y las presiones de saturación actualizadas, pueden determinarse las composiciones de los componentes en el vapor. Para ello, se aplica la ecuación (A1.113) a los datos consignados en las tablas A1.LXXXIV a A1.LXXXV, A1.XLI,

A1.LXXXVI a A1.LXXXVII y la presión consignada en la sección A1.C3.2. Tomando los  $\Phi_i$  como la unidad, suponiendo idealidad del sistema, se obtiene:

Nº Equilibrio	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_6$
1	0,012	0,668	0,200	0,000	0,121	0,000
2	0,823	0,000	0,179	0,152	0,000	0,001
3	0,471	0,319	0,185	0,078	0,063	0,001
4	0,758	0,000	0,174	0,119	0,000	0,001
5	0,755	0,000	0,174	0,118	0,000	0,001
6	0,012	0,694	0,210	0,000	0,084	0,000
7	0,010	0,659	0,194	0,000	0,137	0,000

Tabla. A1.LXXXVIII. Cálculo de composiciones de fase vapor. Sistema furfural

Nº Equilibrio	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_6$
1	0,012	0,668	0,200	0,000	0,121	0,000
2	0,850	0,000	0,182	0,155	0,000	0,000
3	0,481	0,323	0,188	0,079	0,064	0,000

Tabla. A1.LXXXIX. Cálculo de composiciones de fase vapor. Sistema NMP

### **A1.C3.11. Cálculo de los $\Phi_i$**

Cuando son conocidas las composiciones de vapor, se ha determinado, junto con la temperatura, las variables perseguidas concordantes con la composición de la fase líquida y presión introducidas. Hasta el momento se ha determinado el valor de los coeficientes de actividad, lo que supone una caracterización de la medida en que la fase líquida se aleja de la idealidad. Resta encontrar el valor de los coeficientes de fugacidad que efectuarán lo propio con la fase vapor, y permitirán recalculer tanto la temperatura de los equilibrios como las composiciones de vapor, hasta la convergencia. Como procede con las variables mostradas, cada vez que se recalculen los coeficientes de fugacidad, se obtendrá una nueva composición de vapor y temperatura de equilibrio hasta lograr tal convergencia.

La sección actual se dividirá en varios apartados donde se calcularán las distintas variables de que dependen los  $\Phi_i$ .

### A1.C3.11.1. Cálculo de temperaturas reducidas puras y cruzadas

La temperatura reducida cruzada se definió junto con las reglas de combinación de *Prausnitz* en el capítulo primero. Ésta adopta la expresión (A1.81.6). Para la temperatura reducida pura, se indicó también la validez de la anterior, siempre que se hicieran coincidir los subíndices, lo que se mostró previamente en (A1.114).

Como se mostró en el apartado A1.C3.3.5, se tienen 15 interacciones “*ij*”, que dan lugar a otras tantas temperaturas reducidas cruzadas. También se tienen seis temperaturas reducidas puras, (una por componente). Aplicando (A1.81.6) y (A1.114) al último dato de temperatura disponible, dado por las tablas A1.LXXXII a A1.LXXXIII, y a las temperaturas críticas y críticas cruzadas dadas por las tablas A1.XLVII y A1.XLIX a A1.L, se obtiene, para cada sistema:

Nº Equilibrio	$T_{r1}$	$T_{r2}$	$T_{r3}$	$T_{r4}$	$T_{r5}$	$T_{r6}$
1	0,701	0,712	0,710	0,683	0,730	0,444
2	0,727	0,739	0,736	0,709	0,757	0,461
3	0,718	0,730	0,727	0,700	0,748	0,455
4	0,716	0,729	0,726	0,699	0,746	0,454
5	0,716	0,728	0,725	0,698	0,746	0,454
6	0,701	0,713	0,710	0,684	0,730	0,445
7	0,700	0,712	0,709	0,683	0,729	0,444

Tabla. A1.XC. Temperaturas reducidas puras. Sistema furfural

Nº Equilibrio	$T_{r1}$	$T_{r2}$	$T_{r3}$	$T_{r4}$	$T_{r5}$	$T_{r6}$
1	0,700	0,712	0,710	0,683	0,730	0,419
2	0,731	0,744	0,741	0,713	0,761	0,438
3	0,721	0,733	0,730	0,703	0,750	0,431

Tabla. A1.XCI. Temperaturas reducidas puras. Sistema NMP

Nº Equilibrio	$T_{r12}$	$T_{r13}$	$T_{r14}$	$T_{r15}$	$T_{r16}$	$T_{r23}$	$T_{r24}$	$T_{r25}$
1	0,706	0,705	0,692	0,715	0,558	0,711	0,698	0,721
2	0,733	0,731	0,718	0,742	0,579	0,737	0,724	0,748
3	0,724	0,722	0,709	0,733	0,572	0,729	0,715	0,739
4	0,722	0,721	0,708	0,731	0,571	0,727	0,714	0,737
5	0,722	0,721	0,707	0,731	0,570	0,727	0,713	0,737
6	0,707	0,705	0,692	0,715	0,558	0,711	0,698	0,721
7	0,706	0,705	0,692	0,715	0,558	0,711	0,698	0,721

Tabla. A1.XCII. Temperaturas reducidas cruzadas. Sistema furfural

Nº Equilibrio	$T_{r26}$	$T_{r34}$	$T_{r35}$	$T_{r36}$	$T_{r45}$	$T_{r46}$	$T_{r56}$
1	0,563	0,696	0,719	0,561	0,706	0,551	0,569
2	0,584	0,722	0,746	0,582	0,732	0,572	0,591
3	0,576	0,714	0,737	0,575	0,724	0,565	0,583
4	0,575	0,712	0,736	0,574	0,722	0,564	0,582
5	0,575	0,712	0,735	0,574	0,722	0,563	0,582
6	0,563	0,697	0,720	0,562	0,707	0,551	0,570
7	0,562	0,696	0,719	0,561	0,706	0,551	0,569

Tabla. A1.XCII.bis. Temperaturas reducidas cruzadas. Sistema furfural

Nº Equilibrio	$T_{r12}$	$T_{r13}$	$T_{r14}$	$T_{r15}$	$T_{r16}$	$T_{r23}$	$T_{r24}$	$T_{r25}$
1	0,706	0,705	0,692	0,715	0,542	0,711	0,698	0,721
2	0,737	0,736	0,722	0,746	0,566	0,742	0,728	0,752
3	0,727	0,725	0,712	0,735	0,557	0,731	0,718	0,742

Tabla. A1.XCIII. Temperaturas reducidas cruzadas. Sistema NMP

Nº Equilibrio	$T_{r26}$	$T_{r34}$	$T_{r35}$	$T_{r36}$	$T_{r45}$	$T_{r46}$	$T_{r56}$
1	0,546	0,696	0,719	0,545	0,706	0,535	0,553
2	0,570	0,727	0,751	0,569	0,737	0,559	0,577
3	0,562	0,716	0,740	0,561	0,726	0,551	0,569

Tabla. A1.XCIII.bis. Temperaturas reducidas cruzadas. Sistema NMP

### A1.C3.11.2. Cálculo de coeficientes viriales puros y cruzados

Los coeficientes viriales segundos, B, se determinan aplicando (A1.80). Esta ecuación es válida tanto para coeficientes viriales cru-

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

zados como para los puros, cuando se hacen coincidir los subíndices, como queda mostrado en la expresión (A1.115)

Como en el apartado anterior, existen tantos coeficientes viriales cruzados como interacciones entre pares de moléculas: 15 coeficientes. También se calculan seis coeficientes viriales puros, uno por componente.

Aplicando (A1.115) a R, cuyo valor se fijó en el apartado A1.C3.3.4, y los datos dados en las tablas A1.XLVII y A1.XLIX a A1.L y las tablas A1.XC y A1.XCIII, A1.XCII.bis y A1.XCIII.bis, se obtienen, en unidades de L/mol, los siguientes coeficientes:

Nº Equilibrio	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	B <sub>5</sub>	B <sub>6</sub>
1	-0,641	-0,653	-0,657	-0,721	-0,656	-3,270
2	-0,589	-0,601	-0,604	-0,661	-0,604	-2,916
3	-0,606	-0,618	-0,621	-0,681	-0,621	-3,029
4	-0,609	-0,620	-0,624	-0,684	-0,624	-3,047
5	-0,610	-0,621	-0,625	-0,685	-0,625	-3,054
6	-0,641	-0,652	-0,656	-0,720	-0,655	-3,264
7	-0,642	-0,654	-0,658	-0,721	-0,657	-3,273

Tabla. A1.XCIV. Coeficientes viriales puros. Sistema furfural

Nº Equilibrio	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	B <sub>5</sub>	B <sub>6</sub>
1	-0,641	-0,653	-0,657	-0,721	-0,656	-5,518
2	-0,581	-0,592	-0,596	-0,652	-0,596	-4,786
3	-0,601	-0,612	-0,616	-0,674	-0,615	-5,020

Tabla. A1.XCV. Coeficientes viriales puros. Sistema NMP

Nº Equilibrio	B <sub>12</sub>	B <sub>13</sub>	B <sub>14</sub>	B <sub>15</sub>	B <sub>16</sub>	B <sub>23</sub>	B <sub>24</sub>	B <sub>25</sub>
1	-0,648	-0,650	-0,680	-0,649	-1,359	-0,655	-0,686	-0,655
2	-0,596	-0,597	-0,625	-0,597	-1,232	-0,602	-0,630	-0,602
3	-0,613	-0,614	-0,643	-0,614	-1,273	-0,620	-0,648	-0,619
4	-0,616	-0,617	-0,646	-0,617	-1,279	-0,622	-0,651	-0,622
5	-0,617	-0,618	-0,647	-0,618	-1,282	-0,623	-0,652	-0,623
6	-0,648	-0,649	-0,679	-0,649	-1,357	-0,654	-0,685	-0,654
7	-0,649	-0,650	-0,681	-0,650	-1,360	-0,656	-0,686	-0,655

Tabla. A1.XCVI. Coeficientes viriales cruzados. Sistema furfural

Nº Equilibrio	B <sub>26</sub>	B <sub>34</sub>	B <sub>35</sub>	B <sub>36</sub>	B <sub>45</sub>	B <sub>46</sub>	B <sub>56</sub>
1	-1,364	-0,687	-0,656	-1,366	-0,686	-1,446	-1,354
2	-1,237	-0,631	-0,604	-1,239	-0,631	-1,310	-1,229
3	-1,278	-0,649	-0,621	-1,280	-0,649	-1,353	-1,269
4	-1,284	-0,652	-0,623	-1,287	-0,652	-1,361	-1,276
5	-1,287	-0,653	-0,624	-1,289	-0,653	-1,363	-1,278
6	-1,361	-0,686	-0,655	-1,364	-0,685	-1,443	-1,352
7	-1,364	-0,688	-0,656	-1,367	-0,687	-1,447	-1,355

Tabla. A1.XCVI.bis. Coeficientes viriales cruzados. Sistema furfural

Nº Equilibrio	B <sub>12</sub>	B <sub>13</sub>	B <sub>14</sub>	B <sub>15</sub>	B <sub>16</sub>	B <sub>23</sub>	B <sub>24</sub>	B <sub>25</sub>
1	-0,648	-0,650	-0,680	-0,649	-1,729	-0,655	-0,686	-0,655
2	-0,588	-0,589	-0,616	-0,589	-1,535	-0,594	-0,621	-0,594
3	-0,607	-0,609	-0,637	-0,609	-1,598	-0,614	-0,642	-0,614

Tabla. A1.XCVII. Coeficientes viriales cruzados. Sistema NMP

Nº Equilibrio	B <sub>26</sub>	B <sub>34</sub>	B <sub>35</sub>	B <sub>36</sub>	B <sub>45</sub>	B <sub>46</sub>	B <sub>56</sub>
1	-1,731	-0,687	-0,656	-1,735	-0,686	-1,841	-1,713
2	-1,538	-0,622	-0,595	-1,541	-0,622	-1,633	-1,524
3	-1,600	-0,643	-0,615	-1,603	-0,643	-1,700	-1,585

Tabla. A1.XCVII.bis. Coeficientes viriales cruzados. Sistema NMP

### A1.C3.11.3. Cálculo de coeficientes delta puros y cruzados

Los coeficientes delta cruzados se obtienen por combinación lineal de los coeficientes viriales segundos como se indicaba en (A1.77.2). Por aplicación de esta ecuación a los datos de las tablas

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

A1.XCIV a A1.XCVII, A1.XCVI.bis y A1.XCVII.bis, se obtienen los 15 coeficientes delta cruzados, en las mismas unidades que los coeficientes viriales segundos, correspondientes a las interacciones de pares de moléculas:

Nº Equilibrio	$\delta_{12} \cdot 10^3$	$\delta_{13} \cdot 10^3$	$\delta_{14} \cdot 10^3$	$\delta_{15} \cdot 10^3$	$\delta_{16}$	$\delta_{23} \cdot 10^3$	$\delta_{24} \cdot 10^3$	$\delta_{25} \cdot 10^3$
1	-2,274	-0,870	1,606	-1,389	1,194	-0,063	2,196	-0,205
2	-2,092	-0,797	1,429	-1,299	1,041	-0,058	1,934	-0,200
3	-2,151	-0,820	1,485	-1,328	1,089	-0,060	2,017	-0,202
4	-2,161	-0,824	1,495	-1,333	1,097	-0,060	2,031	-0,202
5	-2,164	-0,826	1,498	-1,335	1,100	-0,060	2,036	-0,202
6	-2,271	-0,868	1,603	-1,387	1,191	-0,063	2,191	-0,205
7	-2,275	-0,870	1,608	-1,389	1,195	-0,063	2,198	-0,205

Tabla. A1.XCVIII. Coeficientes delta cruzados. Sistema furfural

Nº Equilibrio	$\delta_{26}$	$\delta_{34} \cdot 10^3$	$\delta_{35} \cdot 10^3$	$\delta_{36}$	$\delta_{45} \cdot 10^3$	$\delta_{46}$	$\delta_{56}$
1	1,196	3,479	1,139	1,195	3,965	1,099	1,219
2	1,042	3,115	1,031	1,041	3,466	0,957	1,061
3	1,091	3,231	1,066	1,090	3,624	1,002	1,111
4	1,099	3,250	1,071	1,098	3,650	1,010	1,119
5	1,102	3,257	1,073	1,101	3,660	1,012	1,122
6	1,194	3,473	1,137	1,192	3,956	1,097	1,216
7	1,197	3,482	1,140	1,196	3,969	1,100	1,220

Tabla. A1.XCVIII.bis. Coeficientes delta cruzados. Sistema furfural

Nº Equilibrio	$\delta_{12} \cdot 10^3$	$\delta_{13} \cdot 10^3$	$\delta_{14} \cdot 10^3$	$\delta_{15} \cdot 10^3$	$\delta_{16}$	$\delta_{23} \cdot 10^3$	$\delta_{24} \cdot 10^3$	$\delta_{25} \cdot 10^3$
1	-2,274	-0,870	1,606	-1,389	2,700	-0,063	2,196	-0,205
2	-2,063	-0,785	1,401	-1,285	2,296	-0,057	1,893	-0,199
3	-2,132	-0,813	1,467	-1,319	2,425	-0,059	1,990	-0,201

Tabla. A1.XCIX. Coeficientes delta cruzados. Sistema NMP

Nº Equilibrio	$\delta_{26}$	$\delta_{34} \cdot 10^3$	$\delta_{35} \cdot 10^3$	$\delta_{36}$	$\delta_{45} \cdot 10^3$	$\delta_{46}$	$\delta_{56}$
1	2,708	3,479	1,139	2,705	3,965	2,557	2,747
2	2,302	3,058	1,014	2,300	3,388	2,173	2,334
3	2,431	3,193	1,054	2,429	3,572	2,295	2,465

Tabla. A1.XCIX.bis. Coeficientes delta cruzados. Sistema NMP

#### A1.C3.11.4. Cálculo de volúmenes de líquido saturado

Los volúmenes de líquido saturado se estiman mediante la ecuación de *Rackett*, propuesta en la expresión (A1.82). Los datos requeridos se toman de las tablas A1.XLVII y A1.XC a A1.XCI, y los resultados se listan en la siguiente tabla:

Nº Equilibrio	$V_1^L$	$V_2^L$	$V_3^L$	$V_4^L$	$V_5^L$	$V_6^L$
1	0,087	0,097	0,097	0,092	0,110	0,080
2	0,089	0,099	0,100	0,094	0,113	0,080
3	0,089	0,098	0,099	0,093	0,112	0,080
4	0,089	0,098	0,099	0,093	0,112	0,080
5	0,089	0,098	0,099	0,093	0,112	0,080
6	0,087	0,097	0,097	0,092	0,110	0,080
7	0,087	0,097	0,097	0,092	0,110	0,080

Tabla. A1.C. Volúmenes de líquido saturado. Sistema furfural

Nº Equilibrio	$V_1^L$	$V_2^L$	$V_3^L$	$V_4^L$	$V_5^L$	$V_6^L$
1	0,087	0,097	0,097	0,092	0,110	0,096
2	0,090	0,100	0,100	0,094	0,114	0,097
3	0,089	0,099	0,099	0,093	0,113	0,097

Tabla. A1.CI. Volúmenes de líquido saturado. Sistema NMP

Los volúmenes están dados en L/mol, al igual que los volúmenes críticos.

#### A1.C3.11.5. Cálculo de $\Phi_i$

Serán de utilidad las ecuaciones (A1.119) a (A1.124) para un sistema de seis componentes. La aplicación de éstas a la presión de trabajo, dada en la sección A1.C3.2, las últimas presiones de saturación de los componentes, listadas en las tablas A1.LXXXVI a A1.LXXXVII, los coeficientes viriales segundos puros, dados en las tablas A1.XCIV a A1.XCV, los volúmenes de líquido saturado tabulados en A1.C a A1.CI, las composiciones de vapor consignadas en las tablas A1.LXXXVIII a A1.LXXXIX, los coeficientes delta cruzados presentados en las tablas A1.XCVIII a A1.XCIX, A1.XCVIII.bis y

A1.XCIX.bis, y la última temperatura de equilibrio en A1.LXXXII a A1.LXXXIII, conocido R; se obtiene:

Nº Equilibrio	$\Phi_1$	$\Phi_2$	$\Phi_3$	$\Phi_4$	$\Phi_5$	$\Phi_6$
1	0,992	0,999	0,997	0,970	1,012	0,768
2	1,022	1,030	1,028	0,998	1,047	0,826
3	1,011	1,019	1,017	0,989	1,035	0,810
4	1,010	1,018	1,016	0,987	1,033	0,794
5	1,009	1,017	1,015	0,986	1,032	0,792
6	0,992	0,999	0,997	0,971	1,013	0,769
7	0,992	0,998	0,997	0,970	1,012	0,768

Tabla. A1.CII. Cálculo de los  $\Phi_i$ . Sistema furfural

Nº Equilibrio	$\Phi_1$	$\Phi_2$	$\Phi_3$	$\Phi_4$	$\Phi_5$	$\Phi_6$
1	0,992	0,999	0,997	0,970	1,012	0,701
2	1,027	1,036	1,034	1,003	1,053	0,822
3	1,015	1,023	1,021	0,992	1,039	0,788

Tabla. A1.CIII. Cálculo de los  $\Phi_i$ . Sistema NMP

### **A1.C3.12. Cálculo de la presión de saturación (4)**

Conocidos los  $\Phi_i$ , pueden actualizarse las presiones de saturación de los componentes en equilibrio, por aplicación de las ecuaciones (A1.106) a (A1.111) a los datos de presión, dada en la sección A1.C3.2, los últimos coeficientes de actividad listados en las tablas A1.LXXXIV a A1.LXXXV, las composiciones dadas en la Tabla A1.XLI, las últimas presiones de saturación calculadas, tabuladas en A1.LXXXVI a A1.LXXXVII y los datos de las tablas A1.CII a A1.CIII; se recalculan:

Nº Equilibrio	$P_1^0$ (atm)	$P_2^0$ (atm)	$P_3^0$ (atm)	$P_4^0$ (atm)	$P_5^0$ (atm)	$P_6^0$ (atm)
1	2,730	2,956	2,893	2,078	3,390	0,002
2	3,349	3,607	3,533	2,587	4,078	0,004
3	3,096	3,340	3,270	2,380	3,793	0,003
4	3,210	3,463	3,391	2,465	3,937	0,003
5	3,201	3,455	3,383	2,458	3,928	0,003
6	2,745	2,972	2,908	2,089	3,407	0,002
7	2,724	2,949	2,886	2,072	3,382	0,002

Tabla. A1.CIV. Cálculo de  $P_i^0$  conocidos los  $\Phi_i$ . Sistema furfural

Nº Equilibrio	$P_1^0$ (atm)	$P_2^0$ (atm)	$P_3^0$ (atm)	$P_4^0$ (atm)	$P_5^0$ (atm)	$P_6^0$ (atm)
1	2,730	2,956	2,893	2,078	3,390	0,001
2	3,459	3,722	3,647	2,679	4,198	0,001
3	3,164	3,411	3,341	2,436	3,868	0,001

Tabla. A1.CV. Cálculo de  $P_i^0$  conocidos los  $\Phi_i$ . Sistema NMP

### **A1.C3.13. Cálculos de temperatura y coef. de actividad (3)**

De nuevo, siguiendo el esquema iterativo, una vez actualizadas las presiones de saturación, procede realizar lo propio con la temperatura del equilibrio. Para ello, se procede como en la sección A1.C3.8, empleando los datos más actuales de las presiones de saturación, del apartado anterior; y se obtienen los siguientes datos:

Nº Equilibrio	$T_1^0$ (K)	$T_2^0$ (K)	$T_3^0$ (K)	$T_4^0$ (K)	$T_5^0$ (K)	$T_6^0$ (K)	$T_3$ (K)
1	297,691	297,691	297,691	297,692	297,689	297,705	297,693
2	304,476	304,405	304,419	304,663	304,207	307,040	304,868
3	301,822	301,769	301,779	301,963	301,620	303,758	302,118
4	303,032	303,008	303,013	303,095	302,942	303,894	303,164
5	302,946	302,924	302,929	303,004	302,863	303,735	303,067
6	297,868	297,868	297,868	297,869	297,867	297,881	297,870
7	297,615	297,615	297,615	297,616	297,614	297,629	297,617

Tabla. A1.CVI. Tercer cálculo de T de equilibrio. Sistema furfural

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Nº Equilibrio	$T_1^0$ (K)	$T_2^0$ (K)	$T_3^0$ (K)	$T_4^0$ (K)	$T_5^0$ (K)	$T_6^0$ (K)	$T_3$ (K)
1	297,691	297,690	297,690	297,692	297,689	297,703	297,693
2	305,582	305,499	305,515	305,803	305,264	308,424	306,014
3	302,548	302,487	302,499	302,710	302,316	304,612	302,862

Tabla. A1.CVII. Tercer cálculo de T de equilibrio. Sistema NMP

Como puede observarse, la dispersión de las temperaturas de saturación alrededor de la media comienza a reducirse, respecto al anterior cálculo de temperaturas, como fruto de la convergencia creciente de los datos en torno al equilibrio. Las temperaturas de saturación deben ser coincidentes, puesto que todos los componentes vaporizan a la misma temperatura en equilibrio.

Puesto que los coeficientes de actividad son dependientes de la temperatura, sus valores han de recalcularse. Para ello, se repiten los pasos dependientes de la temperatura, (cambiando a la de las tablas A1.CVI a A1.CVII), dentro de la sección A1.C3.6, para la obtención del coeficiente de actividad. Con esto se obtiene un nuevo valor recalculado, tal como se indicó en la anterior sección de obtención de la temperatura del equilibrio:

Nº Equilibrio	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$	$\gamma_4$	$\gamma_5$	$\gamma_6$
1	1,138	1,000	1,007	1,007	1,015	15,544
2	1,303	1,529	1,455	1,452	1,847	1,802
3	1,188	1,243	1,208	1,206	1,396	2,738
4	1,069	1,175	1,122	1,120	1,338	4,442
5	1,062	1,164	1,112	1,110	1,323	4,749
6	1,134	1,000	1,006	1,006	1,016	15,473
7	1,140	1,000	1,007	1,008	1,014	15,574

Tabla. A1.CVIII. Tercer cálculo de coeficientes de actividad. Sistema furfural

Nº Equilibrio	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$	$\gamma_4$	$\gamma_5$	$\gamma_6$
1	1,138	1,000	1,007	1,007	1,015	11,492
2	1,274	1,463	1,403	1,401	1,755	1,683
3	1,173	1,215	1,185	1,185	1,363	2,462

Tabla. A1.CIX. Tercer cálculo de coeficientes de actividad. Sistema NMP

Seguidamente, procedería obtener la presión de saturación, para la nueva temperatura de equilibrio, como se practicó en la sección A1.C3.9, de forma que se ha cerrado el ciclo, puesto que al volver sobre uno de los pasos, estos deberán repetirse tantas veces como se precise, hasta que la convergencia obtenida sea satisfactoria. Desde A1.C3.9 hasta A1.C3.13, se reiterará lo descrito en cada una de tales secciones, a los datos más actuales.

#### **A1.C3.14. Comprobación de la convergencia**

Se presenta en esta sección el criterio de evaluación de la convergencia, que permitirá decidir en qué punto puede concluirse el bucle de cálculo: tras cada obtención de una nueva temperatura de equilibrio, (comenzando por la tercera, dada en la sección anterior), se planteará la verificación de la ecuación del criterio del equilibrio termodinámico. A este fin, se calcula para cada componente el valor de cada miembro de la ecuación, y se decide según la diferencia entre ambos, en términos absolutos. La primera verificación se tabula seguidamente:

Nº Equilibrio	$\gamma_1\Phi_1P$	$x_1\gamma_1P_1^0$	$\Delta$	$\gamma_2\Phi_2P$	$x_2\gamma_2P_2^0$	$\Delta$	$\gamma_3\Phi_3P$	$x_3\gamma_3P_3^0$	$\Delta$
1	0,035	0,035	0,000	2,000	2,001	0,001	0,598	0,600	0,002
2	2,524	2,180	0,344	0,000	0,000	0,000	0,552	0,474	0,078
3	1,428	1,283	0,145	0,975	0,869	0,106	0,564	0,503	0,060
4	2,295	2,179	0,117	0,000	0,000	0,000	0,531	0,501	0,030
5	2,286	2,178	0,107	0,000	0,000	0,000	0,530	0,502	0,028
6	0,037	0,037	0,000	2,080	2,080	0,000	0,628	0,629	0,001
7	0,031	0,031	0,000	1,974	1,976	0,002	0,580	0,581	0,002

Tabla. A1.CX. Verificación del criterio de equilibrio. Sistema furfural

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Nº Equilibrio	$y_4\Phi_4P$	$x_4\gamma_4P_4^0$	$\Delta$	$y_5\Phi_5P$	$x_5\gamma_5P_5^0$	$\Delta$	$y_6\Phi_6P$	$x_6\gamma_6P_6^0$	$\Delta$
1	0,000	0,000	0,000	0,368	0,364	0,005	0,000	0,000	0,000
2	0,455	0,402	0,053	0,000	0,000	0,000	0,002	0,002	0,000
3	0,231	0,213	0,019	0,197	0,173	0,024	0,002	0,002	0,000
4	0,353	0,343	0,010	0,000	0,000	0,000	0,001	0,002	0,000
5	0,349	0,341	0,009	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000
6	0,000	0,000	0,000	0,256	0,253	0,003	0,000	0,000	0,000
7	0,000	0,000	0,000	0,417	0,412	0,005	0,000	0,000	0,000

Tabla. A1.CX.bis. Verificación del criterio de equilibrio. Sistema furfural

Nº Equilibrio	$y_1\Phi_1P$	$x_1\gamma_1P_1^0$	$\Delta$	$y_2\Phi_2P$	$x_2\gamma_2P_2^0$	$\Delta$	$y_3\Phi_3P$	$x_3\gamma_3P_3^0$	$\Delta$
1	0,035	0,035	0,000	2,000	2,001	-0,001	0,598	0,600	0,002
2	2,618	2,201	0,417	0,000	0,000	0,000	0,564	0,471	0,093
3	1,465	1,294	0,171	0,990	0,868	0,123	0,575	0,505	0,070

Tabla. A1.CXI. Verificación del criterio de equilibrio. Sistema NMP

Nº Equilibrio	$y_4\Phi_4P$	$x_4\gamma_4P_4^0$	$\Delta$	$y_5\Phi_5P$	$x_5\gamma_5P_5^0$	$\Delta$	$y_6\Phi_6P$	$x_6\gamma_6P_6^0$	$\Delta$
1	0,000	0,000	0,000	0,368	0,364	0,005	0,000	0,000	0,000
2	0,467	0,402	0,065	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000
3	0,236	0,214	0,023	0,200	0,172	0,027	0,000	0,000	0,000

Tabla. A1.CXI.bis. Verificación del criterio de equilibrio. Sistema NMP

Donde se han tomado las composiciones de vapor de la sección A1.C3.10, los  $\Phi_i$  de la sección A1.C3.11, la presión de A1.C3.2, la composición de fase líquida de A1.C3.1, los coeficientes de actividad de la sección A1.C3.8 y las presiones de saturación de A1.C3.12. Cada vez que se reiteran los cálculos de A1.C2.13, se verifica el criterio fundamental del equilibrio termodinámico, con los datos actualizados.

### A1.C2.15. Datos de equilibrio

Cuando se reitera el cálculo en nueve ocasiones, se obtienen errores inferiores al octavo decimal. Los datos finales de equilibrio

para cada sistema, tomados de la novena iteración, se tabulan para cerrar el capítulo:

Nº Equilibrio	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_6$	$T_{11}$ (K)
1	0,012	0,668	0,201	0,000	0,120	0,000	297,688
2	0,711	0,000	0,154	0,134	0,000	0,001	303,917
3	0,422	0,285	0,165	0,071	0,056	0,001	301,392
4	0,719	0,000	0,165	0,116	0,000	0,001	302,881
5	0,719	0,000	0,165	0,115	0,000	0,001	302,810
6	0,013	0,694	0,210	0,000	0,083	0,000	297,865
7	0,010	0,660	0,194	0,000	0,136	0,000	297,613

Tabla. A1.CXII. Composiciones de la fase vapor en equilibrio. Sistema furfural

Nº Equilibrio	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_6$	$T_{11}$ (K)
1	0,012	0,668	0,201	0,000	0,120	0,000	297,688
2	0,715	0,000	0,153	0,133	0,000	0,000	304,909
3	0,425	0,283	0,165	0,071	0,056	0,000	302,058

Tabla. A1.CXIII. Composiciones de la fase vapor en equilibrio. Sistema NMP

Donde las composiciones de vapor de las tablas A1.CXII a A1.CXIII se encuentran en equilibrio, a la temperatura listada en las mismas tablas, con las de líquido en la Tabla A1.XLI, a la presión recogida en la sección A1.C3.2.



### **Capítulo A1.C4. Equilibrio de fases para “EXTRACTIVA 2”**

En este cuarto capítulo del anexo de datos termodinámicos, se procurarán las composiciones de equilibrio a las condiciones requeridas en la operación “EXTRACTIVA 2”. Dado que en el anexo de diseño de unidades se explicitará la idiosincrasia de dicha operación, en este capítulo únicamente se desarrollarán al caso correspondiente, las expresiones obtenidas en el capítulo primero.

La generación de datos de equilibrio es un proceso cíclico donde, en función de datos conocidos, se reiteran los cálculos tanto como sea preciso para lograr una convergencia en el criterio fundamental del equilibrio termodinámico. El procedimiento se ha mostrado en la Figura A1.1 en el capítulo segundo.

Se tiene una iteración en doble bucle, primero para los coeficientes de actividad y luego para la composición del vapor, como se explicó en el mismo capítulo.

El objetivo del capítulo presente estriba en desarrollar y particularizar el ciclo dado en la Figura A1.1. A este fin, se establecerán tantas secciones como pasos requiere el procedimiento.

#### **A1.C3.1. Introducción de la composición de la fase líquida**

La operación “EXTRACTIVA 2” constituye el tercer proceso del tren de separación; su alimentación es el residuo de la operación precedente cuya composición se refiere en la siguiente tabla:

$(x_w)_1$	$(x_w)_2$	$(x_w)_3$	$(x_w)_4$
0,092	0,501	0,108	0,299
<b>Composición molar de la alimentación</b>			

Tabla. A1.CXIV. Composición de W, alimentación de “EXTRACTIVA 2”

Donde los componentes son los que se enumeran seguidamente:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

1. 1-Buteno ( $C_4H_8$ ).
2. 1,3-Butadieno ( $C_4H_6$ ).
3. Cis-2-buteno ( $C_4H_8$ ).
4. Extractante: furfural, ( $C_5H_4O_2$ ).

La ordenación de los componentes, a diferencia de los dos capítulos previos, se ha practicado por orden creciente de volatilidad. En este caso, como se podrá comprobar tras la lectura del anexo de diseño de unidades, se decide emplear el extractante furfural, por los motivos dados en tal anexo.

La operación de “EXTRACTIVA 2”, no es *sensu stricto* una destilación extractiva, puesto que no se añade un extractante que facilite la escisión de componentes por su volatilidad. No obstante, dado que dicho extractante se añadió en la operación previa, se ha mantenido en la nomenclatura como si ésta fuese una destilación extractiva. En todo caso, “EXTRACTIVA 2” es una operación de destilación y, como tal, consiste en vaporizar un líquido en múltiples etapas de equilibrio: las corrientes de líquido y vapor emanadas de cada etapa forman un equilibrio, por lo que deberán introducirse una serie de composiciones necesarias para el diseño de la operación: composición del destilado, de la alimentación de “EXTRACTIVA 2”, del residuo y otras composiciones, de cuya aplicación se procurará cumplida justificación en el anexo de diseño de unidades.

De acuerdo con lo anterior, se introducirán los siguientes valores de composición de fase líquida:

Nº Equilibrio	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
1	0,167	0,814	0,019	0,000
2	0,000	0,112	0,217	0,671
3	0,092	0,501	0,108	0,299
4	0,000	0,323	0,608	0,069
5	0,155	0,822	0,023	0,000
6	0,120	0,850	0,030	0,000

Tabla. A1.CXV. Lista de composiciones de fase líquida

Los componentes más volátiles vaporizarán selectivamente, por lo que es de esperar un líquido, conteniendo el extractante, menos concentrado en tales componentes. De la misma forma, los compuestos más pesados, (o menos volátiles), enriquecerán preferentemente el líquido rico en extractante. Los equilibrios 1, 2 y 3 corresponden a las composiciones del destilado, el residuo y la alimentación a "EXTRACTIVA 2", respectivamente. El equilibrio 4 corresponde, a las composiciones del líquido del último plato de columna, que debe vaporizarse para su devolución a ésta. Por último, los equilibrios 5 y 6 permiten obtener, conocida la composición del destilado, la temperatura del vapor procedente del primer plato de columna que, parcialmente, se retorna a columna como reflujo, previa condensación total. Para los propósitos del presente anexo de cálculo de datos de equilibrio, es suficiente la explicación dada. Como se mencionó anteriormente, será en el anexo de diseño de unidades donde se amplíe convenientemente la justificación de la elección de estos datos de partida.

#### **A1.C4.2. Introducción de la presión de equilibrio**

La presión se introduce como dato considerando la temperatura del equilibrio que generará. Una presión elevada aumenta la temperatura de los equilibrios, puesto que se fuerza a los componentes a permanecer en fase líquida a una misma temperatura de referencia.

La presión baja incrementa la volatilidad del sistema, por lo que disminuye la temperatura del equilibrio y favorece la separación, (lo que se traduce en menor número de platos).

La idiosincrasia del sistema en juego obliga a obtener una solución de compromiso: De un lado, un defecto de presión, pese a reducir el número de etapas de separación requeridas, disminuye la temperatura hasta límites no operativos, (en torno 0 °C). Por otro lado, un exceso de presión aumenta el número de etapas hasta límites no asumibles económicamente.

De esta forma, la solución intermedia se establecerá en base a la temperatura del equilibrio: aquella presión que garantice una temperatura similar a la ambiente será tomada como la presión del sistema como criterio optimizador.

La vía para averiguar el extremo antedicho, consiste en la ecuación de *Antoine*. Se prueba con una presión, (atmosférica para comenzar), y se obtiene la temperatura de saturación de los componentes, despejando convenientemente de la ecuación. Al promediar cada una de las temperaturas de saturación se obtiene una temperatura del equilibrio, (que no coincidirá con la final puesto que se trata de la primera de varias iteraciones, si bien proporciona una aproximación razonable).

Tras varias pruebas, se llega a la conclusión de que una presión de 2 atm concuerda con una temperatura de los equilibrios próxima a la ambiental, como se mostrará en próximas tablas. Por tanto, la elección de la presión queda fijada en:

$$P = 2 \text{ atm}$$

### **A1.C4.3. Introducción de datos**

Los datos que requerirá la generación de composiciones de equilibrio son los que se enumeran seguidamente:

- Parámetros *UNIFAC*
  - o Parámetros de subgrupo,  $R_k$  y  $Q_k$ .
  - o Número de subgrupos,  $v_k^{(i)}$ .
  - o Parámetros de interacción,  $a_{mk}$ .
- Coeficientes de *Antoine*,  $A_i$ ,  $B_i$  y  $C_i$ .
- Propiedades críticas
  - o Temperatura crítica,  $T_{ci}$ .
  - o Presión crítica,  $P_{ci}$ .
  - o Volumen crítico,  $V_{ci}$ .
  - o Factor de compresibilidad crítico,  $Z_{ci}$ .

- Factor acéntrico crítico,  $\omega_{Ci}$ .
- Otras propiedades
  - Peso molecular,  $PM_i$ .
  - Temperatura normal de ebullición,  $T_i^0$  (normal).
  - Parámetro  $k_{ij}$  de interacción, (véase capítulo primero).
  - Constante universal de los gases,  $R$  en (atm·L/mol·K).
- Reglas de *Prausnitz*, (véase capítulo primero).

Tales datos junto a sus particularidades, se presentan en los siguientes apartados en forma tabular, junto a las oportunas acotaciones.

#### A1.C4.3.1. Parámetros UNIFAC

Previa consigna de los parámetros es preciso desglosar en sus subgrupos constituyentes, cada una de las moléculas de las especies del sistema en cuestión. En la figura que sigue, se presentan los componentes de la alimentación de la operación “EXTRACTIVA 2”, por sus fórmulas desarrolladas:

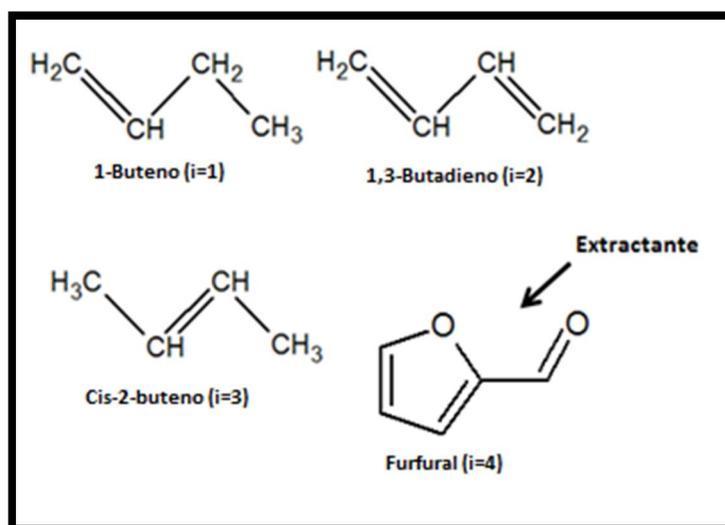


Figura. A1.4. Componentes de la alimentación W. (Elaboración propia)

De donde, atendiendo a la Tabla A1.I del capítulo primero, pueden discriminarse los siguientes subgrupos:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

- 1-Buteno: Dos subgrupos  $\text{CH}_2$ , uno  $\text{CH}_3$  y uno  $\text{CH}$ .
- 1,3-Butadieno: Dos subgrupos  $\text{CH}_2$  y dos  $\text{CH}$ .
- Cis-2-buteno: Dos subgrupos  $\text{CH}_3$  y dos  $\text{CH}$ .
- Furfural: Corresponde con su grupo principal.

En este caso, dado que no todos los subgrupos pertenecen al grupo principal "Alcanos", como se mostró en el capítulo segundo, las interacciones entre los mismos no son nulas y deberán recogerse en tabla aparte, según lo dispuesto en la Tabla A1.II.

Con lo anterior, tomando los datos listados en las tablas A1.I a A1.II, se tiene:

Parámetros de subgrupo UNIFAC				i=1	i=2	i=3	i=4
Grupo	k	$R_k$	$Q_k$	$v_k^{(1)}$	$v_k^{(2)}$	$v_k^{(3)}$	$v_k^{(4)}$
$\text{CH}_3$	1	0,9011	0,8480	1	0	2	0
$\text{CH}_2$	2	0,6744	0,5400	2	2	0	0
$\text{CH}$	3	0,4469	0,2280	1	2	2	0
Furfural	61	3,1680	2,4810	0	0	0	1

Tabla. A1.CXVI. Parámetros de subgrupo UNIFAC

Parámetros de interacción $a_{mk}$ (K)				
m	k = 1	k = 2	k = 3	k = 61
1	0,000	0,000	0,000	354,600
2	0,000	0,000	0,000	354,600
3	0,000	0,000	0,000	354,600
61	-25,310	-25,310	-25,310	0,000

Tabla. A1.CXVII. Parámetros de interacción UNIFAC

### A1.C4.3.2. Coeficientes de Antoine

Los coeficientes de *Antoine* son números adimensionales que permiten, por la ecuación del mismo autor, encontrar la presión de saturación de un vapor conocida la temperatura del equilibrio, o bien la temperatura de saturación conocida la presión del sistema. En este caso, para los componentes de  $i=1$  a  $i=3$ , esto es, los hidrocarburos, la ecuación de *Antoine* responde a la siguiente expresión:

$$\ln P_i^0(\text{mmHg}) = A_i - \frac{B_i}{T(\text{K}) + C_i} \text{ Ecuación de Antoine (A1.87)}$$

Ecuación, que despejada para el caso de la temperatura de saturación, se escribe como sigue:

$$T_i^0(\text{K}) = \frac{B_i}{A_i - \ln P(\text{mmHg})} - C_i \text{ (A1.88)}$$

Para el componente  $i=4$ , el extractante furfural, son aplicables las ecuaciones (A1.87) y (A1.88), considerando que la presión se expresa en bar y no en milímetros de mercurio.

Los coeficientes de *Antoine* se tabulan a renglón seguido:

Coeficientes de Antoine			
1-Buteno (i = 1) C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>		Butadieno (i = 2) C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	
A <sub>1</sub>	15,7564	A <sub>2</sub>	15,7727
B <sub>1</sub>	2132,42	B <sub>2</sub>	2142,66
C <sub>1</sub>	-33,15	C <sub>2</sub>	-34,30
Cis-2-buteno (i = 3) C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>		Furfural (i = 4) C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	
A <sub>3</sub>	15,8171	A <sub>4</sub>	8,5214
B <sub>3</sub>	2210,71	B <sub>4</sub>	2760,09
C <sub>3</sub>	-36,15	C <sub>4</sub>	-110,4

Tabla. A1.CXVIII. Coeficientes de *Antoine*

#### A1.C4.3.3. Propiedades críticas y temperaturas de ebullición normal

Se consignan en tabla las propiedades críticas precisadas y listadas *ut supra*, así como las temperaturas de ebullición normales:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Propiedades críticas y temperaturas normales de ebullición					
$T_1^0$ (K) (normal)	266,9	$P_{c1}$ (atm)	39,7	$Z_{c1}$	0,277
$T_2^0$ (K) (normal)	268,7	$P_{c2}$ (atm)	42,7	$Z_{c2}$	0,270
$T_3^0$ (K) (normal)	276,9	$P_{c3}$ (atm)	41,5	$Z_{c3}$	0,272
$T_4^0$ (K) (normal)	434,9	$P_{c4}$ (atm)	55,9	$Z_{c4}$	0,256
$T_{c1}$ (K)	419,6	$V_{c1}$ (L/mol)	0,240	$\omega_1$	0,187
$T_{c2}$ (K)	425,0	$V_{c2}$ (L/mol)	0,221	$\omega_2$	0,195
$T_{c3}$ (K)	435,6	$V_{c3}$ (L/mol)	0,234	$\omega_3$	0,202
$T_{c4}$ (K)	670,2	$V_{c4}$ (L/mol)	0,252	$\omega_4$	0,3678

Tabla. A1.CXIX. Propiedades críticas y temperaturas normales de ebullición

Tales propiedades se han plasmado respetándose el número de cifras significativas con que figuran en la bibliografía\*.

### A1.C4.3.4. Otras propiedades

Los pesos moleculares de las sustancias implicadas en el equilibrio se tabulan seguidamente:

Pesos moleculares	
$PM_1$ (g/mol)	56,108
$PM_2$ (g/mol)	54,092
$PM_3$ (g/mol)	56,108
$PM_4$ (g/mol)	96,1

Tabla. A1.CXX. Pesos moleculares

El parámetro de interacción  $k_{ij}$ , será despreciado debido al similar carácter químico de las especies hidrocarbonadas en equilibrio. No se presenta en la bibliografía indicación sobre la interacción posible entre el extractante y el resto de componentes, por lo que se de-

\* The properties of gases & liquids. R. C. Reid, J. M. Prausnitz, B. E. Poling. McGraw-Hill. 4ª Edición.

Modelado del equilibrio líquido-vapor en mezclas binarias y ternarias de interés en destilación vínica. J. O. Valderrama, C. A. Faúndez. Revista Inf. Tecnol. Vol. 14 n° 1 (2003). Págs. 83-92.

cide hacer nulos todos los  $k_{ij}$ . La constante universal de los gases se tomará en el valor y unidades indicadas abajo:

$$k_{ij} = 0$$

$$R = 0,082057 \text{ atm}\cdot\text{L/mol}\cdot\text{K}$$

#### A1.C4.3.5. Reglas de combinación de Prausnitz

La aplicación de las ecuaciones (A1.81.1) a (A1.81.5), proporciona el valor de las distintas variables cruzadas. Se considerará, además de los datos de  $R$  y  $k_{ij}$  del apartado anterior, los datos de la Tabla A1.CXIX. Se obtendrán, por el siguiente orden:  $T_{cij}$ ,  $Z_{cij}$ ,  $V_{cij}$ ,  $P_{cij}$  y  $\omega_{cij}$ . Puesto que se tienen cuatro componentes, las interacciones de pares serán: 1-2, 1-3, 1-4, 2-3, 2-4 y 3-4, en total 6 interacciones, (considerando que la interacción “ $ij$ ” es la misma que la inversa “ $ji$ ” y que la interacción “ $ij$ ” es la propiedad pura ya tabulada en la Tabla A1.CXIX).

Los resultados se consignan en la tabla siguiente:

Reglas de combinación de Prausnitz									
$T_{c12}$ (K)	422,2914	$Z_{c12}$	0,2735	$V_{c12}$ (L/mol)	0,2304	$P_{c12}$ (atm)	41,1396	$\omega_{12}$	0,1910
$T_{c13}$ (K)	427,5252	$Z_{c13}$	0,2745	$V_{c13}$ (L/mol)	0,2370	$P_{c13}$ (atm)	40,6345	$\omega_{13}$	0,1945
$T_{c14}$ (K)	530,2782	$Z_{c14}$	0,2665	$V_{c14}$ (L/mol)	0,2460	$P_{c14}$ (atm)	47,1471	$\omega_{14}$	0,2774
$T_{c23}$ (K)	430,2674	$Z_{c23}$	0,2710	$V_{c23}$ (L/mol)	0,2274	$P_{c23}$ (atm)	42,0688	$\omega_{23}$	0,1985
$T_{c24}$ (K)	533,6794	$Z_{c24}$	0,2630	$V_{c24}$ (L/mol)	0,2362	$P_{c24}$ (atm)	48,7675	$\omega_{24}$	0,2814
$T_{c34}$ (K)	540,2938	$Z_{c34}$	0,2640	$V_{c34}$ (L/mol)	0,2429	$P_{c34}$ (atm)	48,1869	$\omega_{34}$	0,2849

Tabla. A1.CXXI. Aplicación de las reglas de combinación de Prausnitz

#### A1.C4.4. Cálculos de temperatura (1)

Conocidas las composiciones de fase líquida de cada equilibrio, así como los datos previos, puede iniciarse la secuencia de cálculo, tal como se desarrollará a partir de la presente sección.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Haciendo uso de los coeficientes de *Antoine*, listados en la Tabla A1.CXVIII, se obtienen las temperaturas de saturación de cada componente en el equilibrio, por aplicación de la ecuación (A1.88) a la presión de trabajo de 2 atm.

Las temperaturas de saturación obtenidas de esta forma se listan a continuación:

$T_1^0$ (K)	$T_2^0$ (K)	$T_3^0$ (K)	$T_4^0$ (K)
286,108	287,982	296,520	463,574

Tabla. A1.CXXII. Temperaturas de saturación a la presión de trabajo

Donde debe indicarse que la presión debe cambiarse convenientemente de unidades, (presión en bar), previa introducción en la ecuación (A1.88) para el caso del extractante furfural.

Las temperaturas de saturación por componente permiten evaluar una primera temperatura de equilibrio. Si se promedian los datos de la Tabla A1.CXXII, ponderándose por las composiciones dadas en la Tabla A1.CXV según:

$$T = \sum_i x_i T_i^0 = x_1 T_1^0 + \dots + x_4 T_4^0 \quad (A1.140)$$

Se encuentra, para cada equilibrio:

Nº Equilibrio	$T_1$ (K)
1	287,835
2	407,589
3	341,229
4	305,348
5	287,888
6	288,014

Tabla. A1.CXXIII. Primer cálculo de temperatura de equilibrio

### **A1.C4.5. Cálculo de presión de saturación (1)**

Conocida la temperatura de cada equilibrio, dada en la Tabla A1.CXXIII, puede calcularse la presión de saturación de los componentes en cada equilibrio, aplicando la ecuación (A1.87), convenientemente despejada para la anterior magnitud:

$$(A1.127) \begin{cases} P_i^0(\text{mmHg}) = e^{A_i - \frac{B_i}{T(\text{K}) + C_i}} (A1.90) \\ P_4^0(\text{bar}) = e^{A_4 - \frac{B_4}{T(\text{K}) + C_4}} (1) \end{cases}$$

Donde (A1.90) continúa siendo válida para los hidrocarburos, mientras que para el furfural, debe considerarse (A1.127.1), idéntica en forma a (A1.90), con distintas unidades.

Operando con los datos de la Tabla A1.CXVIII se obtiene:

Nº Equilibrio	$P_1^0$ (atm)	$P_2^0$ (atm)	$P_3^0$ (atm)	$P_4^0$ (atm)
1	2,118	1,990	1,492	0,001
2	30,818	29,947	25,331	0,459
3	9,038	8,657	6,941	0,032
4	3,629	3,436	2,642	0,004
5	2,121	1,994	1,495	0,001
6	2,130	2,002	1,501	0,001

Tabla. A1.CXXIV. Cálculo de presiones de saturación, conocida T

### **A1.C4.6. Cálculo de los coeficientes de actividad**

En esta sección se desarrollarán las ecuaciones del método *UNIFAC*, proporcionadas en el capítulo primero, al sistema en cuestión. Se presentará el proceso secuenciado de cálculo en distintos apartados.

### A1.C4.6.1. Cálculo de $r_i$

De acuerdo a la ecuación (A1.86.1), para un sistema de cuatro componentes, los desarrollos consisten en las siguientes expresiones:

$$(A1.91) \left\{ \begin{array}{l} r_i = \sum_k v_k^{(i)} R_k \text{ (A1.86.1)} \\ r_1 = \sum_k v_k^{(1)} R_k \text{ (1)} \\ \dots \\ r_4 = \sum_k v_k^{(4)} R_k \text{ (2)} \end{array} \right.$$

Donde se calcularán tantos  $r_i$  como componentes, multiplicando cada subgrupo por el número en que están presentes en la molécula que defina al compuesto “ $i$ ”, y sumando todos los productos. Los datos para ejecutar este cálculo vienen dados en la Tabla A1.CXVI. Los distintos  $r_i$  así obtenidos se consignan en la siguiente:

$r_1$	2,6898	$r_2$	2,2426
$r_3$	2,6960	$r_4$	3,1680

Tabla. A1.CXXV. Cálculo de  $r_i$

### A1.C4.6.2. Cálculo de $q_i$

De acuerdo a la ecuación (A1.86.2), para un sistema de cuatro componentes, los desarrollos se expresan como sigue:

$$(A1.92) \left\{ \begin{array}{l} q_i = \sum_k v_k^{(i)} Q_k \text{ (A1.86.2)} \\ q_1 = \sum_k v_k^{(1)} Q_k \text{ (1)} \\ \dots \\ q_4 = \sum_k v_k^{(4)} Q_k \text{ (2)} \end{array} \right.$$

Donde se calcularán tantos  $q_i$  como componentes, multiplicando cada subgrupo por el número en que están presentes en la molé-

cula que defina al compuesto "i", y sumando todos los productos. Los datos para ejecutar este cálculo vienen dados en la Tabla A1.CXVI y los distintos  $q_i$  así obtenidos se consignan en la siguiente:

$q_1$	2,1560	$q_2$	1,5360
$q_3$	2,1520	$q_4$	2,4810

Tabla. A1.CXXVI. Cálculo de  $q_i$

### A1.C4.6.3. Cálculo de $e_{ki}$

El cálculo de  $e_{ki}$  está basado en la ecuación (A1.86.5). Dicha expresión implica todos los subgrupos k (del 1 al 3 y 61 para furfural), así como todas las especies desde  $i=1$  hasta  $i=4$ . Dado que para cada subgrupo, debe obtenerse una ecuación por componente, se precisarán 16 ecuaciones, que pueden tomarse de los dos capítulos previos:

$$(A1.93) \left\{ \begin{array}{l} e_{11} = \frac{v_1^{(1)} Q_1}{q_1} (1); e_{12} = \frac{v_1^{(2)} Q_1}{q_2} (2); e_{13} = \frac{v_1^{(3)} Q_1}{q_3} (3) \\ e_{14} = \frac{v_1^{(4)} Q_1}{q_4} (4); e_{21} = \frac{v_2^{(1)} Q_2}{q_1} (7); e_{22} = \frac{v_2^{(2)} Q_2}{q_2} (8) \\ e_{23} = \frac{v_2^{(3)} Q_2}{q_3} (9); e_{24} = \frac{v_2^{(4)} Q_2}{q_4} (10); e_{31} = \frac{v_3^{(1)} Q_3}{q_1} (13) \\ e_{32} = \frac{v_3^{(2)} Q_3}{q_2} (14); e_{33} = \frac{v_3^{(3)} Q_3}{q_3} (15); e_{34} = \frac{v_3^{(4)} Q_3}{q_4} (16) \end{array} \right.$$

$$(A1.129) \left\{ \begin{array}{l} e_{61,1} = \frac{v_{61}^{(1)} Q_{61}}{q_1} (7); e_{61,2} = \frac{v_{61}^{(2)} Q_{61}}{q_2} (8); e_{61,3} = \frac{v_{61}^{(3)} Q_{61}}{q_3} (9) \\ e_{61,4} = \frac{v_{61}^{(4)} Q_{61}}{q_4} (10) \end{array} \right.$$

$e_{ki}$				
k	i = 1	i = 2	i = 3	i = 4
1	0,393	0,000	0,788	0,000
2	0,501	0,703	0,000	0,000
3	0,106	0,297	0,212	0,000
61	0,000	0,000	0,000	1,000

Tabla. A1.CXXVII. Cálculo de  $e_{ki}$ .

Aplicando las ecuaciones mostradas de (A1.93) y (A1.129) sobre los datos consignados en las tablas A1.CXVI y A1.CXXVI, se ha obtenido lo presentado en la Tabla A1.CXXVII.

#### A1.C4.6.4. Cálculo de $\tau_{mk}$

La ecuación (A1.86.6), proporciona el valor de  $\tau_{mk}$  mediante una función dependiente del parámetro de interacción,  $a_{mk}$ , (tabulado en A1.CXVII) y la temperatura de equilibrio más actual, dada en la Tabla A1.CXXIII.

Como en el capítulo anterior, el presente sistema involucra subgrupos correspondientes a distintos grupos principales, de modo que será preciso distinguir entre los  $\tau_{mk}$  derivados del cálculo de parámetros de interacción distintos de cero, de aquellos resultantes de interacciones nulas, (por corresponder los subgrupos al mismo grupo principal), cuyo valor sigue siendo la unidad por mor de lo expuesto en el capítulo segundo. Sea por tanto:

$\tau_{mk} = \tau_{kk}$
1

Tabla. A1.CXXVIII. Valor de los  $\tau_{mk}$  para m y k distintos de 61

Los  $\tau_{mk}$ , para un subgrupo k distinto de 61, (el correspondiente al extractante) equivalen a la unidad, dado que los parámetros de interacción  $a_{mk}$  que les conciernen, pertenecen al mismo grupo principal, de donde la exponencial de (A1.86.6) se anula.

No puede establecerse lo mismo para aquéllos  $\tau_{mk}$ , donde los subíndices representen la interacción entre el extractante y cualquiera de los demás componentes. A continuación se presentarán en tablas. Lo que sí puede añadirse a la Tabla A1.CXXVIII, es  $\tau_{kk}=1$ , cualquiera que sea k, como corresponde a las interacciones de un subgrupo consigo mismo.

Por todo lo razonado, los  $\tau_{mk}$  distintos de la unidad deben ser:  $\tau_{1,61}$ ,  $\tau_{2,61}$ ,  $\tau_{3,61}$ ,  $\tau_{61,1}$ ,  $\tau_{61,2}$  y  $\tau_{61,3}$ . Considerando que todos los subgru-

pos pertenecientes a un mismo grupo principal presentan la misma interacción con los subgrupos de otro grupo, (atendiendo a la Tabla A1.II), se tiene que los  $\tau_{61,k}$  son iguales para k de 1 a 3, puesto que tales subgrupos pertenecen a un mismo grupo, como queda explicado. De la misma forma los  $\tau_{m,61}$  son también iguales para m de 1 a 3.

Argumentadas estas peculiaridades del parámetro  $\tau_{mk}$  y aplicando (A1.86.6), sobre los datos mencionados al comienzo de este apartado se obtiene:

Nº Equilibrio	$\tau_{1,61} = \tau_{2,61} = \tau_{3,61}$	$\tau_{61,1} = \tau_{61,2} = \tau_{61,3}$
1	0,292	1,092
2	0,419	1,064
3	0,354	1,077
4	0,313	1,086
5	0,292	1,092
6	0,292	1,092

Tabla. A1.CXXIX. Valor de los  $\tau_{mk}$

De lo que se deduce que, si este parámetro, el único dependiente de la temperatura para el cálculo de los coeficientes de actividad, en este caso es variable debido a la interacción de los subgrupos; obligatoriamente será preciso recalcular tanto los  $\tau_{mk}$  como los propios coeficientes de actividad, cada vez que se actualice la temperatura. De forma contraria al capítulo segundo, en esta ocasión no se ahorra el bucle iterativo de los coeficientes de actividad, y el proceso de cálculo será tan completo como muestra la Figura A1.1.

#### A1.C4.6.5. Cálculo de $\beta_{ik}$

Partiendo de la ecuación (A1.86.7), se tiene una expresión que va en todos los componentes y subgrupos, de donde el desarrollo pertinente, incluye 16 ecuaciones. La expresión (A1.94), recogió las expresiones precisas para el cálculo de  $\beta_{ik}$ , considerando que todos los  $\tau_{mk}$  valían la unidad, dado que no entraba en juego un subgrupo que presentase interacción con el resto. En este caso no se verifica

este hecho para todos los casos, si bien pueden efectuarse las simplificaciones que seguidamente se razonan. Sea:

$$\beta_{ik} = \sum_m e_{mi} \tau_{mk} \quad (A1.86.7)$$

Desarrollando para  $i=1$ , se obtiene:

$$(A1.141) \begin{cases} \beta_{11} = e_{11}\tau_{11} + e_{21}\tau_{21} + e_{31}\tau_{31} + e_{61,1}\tau_{61,1} (1) \\ \beta_{12} = e_{11}\tau_{12} + e_{21}\tau_{22} + e_{31}\tau_{32} + e_{61,1}\tau_{61,2} (2) \\ \beta_{13} = e_{11}\tau_{13} + e_{21}\tau_{23} + e_{31}\tau_{33} + e_{61,1}\tau_{61,3} (3) \\ \beta_{1,61} = e_{11}\tau_{1,61} + e_{21}\tau_{2,61} + e_{31}\tau_{3,61} + e_{61,1}\tau_{61,61} (4) \end{cases}$$

Se observa que los primeros tres sumandos de las  $\beta_{ik}$  para cualquier  $k$  del grupo "Alcano", multiplican por un  $\tau_{mk}$  que supone la unidad, según lo ya demostrado; el cuarto sumando multiplica por un  $e_{ki}$ , que según la Tabla A1.CXXVII, es nulo, por lo que no contribuye a la suma. De esta forma, las ecuaciones (A1.141.1) a (A1.141.3), se reducen a las dadas en (A1.94)\*, esto es, al sumatorio de  $e_{ki}$  para un componente fijo, por lo que puede generalizarse lo siguiente:

$\beta_{ik}$
1

Tabla. A1.CXXX. Valores de  $\beta_{ik}$  con  $k \neq 65$  e  $i \neq 4$

Cuando  $k$  corresponde al subgrupo del extractante furfural se observa, en (A1.141.4), que los cuatro primeros  $\tau_{mk}$ , según el apartado anterior, son coincidentes en valor, por lo que pueden extraerse como factor común:

$$\beta_{1,61} = \tau_{1,61} (e_{11} + e_{21} + e_{31})$$

El último sumando de (A1.141.4) se anula, puesto que  $e_{61,1}$  es cero, como se apuntó anteriormente. Asimismo, se demostró en el

\* En (A1.94), se consideró un sistema en el que estaba presente un subgrupo  $k=4$ . Dado que no es caso, tales expresiones son válidas para el presente capítulo, si se elimina el sumando correspondiente a  $k=4$ , a la sazón, el último.

capítulo segundo, que la suma de los  $e_{ki}$  para un componente fijo resulta la unidad, de donde:

$$\beta_{1,61} = \tau_{1,61}$$

Lo que puede generalizarse como:

$$\beta_{ik} = \tau_{ik}$$

Para cualquier componente distinto del cuatro, (el extractante) y para k correspondiente al furfural. Por último, para  $i=4$ , se tiene:

$$(A1.142) \left\{ \begin{array}{l} \beta_{41} = e_{14}\tau_{11} + e_{24}\tau_{21} + e_{34}\tau_{31} + e_{61,4}\tau_{61,1} \quad (1) \\ \beta_{42} = e_{14}\tau_{12} + e_{24}\tau_{22} + e_{34}\tau_{32} + e_{61,4}\tau_{61,2} \quad (2) \\ \beta_{43} = e_{14}\tau_{13} + e_{24}\tau_{23} + e_{34}\tau_{33} + e_{61,4}\tau_{61,3} \quad (3) \\ \beta_{4,61} = e_{14}\tau_{1,61} + e_{24}\tau_{2,61} + e_{34}\tau_{3,61} + e_{61,4}\tau_{61,61} \quad (4) \end{array} \right.$$

En la expresión (A1.142), en todas las ecuaciones los tres primeros sumandos multiplican por  $e_{ki}$  nulos, mientras que  $e_{61,4}$  supone la unidad, luego (A1.142) se reduce a lo que sigue:

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta_{41} = \tau_{61,1} \quad (1) \\ \beta_{42} = \tau_{61,2} \quad (2) \\ \beta_{43} = \tau_{61,3} \quad (3) \\ \beta_{4,61} = \tau_{61,61} = 1 \quad (4) \end{array} \right.$$

En definitiva, se tiene:

Nº Equilibrio	$\beta_{1,61} = \beta_{2,61} = \beta_{3,61}$	$\beta_{4,1} = \beta_{4,2} = \beta_{4,3}$
1	0,292	1,092
2	0,419	1,064
3	0,354	1,077
4	0,313	1,086
5	0,292	1,092
6	0,292	1,092

Tabla. A1.CXXXI. Valor de las  $\beta_{ik}$

La cuarta expresión de la última llave produce:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

$\beta_{4,61}$
1

Tabla. A1.CXXXII. Valores de  $\beta_{ik}$

El razonamiento del presente apartado, que ha permitido tabular los datos de las  $\beta_{ik}$  ha requerido datos de las tablas A1.CXXVII a A1.CXXIX.

### A1.C4.6.6. Cálculo de $\theta_k$

Se parte de la ecuación (A1.86.8) y, puesto que ésta sólo va en los subgrupos k, se tendrán cuatro ecuaciones:

$$(A1.143) \left\{ \begin{array}{l} \theta_k = \frac{\sum_i x_i q_i e_{ki}}{\sum_j x_j q_j} \quad (A1.86.8) \\ \theta_1 = \frac{x_1 q_1 e_{11} + x_2 q_2 e_{12} + x_3 q_3 e_{13} + x_4 q_4 e_{14}}{x_1 q_1 + x_2 q_2 + x_3 q_3 + x_4 q_4} \quad (1) \\ \theta_2 = \frac{x_1 q_1 e_{21} + x_2 q_2 e_{22} + x_3 q_3 e_{23} + x_4 q_4 e_{24}}{x_1 q_1 + x_2 q_2 + x_3 q_3 + x_4 q_4} \quad (2) \\ \theta_3 = \frac{x_1 q_1 e_{31} + x_2 q_2 e_{32} + x_3 q_3 e_{33} + x_4 q_4 e_{34}}{x_1 q_1 + x_2 q_2 + x_3 q_3 + x_4 q_4} \quad (3) \\ \theta_{61} = \frac{x_1 q_1 e_{61,1} + x_2 q_2 e_{61,2} + x_3 q_3 e_{61,3} + x_4 q_4 e_{61,4}}{x_1 q_1 + x_2 q_2 + x_3 q_3 + x_4 q_4} \quad (4) \end{array} \right.$$

Para la obtención de los  $\theta_k$ , se aplica (A1.143) sobre los datos consignados en las tablas A1.CXV y A1.CXXVI a A1.CXXVII. Se obtiene:

Nº Equilibrio	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_{61}$
1	0,106	0,641	0,253	0,000
2	0,160	0,053	0,065	0,722
3	0,134	0,330	0,154	0,382
4	0,521	0,177	0,215	0,087
5	0,104	0,641	0,256	0,000
6	0,094	0,643	0,263	0,000

Tabla. A1.CXXXIII. Cálculo de  $\theta_k$

#### A1.C4.6.7. Cálculo de $s_k$

Atendiendo a la ecuación (A1.86.9), se desarrolla:

$$(A1.144) \left\{ \begin{array}{l} s_k = \sum_m \theta_m \tau_{mk} \quad (A1.96) \\ s_1 = \theta_1 \tau_{11} + \theta_2 \tau_{21} + \theta_3 \tau_{31} + \theta_{61} \tau_{61,1} \quad (1) \\ s_2 = \theta_1 \tau_{12} + \theta_2 \tau_{22} + \theta_3 \tau_{32} + \theta_{61} \tau_{61,2} \quad (2) \\ s_3 = \theta_1 \tau_{13} + \theta_2 \tau_{23} + \theta_3 \tau_{33} + \theta_{61} \tau_{61,3} \quad (3) \\ s_{61} = \theta_1 \tau_{1,61} + \theta_2 \tau_{2,61} + \theta_3 \tau_{3,61} + \theta_{61} \tau_{61,61} \quad (4) \end{array} \right.$$

Aplicando (A1.144) a los datos consignados en las tablas A1.CXXVIII a A1.CXXIX y A1.CXXXIII, se obtiene:

Nº Equilibrio	$s_1$	$s_2$	$s_3$	$s_{61}$
1	1,000	1,000	1,000	0,292
2	1,046	1,046	1,046	0,839
3	1,029	1,029	1,029	0,601
4	1,008	1,008	1,008	0,373
5	1,000	1,000	1,000	0,292
6	1,000	1,000	1,000	0,292

Tabla. A1.CXXXIV. Cálculo de  $s_k$

#### A1.C4.6.8. Cálculo de $J_i$

La ecuación (A1.86.3) proporciona el valor de  $J_i$ . Al desarrollar para los cuatro componentes involucrados en el sistema descrito en el presente capítulo, se tienen las ecuaciones dadas por (A1.97), que continúan siendo válidas, (hasta el cuarto componente).

Por aplicación de dichas ecuaciones a los datos consignados en las tablas A1.CXV y A1.CXXV, se calcula:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Nº Equilibrio	J <sub>1</sub>	J <sub>2</sub>	J <sub>3</sub>	J <sub>4</sub>
1	1,159	0,964	1,158	1,361
2	0,911	0,757	0,910	1,070
3	1,033	0,859	1,033	1,214
4	1,044	0,868	1,044	1,227
5	1,161	0,965	1,160	1,364
6	1,167	0,971	1,167	1,371

Tabla. A1.CXXXV. Cálculo de J<sub>i</sub>

### A1.C4.6.9. Cálculo de L<sub>i</sub>

La ecuación (A1.86.4) proporciona el valor de L<sub>i</sub>. Al desarrollar para los cuatro componentes involucrados en el sistema descrito en el presente capítulo, se tienen las ecuaciones dadas por (A1.98), que continúan siendo válidas, (hasta el cuarto componente).

Por aplicación de dichas ecuaciones a los datos consignados en las tablas A1.CXV y A1.CXXVI, se calcula:

Nº Equilibrio	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>
1	1,306	0,930	1,303	1,502
2	0,936	0,667	0,934	1,077
3	1,110	0,791	1,108	1,277
4	1,091	0,777	1,089	1,256
5	1,310	0,933	1,307	1,507
6	1,324	0,943	1,321	1,523

Tabla. A1.CXXXVI. Cálculo de L<sub>i</sub>

### A1.C4.6.10. Cálculo del coeficiente de actividad combinatorio

El coeficiente de actividad combinatorio se calcula, para cada especie, según la expresión (A1.85.1). Su desarrollo produce las ecuaciones mostradas en (A1.99), que continúan siendo válidas, (hasta el cuarto componente).

Por aplicación de tales ecuaciones a los datos consignados en las tablas A1.CXXVI y A1.CXXXV a A1.CXXXVI, se obtiene:

Nº Equilibrio	$\ln\gamma_1^C$	$\ln\gamma_2^C$	$\ln\gamma_3^C$	$\ln\gamma_4^C$
1	0,129	0,000	0,007	0,007
2	0,016	0,063	0,027	0,025
3	0,043	0,029	0,007	0,006
4	0,012	0,082	0,038	0,036
5	0,012	0,083	0,038	0,037
6	0,125	0,000	0,006	0,006

Tabla. A1.CXXXVII. Cálculo del coeficiente de actividad combinatorio

### A1.C4.6.11. Cálculo del coeficiente de actividad residual

La evaluación del coeficiente de actividad residual requiere el desarrollo de la ecuación (A1.85.2). En esta ocasión no pueden efectuarse las simplificaciones del capítulo segundo en todos los casos, por lo que el desarrollo de la expresión para el coeficiente de actividad residual produce:

$$\ln\gamma_1^R = q_1 \left[ 1 - \left[ \left( \theta_1 \frac{\beta_{11}}{s_1} - e_{11} \ln \frac{\beta_{11}}{s_1} \right) + \left( \theta_2 \frac{\beta_{12}}{s_2} - e_{21} \ln \frac{\beta_{12}}{s_2} \right) + \left( \theta_3 \frac{\beta_{13}}{s_3} - e_{31} \ln \frac{\beta_{13}}{s_3} \right) + \left( \theta_{61} \frac{\beta_{1,61}}{s_{61}} - e_{61,1} \ln \frac{\beta_{1,61}}{s_{61}} \right) \right] \right] \quad (A1.145)$$

$$\ln\gamma_2^R = q_2 \left[ 1 - \left[ \left( \theta_1 \frac{\beta_{21}}{s_1} - e_{12} \ln \frac{\beta_{21}}{s_1} \right) + \left( \theta_2 \frac{\beta_{22}}{s_2} - e_{22} \ln \frac{\beta_{22}}{s_2} \right) + \left( \theta_3 \frac{\beta_{23}}{s_3} - e_{32} \ln \frac{\beta_{23}}{s_3} \right) + \left( \theta_{61} \frac{\beta_{2,61}}{s_{61}} - e_{61,2} \ln \frac{\beta_{2,61}}{s_{61}} \right) \right] \right] \quad (A1.146)$$

$$\ln\gamma_3^R = q_3 \left[ 1 - \left[ \left( \theta_1 \frac{\beta_{31}}{s_1} - e_{13} \ln \frac{\beta_{31}}{s_1} \right) + \left( \theta_2 \frac{\beta_{32}}{s_2} - e_{23} \ln \frac{\beta_{32}}{s_2} \right) + \left( \theta_3 \frac{\beta_{33}}{s_3} - e_{33} \ln \frac{\beta_{33}}{s_3} \right) + \left( \theta_{61} \frac{\beta_{3,61}}{s_{61}} - e_{61,3} \ln \frac{\beta_{3,61}}{s_{61}} \right) \right] \right] \quad (A1.147)$$

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

$$\ln \gamma_4^R = q_4 \left[ 1 - \left[ \left( \theta_1 \frac{\beta_{41}}{s_1} - e_{14} \ln \frac{\beta_{41}}{s_1} \right) + \left( \theta_2 \frac{\beta_{42}}{s_2} - e_{24} \ln \frac{\beta_{42}}{s_2} \right) + \left( \theta_3 \frac{\beta_{43}}{s_3} - e_{34} \ln \frac{\beta_{43}}{s_3} \right) + \left( \theta_{61} \frac{\beta_{4,61}}{s_{61}} - e_{61,4} \ln \frac{\beta_{4,61}}{s_{61}} \right) \right] \right] \quad (A1.148)$$

Aplicando (A1.145) a (A1.148) a los  $q_i$  listados en la Tabla A1.CXXVI, los  $\theta_k$  mostrados en la Tabla A1.CXXXIII, las  $\beta_{ik}$  consignadas en las tablas A1.CXXX a A1.CXXXII, los  $s_k$  tabulados en A1.CXXXIV y los  $e_{ki}$  dados en la Tabla A1.CXXVII, se obtiene:

Nº Equilibrio	$\ln \gamma_1^R$	$\ln \gamma_2^R$	$\ln \gamma_3^R$	$\ln \gamma_4^R$
1	0,000	0,000	0,000	2,828
2	0,708	0,505	0,707	0,080
3	0,314	0,224	0,313	0,564
4	0,029	0,020	0,029	1,907
5	0,000	0,000	0,000	2,828
6	0,000	0,000	0,000	2,827

Tabla. A1.CXXXVIII. Cálculo del coeficiente de actividad residual

### A1.C4.6.12. Cálculo del coeficiente de actividad

Conocidos los coeficientes de actividad combinatorio y residual, aplicando exponenciales en la expresión (A1.84) y despejando convenientemente se obtiene (A1.101), que continúa siendo de aplicación. Introduciendo en tal expresión los datos de las tablas A1.CXXXVII a A1.CXXXVIII, se obtiene:

Nº Equilibrio	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$	$\gamma_4$
1	1,064	1,004	1,062	17,012
2	2,030	1,706	2,026	1,081
3	1,406	1,271	1,403	1,750
4	1,039	1,062	1,038	6,603
5	1,066	1,004	1,064	17,024
6	1,072	1,003	1,070	17,074

Tabla. A1.CXXXIX. Primer cálculo de coeficientes de actividad

### **A1.C4.7. Cálculo de la presión de saturación (2)**

En la sección A1.C4.5, se obtuvo un primer valor de presión de saturación por componente, por aplicación de la ecuación de *Antoine*. En este caso, se recalcularán dichas presiones a través de expresiones deducidas directamente de la ecuación del criterio fundamental del equilibrio termodinámico. Esta primera afinación, permitirá incluir los coeficientes de actividad recién estimados. Serán de aplicación las ecuaciones (A1.106) a (A1.111) reformuladas como sigue para un sistema de cuatro componentes:

$$P_1^0 = \frac{P}{\frac{\gamma_1 x_1}{\Phi_1} + \frac{\gamma_2 x_2 P_2^0}{\Phi_2 P_1^0} + \frac{\gamma_3 x_3 P_3^0}{\Phi_3 P_1^0} + \frac{\gamma_4 x_4 P_4^0}{\Phi_4 P_1^0}} \quad (A1.149)$$

$$P_2^0 = \frac{P}{\frac{\gamma_1 x_1 P_1^0}{\Phi_1 P_2^0} + \frac{\gamma_2 x_2}{\Phi_2} + \frac{\gamma_3 x_3 P_3^0}{\Phi_3 P_2^0} + \frac{\gamma_4 x_4 P_4^0}{\Phi_4 P_2^0}} \quad (A1.150)$$

$$P_3^0 = \frac{P}{\frac{\gamma_1 x_1 P_1^0}{\Phi_1 P_3^0} + \frac{\gamma_2 x_2 P_2^0}{\Phi_2 P_3^0} + \frac{\gamma_3 x_3}{\Phi_3} + \frac{\gamma_4 x_4 P_4^0}{\Phi_4 P_3^0}} \quad (A1.151)$$

$$P_4^0 = \frac{P}{\frac{\gamma_1 x_1 P_1^0}{\Phi_1 P_4^0} + \frac{\gamma_2 x_2 P_2^0}{\Phi_2 P_4^0} + \frac{\gamma_3 x_3 P_3^0}{\Phi_3 P_4^0} + \frac{\gamma_4 x_4}{\Phi_4}} \quad (A1.152)$$

Tales expresiones se aplican a la presión de trabajo dada en la sección A1.C4.2, los coeficientes de actividad recién dilucidados, Tabla A1.CXXXIX, las composiciones de fase líquida dadas en la Tabla A1.CXV y las presiones de saturación más actuales, consignadas en la Tabla A1.CXXIV. Fijando los  $\Phi_i$  a la unidad, suponiendo idealidad del sistema, se obtiene:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Nº Equilibrio	P <sub>1</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>2</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>3</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>4</sub> <sup>0</sup> (atm)
1	2,083	1,958	1,468	0,001
2	3,581	3,480	2,943	0,053
3	2,332	2,234	1,791	0,008
4	2,550	2,414	1,857	0,002
5	2,088	1,962	1,471	0,001
6	2,100	1,974	1,480	0,001

Tabla. A1.CXL. Cálculo de presiones de saturación, según el criterio fundamental del equilibrio

### **A1.C4.8. Cálculos de temperatura y coef. de actividad (2)**

A partir de las presiones de saturación de cada componente en el equilibrio, es posible recalcular la temperatura del mismo aplicando la ecuación (A1.112) y promediando las temperaturas de cada componente en el equilibrio. Los datos requeridos vienen dados por las tablas A1.CXVIII y A1.CXL, esto es, los coeficientes de *Antoine* y las presiones de saturación más recientes, respectivamente. Se obtiene:

Nº Equilibrio	T <sub>1</sub> <sup>0</sup> (K)	T <sub>2</sub> <sup>0</sup> (K)	T <sub>3</sub> <sup>0</sup> (K)	T <sub>4</sub> <sup>0</sup> (K)	T <sub>2</sub> (K)
1	287,336	287,343	287,365	287,648	287,423
2	304,882	305,781	308,933	351,669	317,816
3	290,797	291,343	293,174	317,736	298,263
4	293,617	293,767	294,259	300,608	295,563
5	287,403	287,409	287,431	287,706	287,487
6	287,581	287,587	287,606	287,851	287,657

Tabla. A1.CXLI. Segundo cálculo de T de equilibrio

Con la temperatura recién recalculada\*, debe reiterarse el cálculo de los coeficientes de actividad, operación que ya en el capítulo segundo se vinculó a la actualización de la temperatura.

Deben por tanto rehacerse los cálculos presentados en los apartados A1.C4.6.1 a A1.C4.6.12. Los resultados correspondientes

\* La ecuación (A1.112) es de aplicación para los compuestos de 1 a 3. También lo es para el extractante furfural introduciendo la presión en bar.

a los tres primeros apartados permanecen invariantes, dado que son independientes de la temperatura. En el apartado A1.C4.6.4, donde se piden datos de temperatura de la Tabla A1.CXXIII, (correspondiente a la primera temperatura calculada), se sustituyen por los de la Tablas A1.CXLI, esto es, las temperaturas recién recalculadas, y se opera de la misma forma, para obtener una segunda batería de coeficientes de actividad vinculados a la segunda temperatura calculada del equilibrio:

Nº Equilibrio	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$	$\gamma_4$
1	1,064	1,004	1,062	17,081
2	2,312	1,871	2,307	1,088
3	1,465	1,309	1,463	1,812
4	1,040	1,063	1,039	6,938
5	1,066	1,004	1,064	17,091
6	1,072	1,003	1,070	17,134

Tabla. A1.CXLII. Segundo cálculo de coeficientes de actividad

### **A1.C4.9. Cálculo de la presión de saturación (3)**

La nueva temperatura del equilibrio permite actualizar, así como los coeficientes de actividad, las presiones de saturación por aplicación de las ecuaciones (A1.90) y (A1.127.1), según convenga, a los parámetros de *Antoine* listados en la Tabla A1.CXVIII y las temperaturas obtenidas en la sección anterior. Así, se obtiene:

Nº Equilibrio	$P_1^0$ (atm)	$P_2^0$ (atm)	$P_3^0$ (atm)	$P_4^0$ (atm)
1	2,089	1,963	1,471	0,001
2	5,115	4,864	3,800	0,008
3	2,944	2,779	2,116	0,002
4	2,710	2,555	1,938	0,002
5	2,094	1,967	1,474	0,001
6	2,105	1,978	1,483	0,001

Tabla. A1.CXLIII. Cálculo de presiones de saturación, conocida T

### **A1.C4.10. Cálculo de la composición de vapor**

Con la temperatura del equilibrio y las presiones de saturación actualizadas, pueden determinarse las composiciones de los componentes en el vapor. Para ello, se aplica la ecuación (A1.113), (hasta el cuarto componente) a los datos consignados en las tablas A1.CXLII, A1.CXV, A1.CXLIII y la presión consignada en la sección A1.C4.2. Tomando los  $\Phi_i$  como la unidad, suponiendo idealidad del sistema, se obtiene:

Nº Equilibrio	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$
1	0,186	0,802	0,015	0,000
2	0,000	0,511	0,952	0,003
3	0,199	0,911	0,166	0,001
4	0,000	0,439	0,612	0,000
5	0,173	0,812	0,018	0,000
6	0,135	0,843	0,024	0,000

Tabla. A1.CXLIV. Cálculo de composiciones de fase vapor

### **A1.C4.11. Cálculo de los $\Phi_i$**

Cuando son conocidas las composiciones de vapor, se ha determinado, junto con la temperatura, las variables perseguidas concordantes con la composición de la fase líquida y presión introducidas. Hasta el momento se ha determinado el valor de los coeficientes de actividad, lo que supone una caracterización de la medida en que la fase líquida se aleja de la idealidad. Resta encontrar el valor de los coeficientes de fugacidad que efectuarán lo propio con la fase vapor, y permitirán recalculer tanto la temperatura de los equilibrios como las composiciones de vapor, hasta la convergencia. Como procede con las variables mostradas, cada vez que se recalculen los coeficientes de fugacidad, se obtendrá una nueva composición de vapor y temperatura de equilibrio hasta lograr tal convergencia.

La sección actual se dividirá en varios apartados donde se calcularán las distintas variables de que dependen los  $\Phi_i$ .

### A1.C4.11.1. Cálculo de temperaturas reducidas puras y cruzadas

La temperatura reducida cruzada se definió junto con las reglas de combinación de *Prausnitz* en el capítulo primero. Ésta adopta la expresión (A1.81.6). Para la temperatura reducida pura, se indicó también la validez de la anterior, siempre que se hicieran coincidir los subíndices, lo que se mostró previamente en (A1.114).

Como se mostró en el apartado A1.C4.3.5, se tienen 6 interacciones “*ij*”, que dan lugar a otras tantas temperaturas reducidas cruzadas. También se tienen cuatro temperaturas reducidas puras, (una por componente). Aplicando (A1.81.6) y (A1.114) al último dato de temperatura disponible, dado por la Tabla A1.CXLI, y a las temperaturas críticas y críticas cruzadas dadas por las tablas A1.CXIX y A1.CXXI, se obtiene:

Nº Equilibrio	$T_{r1}$	$T_{r2}$	$T_{r3}$	$T_{r4}$
1	0,685	0,676	0,660	0,429
2	0,757	0,748	0,730	0,474
3	0,711	0,702	0,685	0,445
4	0,704	0,695	0,679	0,441
5	0,685	0,676	0,660	0,429
6	0,686	0,677	0,660	0,429

Tabla. A1.CXLV. Temperaturas reducidas puras

Nº Equilibrio	$T_{r12}$	$T_{r13}$	$T_{r14}$	$T_{r23}$	$T_{r24}$	$T_{r34}$
1	0,681	0,672	0,542	0,668	0,539	0,532
2	0,753	0,743	0,599	0,739	0,596	0,588
3	0,706	0,698	0,562	0,693	0,559	0,552
4	0,700	0,691	0,557	0,687	0,554	0,547
5	0,681	0,672	0,542	0,668	0,539	0,532
6	0,681	0,673	0,542	0,669	0,539	0,532

Tabla. A1.CXLVI. Temperaturas reducidas cruzadas

### A1.C4.11.2. Cálculo de coeficientes viriales puros y cruzados

Los coeficientes viriales segundos,  $B$ , se determinan aplicando (A1.80). Esta ecuación es válida tanto para coeficientes viriales cruzados como para los puros, cuando se hacen coincidir los subíndices, como queda mostrado en la expresión (A1.115)

Como en el apartado anterior, existen tantos coeficientes viriales cruzados como interacciones entre pares de moléculas: 6 coeficientes. También se calculan cuatro coeficientes viriales puros, uno por componente.

Aplicando (A1.115) a  $R$ , cuyo valor se fijó en el apartado A1.C4.3.4, y los datos dados en las tablas A1.CXIX y A1.CXXI y las tablas A1.CXLV a A1.CXLVI, se obtienen, en unidades de L/mol, los siguientes coeficientes:

Nº Equilibrio	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$
1	-0,713	-0,696	-0,783	-3,658
2	-0,566	-0,552	-0,619	-2,668
3	-0,654	-0,639	-0,717	-3,251
4	-0,668	-0,652	-0,733	-3,346
5	-0,712	-0,696	-0,782	-3,655
6	-0,711	-0,695	-0,781	-3,648

Tabla. A1.CXLVII. Coeficientes viriales puros

Nº Equilibrio	$B_{12}$	$B_{13}$	$B_{14}$	$B_{23}$	$B_{24}$	$B_{34}$
1	-0,705	-0,746	-1,502	-0,739	-1,495	-1,592
2	-0,559	-0,591	-1,149	-0,585	-1,142	-1,213
3	-0,647	-0,684	-1,359	-0,677	-1,352	-1,438
4	-0,661	-0,699	-1,393	-0,692	-1,386	-1,474
5	-0,704	-0,745	-1,501	-0,738	-1,494	-1,591
6	-0,704	-0,744	-1,499	-0,737	-1,492	-1,588

Tabla. A1.CXLVIII. Coeficientes viriales cruzados

### A1.C4.11.3. Cálculo de coeficientes delta puros y cruzados

Los coeficientes delta cruzados se obtienen por combinación lineal de los coeficientes viriales segundos como se indicaba en (A1.77.2). Por aplicación de esta ecuación a los datos de las tablas A1.CXLVII a A1.CXLVIII, se obtienen los 6 coeficientes delta cruzados, en las mismas unidades que los coeficientes viriales segundos, correspondientes a las interacciones de pares de moléculas:

Nº Equilibrio	$\delta_{12} \cdot 10^3$	$\delta_{13} \cdot 10^3$	$\delta_{14}$	$\delta_{23} \cdot 10^3$	$\delta_{24}$	$\delta_{34}$
1	-0,946	3,875	1,366	1,801	1,364	1,257
2	-0,745	2,860	0,935	1,306	0,935	0,860
3	-0,866	3,459	1,187	1,597	1,186	1,092
4	-0,885	3,557	1,228	1,644	1,227	1,130
5	-0,946	3,872	1,365	1,800	1,363	1,256
6	-0,944	3,865	1,362	1,796	1,360	1,253

Tabla. A1.CXLIX. Coeficientes delta cruzados

### A1.C4.11.4. Cálculo de volúmenes de líquido saturado

Los volúmenes de líquido saturado se estiman mediante la ecuación de *Rackett*, propuesta en la expresión (A1.82). Los datos requeridos se toman de las tablas A1.CXIX y A1.CXLV y los resultados se listan en la siguiente tabla:

Nº Equilibrio	$V_1^L$	$V_2^L$	$V_3^L$	$V_4^L$
1	0,095	0,086	0,090	0,079
2	0,102	0,091	0,096	0,081
3	0,098	0,087	0,092	0,080
4	0,097	0,087	0,091	0,079
5	0,095	0,086	0,090	0,079
6	0,095	0,086	0,090	0,079

Tabla. A1.CL. Volúmenes de líquido saturado

Los volúmenes están dados en L/mol, al igual que los volúmenes críticos.

### A1.C4.11.5. Cálculo de $\Phi_i$

Atendiendo a la expresión (A1.118), para un sistema de cuatro componentes, los  $\Phi_i$  se escriben como sigue:

$$\Phi_1 = e^{\frac{(P - P_1^0)(B_1 - V_1^L) + P[y_2^2\delta_{12} + y_3^2\delta_{13} + y_4^2\delta_{14} + y_2y_3(\delta_{12} + \delta_{13} - \delta_{23}) + y_2y_4(\delta_{12} + \delta_{14} - \delta_{24}) + y_3y_4(\delta_{13} + \delta_{14} - \delta_{34})]}{RT}} \quad (A1.153)$$

$$\Phi_2 = e^{\frac{(P - P_2^0)(B_2 - V_2^L) + P[y_1^2\delta_{12} + y_3^2\delta_{23} + y_4^2\delta_{24} + y_1y_3(\delta_{12} + \delta_{23} - \delta_{13}) + y_1y_4(\delta_{12} + \delta_{24} - \delta_{14}) + y_3y_4(\delta_{23} + \delta_{24} - \delta_{34})]}{RT}} \quad (A1.154)$$

$$\Phi_3 = e^{\frac{(P - P_3^0)(B_3 - V_3^L) + P[y_1^2\delta_{13} + y_2^2\delta_{23} + y_4^2\delta_{34} + y_1y_2(\delta_{13} + \delta_{23} - \delta_{12}) + y_1y_4(\delta_{13} + \delta_{34} - \delta_{14}) + y_2y_4(\delta_{23} + \delta_{34} - \delta_{24})]}{RT}} \quad (A1.155)$$

$$\Phi_4 = e^{\frac{(P - P_4^0)(B_4 - V_4^L) + P[y_1^2\delta_{14} + y_2^2\delta_{24} + y_3^2\delta_{34} + y_1y_2(\delta_{14} + \delta_{24} - \delta_{12}) + y_1y_3(\delta_{14} + \delta_{34} - \delta_{13}) + y_2y_3(\delta_{24} + \delta_{34} - \delta_{23})]}{RT}} \quad (A1.156)$$

La aplicación de éstas a la presión de trabajo, dada en la sección A1.C4.2, las últimas presiones de saturación de los componentes, listadas en la Tabla A1.CXLIII, los coeficientes viriales segundos puros, dados en la Tabla A1.CXLVII, los volúmenes de líquido saturado tabulados en A1.CL, las composiciones de vapor consignadas en la Tabla A1.CXLIV, los coeficientes delta cruzados presentados en la Tabla A1.CXLIX, y la última temperatura de equilibrio en A1.CXLI, conocido R; se obtiene:

Nº Equilibrio	$\Phi_1$	$\Phi_2$	$\Phi_3$	$\Phi_4$
1	1,003	0,999	0,981	0,818
2	1,083	1,073	1,051	0,937
3	1,029	1,023	1,004	0,891

Nº Equilibrio	$\Phi_1$	$\Phi_2$	$\Phi_3$	$\Phi_4$
4	1,023	1,017	0,998	0,839
5	1,003	0,999	0,981	0,818
6	1,004	0,999	0,981	0,819

Tabla. A1.CLI. Cálculo de los  $\Phi_i$

### **A1.C4.12. Cálculo de la presión de saturación (4)**

Conocidos los  $\Phi_i$ , pueden actualizarse las presiones de saturación de los componentes en equilibrio, por aplicación de las ecuaciones (A1.149) a (A1.152) a los datos de presión, dada en la sección A1.C4.2, los últimos coeficientes de actividad listados en la Tabla A1.CXLII, las composiciones dadas en la Tabla A1.CXV, las últimas presiones de saturación calculadas, tabuladas en A1.CXLIII y los datos de la Tablas A1.CLI; se recalculan:

Nº Equilibrio	$P_1^0$ (atm)	$P_2^0$ (atm)	$P_3^0$ (atm)	$P_4^0$ (atm)
1	2,082	1,956	1,466	0,001
2	3,692	3,511	2,743	0,006
3	2,354	2,222	1,692	0,002
4	2,593	2,445	1,855	0,002
5	2,087	1,961	1,469	0,001
6	2,099	1,973	1,478	0,001

Tabla. A1.CLII. Cálculo de  $P_i^0$  conocidos los  $\Phi_i$

### **A1.C4.13. Cálculos de temperatura y coef. de actividad (3)**

De nuevo, siguiendo el esquema iterativo, una vez actualizadas las presiones de saturación, procede realizar lo propio con la temperatura del equilibrio. Para ello, se procede como en la sección A1.C4.8, empleando los datos más recientes de presiones de saturación, tomados del apartado anterior; y se obtienen los siguientes datos:

Nº Equilibrio	$T_1^0$ (K)	$T_2^0$ (K)	$T_3^0$ (K)	$T_4^0$ (K)	$T_3$ (K)
1	287,319	287,321	287,325	287,384	287,337
2	305,944	306,091	306,583	312,856	307,868
3	291,089	291,183	291,490	295,445	292,302
4	294,149	294,168	294,230	295,017	294,391
5	287,387	287,388	287,393	287,450	287,404
6	287,569	287,570	287,574	287,624	287,584

Tabla. A1.CLIII. Tercer cálculo de T de equilibrio

Como puede observarse, la dispersión de las temperaturas de saturación alrededor de la media comienza a reducirse, respecto al anterior cálculo de temperaturas, como fruto de la convergencia creciente de los datos en torno al equilibrio. Las temperaturas de saturación deben ser coincidentes, puesto que todos los componentes vaporizan a la misma temperatura en equilibrio.

Puesto que los coeficientes de actividad son dependientes de la temperatura, sus valores han de recalcularse. Para ello, se repiten los pasos dependientes de la temperatura, (cambiando a la de la Tabla A1.CLIII), dentro de la sección A1.C4.6, para la obtención del coeficiente de actividad. Con esto se obtiene un nuevo valor recalculado, tal como se indicó en la anterior sección de obtención de la temperatura del equilibrio:

Nº Equilibrio	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$	$\gamma_4$
1	1,064	1,004	1,062	17,096
2	2,351	1,894	2,346	1,089
3	1,475	1,315	1,472	1,820
4	1,040	1,063	1,039	6,980
5	1,066	1,004	1,064	17,104
6	1,072	1,003	1,070	17,146

Tabla. A1.CLIV. Tercer cálculo de coeficientes de actividad

Seguidamente, procedería obtener la presión de saturación, para la nueva temperatura de equilibrio, como se practicó en la sección A1.C4.9, de forma que se ha cerrado el ciclo, puesto que al volver sobre uno de los pasos, estos deberán repetirse tantas veces como se precise, hasta que la convergencia obtenida sea satisfactoria. Desde A1.C3.9 hasta A1.C3.13, se reiterará lo descrito en cada una de tales secciones, a los datos más actuales.

#### **A1.C4.14. Comprobación de la convergencia**

Se presenta en esta sección el criterio de evaluación de la convergencia, que permitirá decidir en qué punto puede concluirse el bu-

de cálculo: tras cada obtención de una nueva temperatura de equilibrio, (comenzando por la tercera, dada en la sección anterior), se planteará la verificación de la ecuación del criterio del equilibrio termodinámico. A este fin, se calcula para cada componente el valor de cada miembro de la ecuación, y se decide según la diferencia entre ambos, en términos absolutos. La primera verificación se tabula seguidamente:

Nº Equilibrio	$y_1\Phi_1P$	$x_1\gamma_1P_1^0$	$\Delta$	$y_2\Phi_2P$	$x_2\gamma_2P_2^0$	$\Delta$	$y_3\Phi_3P$	$x_3\gamma_3P_3^0$	$\Delta$
1	0,372	0,370	0,002	1,602	1,599	0,004	0,030	0,030	0,000
2	0,000	0,000	0,000	1,098	0,738	0,360	1,999	1,374	0,626
3	0,411	0,319	0,092	1,865	1,457	0,408	0,334	0,266	0,068
4	0,000	0,000	0,000	0,892	0,840	0,053	1,221	1,171	0,050
5	0,347	0,345	0,002	1,622	1,618	0,004	0,035	0,036	0,001
6	0,272	0,270	0,002	1,685	1,681	0,004	0,047	0,047	0,001

Tabla. A1.CLV. Verificación del criterio de equilibrio termodinámico

Nº Equilibrio	$y_4\Phi_4P$	$x_4\gamma_4P_4^0$	$\Delta$
1	0,000	0,000	0,000
2	0,006	0,004	0,001
3	0,001	0,001	0,000
4	0,001	0,001	0,000
5	0,000	0,000	0,000
6	0,000	0,000	0,000

Tabla. A1.CLV.bis. Verificación del criterio de equilibrio termodinámico

Donde se han tomado las composiciones de vapor de la sección A1.C4.10, los  $\Phi_i$  de la sección A1.C4.11, la presión de A1.C4.2, la composición de fase líquida de A1.C4.1, los coeficientes de actividad de la sección A1.C4.8 y las presiones de saturación de A1.C4.12. Cada vez que se reiteran los cálculos de A1.C4.13, se verifica el criterio fundamental del equilibrio termodinámico, con los datos actualizados.

### **A1.C4.15. Datos de equilibrio**

Cuando se reitera el cálculo en dieciséis ocasiones, se obtienen errores inferiores al octavo decimal. Los datos finales de equilibrio, tomados de la decimosexta iteración, se tabulan para cerrar el capítulo:

Nº Equilibrio	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$T_{18}$ (K)
1	0,184	0,800	0,015	0,000	287,313
2	0,000	0,347	0,652	0,001	304,733
3	0,156	0,712	0,131	0,000	290,464
4	0,000	0,413	0,586	0,000	294,100
5	0,172	0,810	0,018	0,000	287,381
6	0,135	0,841	0,024	0,000	287,564

Tabla. A1.CLVI. Composiciones de la fase vapor en equilibrio

Donde las composiciones de vapor de la Tabla A1.CLVI se encuentran en equilibrio, a la temperatura listada en la misma tabla, con las de líquido en la Tabla A1.CXV, a la presión recogida en la sección A1.C4.2.

### **Capítulo A1.C5. Equilibrio de fases para “MÚLTIPLE”**

En este quinto capítulo del anexo de datos termodinámicos, se procurarán las composiciones de equilibrio a las condiciones requeridas en la operación “MÚLTIPLE”. Dado que en el anexo de diseño de unidades se explicitará la idiosincrasia de dicha operación, en este capítulo únicamente se desarrollarán al caso correspondiente, las expresiones obtenidas en el capítulo primero.

La generación de datos de equilibrio es un proceso cíclico donde, en función de datos conocidos, se reiteran los cálculos tanto como sea preciso para lograr una convergencia en el criterio fundamental del equilibrio termodinámico. El procedimiento se ha mostrado en la Figura A1.1 en el capítulo segundo.

Se tiene una iteración en doble bucle, primero para los coeficientes de actividad y luego para la composición del vapor, como se explicó en el mismo capítulo.

El objetivo del capítulo presente estriba en desarrollar y particularizar el ciclo dado en la Figura A1.1. A este fin, se establecerán tantas secciones como pasos requiere el procedimiento.

#### **A1.C5.1. Introducción de la composición de la fase líquida**

La operación “MÚLTIPLE” constituye el cuarto proceso del tren de separación; su alimentación es el vapor de la operación precedente cuya composición se refiere en la siguiente tabla:

$(x_E)_1$	$(x_E)_2$	$(x_E)_3$
0,167	0,814	0,019
<b>Composición molar de la alimentación</b>		

Tabla. A1.CLVII. Composición de la corriente E, alimentación de “MÚLTIPLE”

Donde los componentes son los que se enumeran seguidamente:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

1. 1-Buteno ( $C_4H_8$ ).
2. 1,3-Butadieno ( $C_4H_6$ ).
3. Cis-2-buteno ( $C_4H_8$ ).

La ordenación de los componentes, como en el capítulo precedente, se ha practicado por orden creciente de volatilidad.

La operación de "MÚLTIPLE", es, eliminado el extractante, una destilación de múltiples componentes y como tal consiste en vaporizar un líquido en múltiples etapas de equilibrio: las corrientes de líquido y vapor emanadas de cada etapa forman un equilibrio, por lo que deberán introducirse una serie de composiciones necesarias para el diseño de la operación: composición del destilado, de la alimentación de "MÚLTIPLE", del residuo y otras composiciones, de cuya aplicación se procurará cumplida justificación en el anexo de diseño de unidades.

De acuerdo con lo anterior, se introducirán los siguientes valores de composición de fase líquida:

Nº Equilibrio	$x_1$	$x_2$	$x_3$
1	0,170	0,830	0,000
2	0,000	0,021	0,979
3	0,167	0,814	0,019
4	0,000	0,029	0,971
5	0,140	0,850	0,010
6	0,170	0,830	0,000

Tabla. A1.CLVIII. Lista de composiciones de fase líquida

Los componentes más volátiles vaporizarán selectivamente, por lo que es de esperar un líquido, menos concentrado en tales componentes. De la misma forma, los compuestos más pesados, (o menos volátiles), enriquecerán preferentemente el líquido. Los equilibrios 1, 2 y 3 corresponden a las composiciones del destilado, el residuo y la alimentación a "MÚLTIPLE", respectivamente. El equilibrio 4 corresponde, a las composiciones del líquido del último plato de columna,

que debe vaporizarse para su devolución a ésta. Por último, los equilibrios 5 y 6 permiten obtener, conocida la composición del destilado, la temperatura del vapor procedente del primer plato de columna que, parcialmente, se retorna a columna como reflujo, previa condensación total. Para los propósitos del presente anexo de cálculo de datos de equilibrio, es suficiente la explicación dada. Como se mencionó anteriormente, será en el anexo de diseño de unidades donde se amplíe convenientemente la justificación de la elección de estos datos de partida.

### **A1.C5.2. Introducción de la presión de equilibrio**

La presión se introduce como dato considerando la temperatura del equilibrio que generará. Una presión elevada aumenta la temperatura de los equilibrios, puesto que se fuerza a los componentes a permanecer en fase líquida a una misma temperatura de referencia.

La presión baja incrementa la volatilidad del sistema, por lo que disminuye la temperatura del equilibrio y favorece la separación, (lo que se traduce en menor número de platos).

La idiosincrasia del sistema en juego obliga a obtener una solución de compromiso: De un lado, un defecto de presión, pese a reducir el número de etapas de separación requeridas, disminuye la temperatura hasta límites no operativos, (en torno 0 °C). Por otro lado, un exceso de presión aumenta el número de etapas hasta límites no asumibles económicamente.

De esta forma, la solución intermedia se establecerá en base a la temperatura del equilibrio: aquella presión que garantice una temperatura similar a la ambiente será tomada como la presión del sistema como criterio optimizador.

La vía para averiguar el extremo antedicho, consiste en la ecuación de *Antoine*. Se prueba con una presión, (atmosférica para comenzar), y se obtiene la temperatura de saturación de los compo-

mentos, despejando convenientemente de la ecuación, (se mostrarán en subsiguientes secciones los usos de la ecuación de *Antoine*). Al promediar cada una de las temperaturas de saturación se obtiene una temperatura del equilibrio, (que no coincidirá con la final puesto que se trata de la primera de varias iteraciones, si bien proporciona una aproximación razonable).

Tras varias pruebas, se llega a la conclusión de que una presión de 2 atm concuerda con una temperatura de los equilibrios próxima a la ambiental, como se mostrará en próximas tablas. Por tanto, la elección de la presión queda fijada en:

$$P = 2 \text{ atm}$$

### **A1.C5.3. Introducción de datos**

Los datos que requerirá la generación de composiciones de equilibrio son los que se enumeran seguidamente:

- Parámetros *UNIFAC*
  - o Parámetros de subgrupo,  $R_k$  y  $Q_k$ .
  - o Número de subgrupos,  $\nu_k^{(i)}$ .
  - o Parámetros de interacción,  $a_{mk}$ .
- Coeficientes de *Antoine*,  $A_i$ ,  $B_i$  y  $C_i$ .
- Propiedades críticas
  - o Temperatura crítica,  $T_{ci}$ .
  - o Presión crítica,  $P_{ci}$ .
  - o Volumen crítico,  $V_{ci}$ .
  - o Factor de compresibilidad crítico,  $Z_{ci}$ .
  - o Factor acéntrico crítico,  $\omega_{ci}$ .
- Otras propiedades
  - o Peso molecular,  $PM_i$ .
  - o Temperatura normal de ebullición,  $T_i^0$  (normal).
  - o Parámetro  $k_{ij}$  de interacción, (véase capítulo anterior).
  - o Constante universal de los gases,  $R$  en (atm·L/mol·K).
- Reglas de *Prausnitz*, (véase capítulo anterior).

Tales datos junto a sus particularidades, se presentan en los siguientes apartados en forma tabular, junto a las oportunas acotaciones.

#### A1.C5.3.1. Parámetros UNIFAC

Previa consigna de los parámetros es preciso desglosar en sus subgrupos constituyentes, cada una de las moléculas de las especies del sistema en cuestión. En la figura que sigue, se presentan los componentes de la alimentación de la operación "MÚLTIPLE", por sus fórmulas desarrolladas:

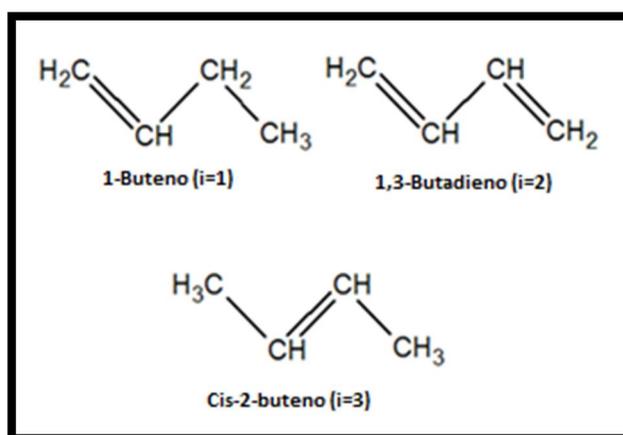


Figura. A1.5. Componentes de la alimentación E. (Elaboración propia)

De donde, atendiendo a la Tabla A1.I del capítulo primero, pueden discriminarse los siguientes subgrupos:

- 1-Buteno: Dos subgrupos  $\text{CH}_2$ , uno  $\text{CH}_3$  y uno  $\text{CH}$ .
- 1,3-Butadieno: Dos subgrupos  $\text{CH}_2$  y dos  $\text{CH}$ .
- Cis-2-buteno: Dos subgrupos  $\text{CH}_3$  y dos  $\text{CH}$ .

Dado que todos los subgrupos pertenecen al grupo principal "Alcanos", las interacciones entre los mismos se anulan, según lo dispuesto en la Tabla A1.II.

Con lo anterior, tomando los datos listados en las tablas A1.I a A1.II, se tiene:

Parámetros de subgrupo y de interacción UNIFAC						
$a_{mk} (K)$		0	i=1	i=2	i=3	
Grupo	k	$R_k$	$Q_k$	$v_k^{(1)}$	$v_k^{(2)}$	$v_k^{(3)}$
CH <sub>3</sub>	1	0,9011	0,8480	1	0	2
CH <sub>2</sub>	2	0,6744	0,5400	2	2	0
CH	3	0,4469	0,2280	1	2	2

Tabla. A1.CLIX. Parámetros de subgrupo y de interacción UNIFAC

Puesto que ningún grupo presenta interacción, se toma  $a_{mk}$  nulo para todos los casos.

#### A1.C5.3.2. Coeficientes de Antoine

Los coeficientes de *Antoine* son números adimensionales que permiten, por la ecuación del mismo autor, encontrar la presión de saturación de un vapor conocida la temperatura del equilibrio, o bien la temperatura de saturación conocida la presión del sistema. En este caso, para todos los componentes, la ecuación de *Antoine* responde a la siguiente expresión:

$$\ln P_i^0 (\text{mmHg}) = A_i - \frac{B_i}{T(\text{K}) + C_i} \quad \text{Ecuación de Antoine (A1.87)}$$

Ecuación, que despejada para el caso de la temperatura de saturación, se escribe como sigue:

$$T_i^0 (\text{K}) = \frac{B_i}{A_i - \ln P (\text{mmHg})} - C_i \quad (\text{A1.88})$$

Los coeficientes de *Antoine* se tabulan seguidamente:

Coeficientes de Antoine					
1-Buteno (i = 1) C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>		Butadieno (i = 2) C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>		Cis-2-buteno (i = 3) C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	
A <sub>1</sub>	15,7564	A <sub>2</sub>	15,7727	A <sub>3</sub>	15,8171
B <sub>1</sub>	2132,42	B <sub>2</sub>	2142,66	B <sub>3</sub>	2210,71
C <sub>1</sub>	-33,15	C <sub>2</sub>	-34,30	C <sub>3</sub>	-36,15

Tabla. A1.CLX. Coeficientes de Antoine

### A1.C5.3.3. Propiedades críticas y temperaturas de ebullición normal

Se consignan en tabla las propiedades críticas precisadas y listadas *ut supra*, así como las temperaturas de ebullición normales:

Propiedades críticas y temperaturas normales de ebullición					
T <sub>1</sub> <sup>0</sup> (K) (normal)	266,9	P <sub>c1</sub> (atm)	39,7	Z <sub>c1</sub>	0,277
T <sub>2</sub> <sup>0</sup> (K) (normal)	268,7	P <sub>c2</sub> (atm)	42,7	Z <sub>c2</sub>	0,270
T <sub>3</sub> <sup>0</sup> (K) (normal)	276,9	P <sub>c3</sub> (atm)	41,5	Z <sub>c3</sub>	0,272
T <sub>c1</sub> (K)	419,6	V <sub>c1</sub> (L/mol)	0,240	ω <sub>1</sub>	0,187
T <sub>c2</sub> (K)	425,0	V <sub>c2</sub> (L/mol)	0,221	ω <sub>2</sub>	0,195
T <sub>c3</sub> (K)	435,6	V <sub>c3</sub> (L/mol)	0,234	ω <sub>3</sub>	0,202

Tabla. A1.CLXI. Propiedades críticas y temperaturas normales de ebullición

Tales propiedades se han plasmado respetándose el número de cifras significativas con que figuran en la bibliografía\*.

### A1.C5.3.4. Otras propiedades

Los pesos moleculares de las sustancias implicadas en el equilibrio se tabulan seguidamente:

\* The properties of gases & liquids. R. C. Reid, J. M. Prausnitz, B. E. Poling. McGraw-Hill. 4<sup>a</sup> Edición.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Pesos moleculares	
PM <sub>1</sub> (g/mol)	56,108
PM <sub>2</sub> (g/mol)	54,092
PM <sub>3</sub> (g/mol)	56,108

Tabla. A1.CLXII. Pesos moleculares

El parámetro de interacción  $k_{ij}$ , será despreciado debido al similar carácter químico de las especies en equilibrio. La constante universal de los gases se tomará en el valor y unidades indicadas abajo:

$$k_{ij} = 0$$

$$R = 0,082057 \text{ atm}\cdot\text{L/mol}\cdot\text{K}$$

### A1.C5.3.5. Reglas de combinación de *Prausnitz*

La aplicación de las ecuaciones (A1.81.1) a (A1.81.5), proporciona el valor de las distintas variables cruzadas. Se considerará, además de los datos de R y  $k_{ij}$  del apartado anterior, los datos de la Tabla A1.CLXI. Se obtendrán, por el siguiente orden:  $T_{cij}$ ,  $Z_{cij}$ ,  $V_{cij}$ ,  $P_{cij}$  y  $\omega_{cij}$ . Puesto que se tienen tres componentes, las interacciones de pares serán: 1-2, 1-3 y 2-3, en total 3 interacciones, (considerando que la interacción “*ij*” es la misma que la inversa “*ji*” y que la interacción “*ii*” es la propiedad pura ya tabulada en la Tabla A1.CLXI).

Los resultados se consignan en la tabla siguiente:

Reglas de combinación de <i>Prausnitz</i>									
T <sub>c12</sub> (K)	422,2914	Z <sub>c12</sub>	0,2735	V <sub>c12</sub> (L/mol)	0,2304	P <sub>c12</sub> (atm)	41,1396	ω <sub>12</sub>	0,1910
T <sub>c13</sub> (K)	427,5252	Z <sub>c13</sub>	0,2745	V <sub>c13</sub> (L/mol)	0,2370	P <sub>c13</sub> (atm)	40,6345	ω <sub>13</sub>	0,1945
T <sub>c23</sub> (K)	430,2674	Z <sub>c23</sub>	0,2710	V <sub>c23</sub> (L/mol)	0,2274	P <sub>c23</sub> (atm)	42,0688	ω <sub>23</sub>	0,1985

Tabla. A1.CLXIII. Aplicación de las reglas de combinación de *Prausnitz*

### **A1.C5.4. Cálculos de temperatura (1)**

Conocidas las composiciones de fase líquida de cada equilibrio, así como los datos previos, puede iniciarse la secuencia de cálculo, tal como se desarrollará a partir de la presente sección.

Haciendo uso de los coeficientes de *Antoine*, listados en la Tabla A1.CLX, se obtienen las temperaturas de saturación de cada componente en el equilibrio, por aplicación de la ecuación (A1.88) a la presión de trabajo de 2 atm.

Las temperaturas de saturación obtenidas de esta forma se listan a continuación:

$T_1^0$ (K)	$T_2^0$ (K)	$T_3^0$ (K)
286,108	287,982	296,520

Tabla. A1.CLXIV. Temperaturas de saturación a la presión de trabajo

Las temperaturas de saturación por componente permiten evaluar una primera temperatura de equilibrio. Si se promedian los datos de la Tabla A1.CLXIV, ponderándose por las composiciones dadas en la Tabla A1.CLVIII según:

$$T = \sum_i x_i T_i^0 = x_1 T_1^0 + x_2 T_2^0 + x_3 T_3^0 \quad (A1.157)$$

Se encuentra, para cada equilibrio:

Nº Equilibrio	$T_1$ (K)	Nº Equilibrio	$T_1$ (K)
1	287,664	4	296,277
2	296,344	5	287,805
3	287,835	6	287,664

Tabla. A1.CLXV. Primer cálculo de temperatura de equilibrio

### **A1.C5.5. Cálculo de presión de saturación (1)**

Conocida la temperatura de cada equilibrio, dada en la Tabla A1.CLXV, puede calcularse la presión de saturación de los compo-

nentes en cada equilibrio, aplicando la ecuación (A1.87) convenientemente despejada para la anterior magnitud:

$$P_i^0(\text{mmHg}) = e^{A_i - \frac{B_i}{T(\text{K}) + C_i}} \quad (\text{A1.90})$$

Operando con los datos de la Tabla A1.CLX se obtiene:

Nº Equilibrio	$P_1^0$ (atm)	$P_2^0$ (atm)	$P_3^0$ (atm)
1	2,526	2,738	2,679
2	2,497	2,708	2,649
3	2,500	2,711	2,652
4	2,503	2,714	2,655
5	2,506	2,717	2,658
6	2,509	2,720	2,661

Tabla. A1.CLXVI. Cálculo de presiones de saturación, conocida T

### **A1.C5.6. Cálculo de los coeficientes de actividad**

En esta sección se desarrollarán las ecuaciones del método UNIFAC, proporcionadas en el capítulo primero, al sistema en cuestión. Se presentará el proceso secuenciado de cálculo en distintos apartados.

#### **A1.C5.6.1. Cálculo de $r_i$**

De acuerdo a la ecuación (A1.86.1), para un sistema de tres componentes, los desarrollos consisten en las siguientes expresiones:

$$(A1.91) \left\{ \begin{array}{l} r_i = \sum_k v_k^{(i)} R_k \quad (\text{A1.86.1}) \\ r_1 = \sum_k v_k^{(1)} R_k \quad (1) \\ r_2 = \sum_k v_k^{(2)} R_k \quad (2) \\ r_3 = \sum_k v_k^{(3)} R_k \quad (3) \end{array} \right.$$

Donde se calcularán tantos  $r_i$  como componentes, multiplicando cada subgrupo por el número en que están presentes en la molécula que defina al compuesto "i", y sumando todos los productos. Los datos para ejecutar este cálculo vienen dados en la Tabla A1.CLIX y los distintos  $r_i$  así obtenidos se consignan en la siguiente:

$r_1$	2,6968	$r_2$	2,2426	$r_3$	2,6960
-------	--------	-------	--------	-------	--------

Tabla. A1.CLXVII. Cálculo de  $r_i$

### A1.C5.6.2. Cálculo de $q_i$

De acuerdo a la ecuación (A1.86.2), para un sistema de tres componentes, los desarrollos se expresan como sigue:

$$(A1.92) \left\{ \begin{array}{l} q_i = \sum_k v_k^{(i)} Q_k \text{ (A1.86.2)} \\ q_1 = \sum_k v_k^{(1)} Q_k \text{ (1)} \\ q_2 = \sum_k v_k^{(2)} Q_k \text{ (2)} \\ q_3 = \sum_k v_k^{(3)} Q_k \text{ (3)} \end{array} \right.$$

Donde se calcularán tantos  $q_i$  como componentes, multiplicando cada subgrupo por el número en que están presentes en la molécula que defina al compuesto "i", y sumando todos los productos. Los datos para ejecutar este cálculo vienen dados en la Tabla A1.CLIX y los distintos  $q_i$  así obtenidos se consignan en la siguiente:

$q_1$	2,1560	$q_2$	1,5360	$q_3$	2,1520
-------	--------	-------	--------	-------	--------

Tabla. A1.CLXVIII. Cálculo de  $q_i$

### A1.C5.6.3. Cálculo de $e_{ki}$

El cálculo de  $e_{ki}$  está basado en la ecuación (A1.86.5). Dicha expresión implica todos los subgrupos  $k$  (del 1 al 3 en este caso), así como todas las especies desde  $i=1$  hasta  $i=3$ . Dado que para cada

subgrupo, debe obtenerse una ecuación por componente, se precisarán 9 ecuaciones, que pueden tomarse del segundo capítulo:

$$(A1.93) \left\{ \begin{array}{l} e_{ki} = \frac{v_k^{(i)} Q_k}{q_i} \quad (A1.86.5) \\ e_{11} = \frac{v_1^{(1)} Q_1}{q_1} (1); e_{12} = \frac{v_1^{(2)} Q_1}{q_2} (2); e_{13} = \frac{v_1^{(3)} Q_1}{q_3} (3) \\ e_{21} = \frac{v_2^{(1)} Q_2}{q_1} (7); e_{22} = \frac{v_2^{(2)} Q_2}{q_2} (8); e_{23} = \frac{v_2^{(3)} Q_2}{q_3} (9) \\ e_{31} = \frac{v_3^{(1)} Q_3}{q_1} (13); e_{32} = \frac{v_3^{(2)} Q_3}{q_2} (14); e_{33} = \frac{v_3^{(3)} Q_3}{q_3} (15) \end{array} \right.$$

Operando sobre los datos consignados en las tablas A1.CLIX y A1.CLXVIII, se obtiene:

e <sub>ki</sub>			
k	i = 1	i = 2	i = 3
1	0,3933	0,0000	0,7881
2	0,5009	0,7031	0,0000
3	0,1058	0,2969	0,2119

Tabla. A1.CLXIX. Cálculo de e<sub>ki</sub>

#### A1.C5.6.4. Cálculo de $\tau_{mk}$

La ecuación (A1.86.6), proporciona el valor de  $\tau_{mk}$  mediante una función dependiente del parámetro de interacción,  $a_{mk}$ , (tabulado en A1.CLIX) y la temperatura. Puesto que los subgrupos correspondientes al mismo grupo principal no presentan interacción, todos los  $a_{mk}$  se anulan, considerando que los subgrupos presentes en este equilibrio corresponden al grupo "Alcanos". De ahí que aplicando directamente (A1.86.6), los  $\tau_{mk}$  resultan la exponencial de cero, es decir, la unidad. Sea por tanto:

$\tau_{mk}$
1

Tabla. A1.CLXX. Valor de todos los  $\tau_{mk}$

De lo que se deduce que, si este parámetro, el único teóricamente dependiente de la temperatura para el cálculo de los coeficientes de actividad, resulta coincidente para todos los casos a la unidad, independientemente de la temperatura; entonces, para el exclusivo caso de este sistema, se tiene que los coeficientes de actividad son constantes, por lo que no se recalcularán cada vez que se haga con la temperatura, ahorrándose uno de los bucles de iteración descritos en la Figura A1.1.

#### A1.C5.6.5. Cálculo de $\beta_{ik}$

Partiendo de la ecuación (A1.86.7), se tiene una expresión que va en todos los componentes y subgrupos, de donde el desarrollo pertinente, como en el apartado de cálculo de  $e_{ki}$ , incluye 9 ecuaciones. Considerando que todos los  $\tau_{mk}$  se igualan a la unidad, por lo argumentado en el apartado previo, se simplifican directamente en los desarrollos:

$$(A1.158) \left\{ \begin{array}{l} \beta_{ik} = \sum_m e_{mi} \tau_{mk} = \sum_m e_{mi} \quad (A1.86.7) \\ \beta_{11} = e_{11} + e_{21} + e_{31} = \beta_{12} = \beta_{13} \quad (1) \\ \beta_{21} = e_{12} + e_{22} + e_{32} = \beta_{22} = \beta_{23} \quad (2) \\ \beta_{31} = e_{13} + e_{23} + e_{33} = \beta_{32} = \beta_{33} \quad (3) \end{array} \right.$$

Una propiedad de la Tabla A1.CLXIX, se observa al sumar los  $e_{ki}$  de las columnas: todas ellas suman la unidad. Ello se fundamenta en la propia expresión de  $e_{ki}$ , que para un mismo componente “i”, supone la razón de cada contribución a  $q_i$  de cada componente, por lo que la suma de estas razones debe equiparar el numerador al denominador y la fracción resulta uno, como queda expresado. De las ecuaciones (A1.158), se observa que todas las  $\beta_{ik}$  para un mismo componente “i”, consisten en la suma de los  $e_{ki}$ , dado que las interacciones entre subgrupos son despreciables. Por todo lo expuesto, es claro que todas las  $\beta_{ik}$  deben resultar la unidad. Por tanto:

$\beta_{ik}$
1

Tabla. A1.CLXXI. Valor de todas las  $\beta_{ik}$

Debe recalarse que exclusivamente en el caso de que los parámetros de interacción se anulen, ergo los  $\tau_{mk}$  se hagan la unidad, se cumple lo dado en la Tabla A1.CLXXI.

#### A1.C5.6.6. Cálculo de $\theta_k$

Se parte de la ecuación (A1.86.8) y, puesto que ésta sólo va en los subgrupos k, se tendrán tres ecuaciones:

$$(A1.159) \left\{ \begin{array}{l} \theta_k = \frac{\sum_i x_i q_i e_{ki}}{\sum_j x_j q_j} \quad (A1.86.8) \\ \theta_1 = \frac{x_1 q_1 e_{11} + x_2 q_2 e_{12} + x_3 q_3 e_{13}}{x_1 q_1 + x_2 q_2 + x_3 q_3} \quad (1) \\ \theta_2 = \frac{x_1 q_1 e_{21} + x_2 q_2 e_{22} + x_3 q_3 e_{23}}{x_1 q_1 + x_2 q_2 + x_3 q_3} \quad (2) \\ \theta_3 = \frac{x_1 q_1 e_{31} + x_2 q_2 e_{32} + x_3 q_3 e_{33}}{x_1 q_1 + x_2 q_2 + x_3 q_3} \quad (3) \end{array} \right.$$

Donde la suma de los  $\theta_k$  resulta la unidad:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_m \theta_m = 1 = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \\ \frac{x_1 q_1 \beta_{11} + x_2 q_2 \beta_{21} + x_3 q_3 \beta_{31}}{x_1 q_1 + x_2 q_2 + x_3 q_3} \\ \frac{x_1 q_1 + x_2 q_2 + x_3 q_3}{x_1 q_1 + x_2 q_2 + x_3 q_3} = 1 \text{ q. e. d.} \end{array} \right.$$

Se han tomado las fracciones (A1.159.1) a (A1.159.3) y se ha extraído factor común los  $x_i q_i$ . El factor a que multiplican los anteriores resulta coincidente con las expresiones (A1.158.1) a (A1.158.3) y se ha sustituido directamente. Dado que todas las  $\beta_{ik}$  resultan uno para el caso particular del sistema de componentes en estudio, se igualan el numerador y el denominador y se demuestra lo sugerido

más arriba. En aquellos casos donde las  $\beta_{ik}$  no resulten la unidad, éstas no podrán sustituirse por la suma de  $e_{ki}$ , como se ha practicado. En todo caso, el sumatorio de los  $e_{ki}$  siempre es la unidad, (cuando se fija un componente) y el razonamiento sigue siendo válido.

Esta propiedad resultará particularmente interesante a la hora de calcular el siguiente parámetro *UNIFAC*. En cuanto a los  $\theta_k$ , por aplicación de (A1.159) sobre los datos consignados en las tablas A1.CLVIII y A1.CLXVIII a A1.CLXIX se obtiene:

Nº Equilibrio	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$
1	0,088	0,658	0,254
2	0,776	0,010	0,213
3	0,106	0,641	0,253
4	0,772	0,014	0,214
5	0,083	0,656	0,260
6	0,088	0,658	0,254

Tabla. A1.CLXXII. Cálculo de  $\theta_k$

#### A1.C5.6.7. Cálculo de $s_k$

Atendiendo a la ecuación (A1.86.9), y dado que los  $\tau_{mk}$  valen la unidad,  $s_k$  se calcula considerando:

$$s_k = \sum_m \theta_m \tau_{mk} = \sum_m \theta_m = 1 \quad (A1.96)$$

Lo que según el apartado anterior también resulta la unidad, por lo que:

$s_k$
1

Tabla. A1.CLXXIII. Valor de todos los  $s_k$

#### A1.C5.6.8. Cálculo de $J_i$

La ecuación (A1.86.3) proporciona el valor de  $J_i$ . Al desarrollar para los tres componentes involucrados en el sistema descrito en el presente capítulo, se tienen las ecuaciones dadas por (A1.97), que continúan siendo válidas, (hasta el tercer componente).

Por aplicación de dichas ecuaciones a los datos consignados en las tablas A1.CLVIII y A1.CLXVII, se calcula:

Nº Equilibrio	$J_1$	$J_2$	$J_3$
1	1,162	0,967	1,162
2	1,004	0,835	1,003
3	1,159	0,964	1,158
4	1,005	0,836	1,005
5	1,167	0,971	1,167
6	1,163	0,967	1,162

Tabla. A1.CLXXIV. Cálculo de  $J_i$

#### A1.C5.6.9. Cálculo de $L_i$

Sean los siguientes valores de  $L_i$ :

Nº Equilibrio	$L_1$	$L_2$	$L_3$
1	1,313	0,936	1,311
2	1,008	0,718	1,006
3	1,306	0,930	1,303
4	1,010	0,720	1,008
5	1,324	0,943	1,321
6	1,314	0,936	1,311

Tabla. A1.CLXXV. Cálculo de  $L_i$

Se han calculado siguiendo la ecuación (A1.86.4), que desarrollada para tres componentes proporciona las ecuaciones dadas por (A1.98), que continúan siendo válidas, (hasta el tercer componente).

Los datos de la Tabla A1.CLXXV, se han obtenido por aplicación de (A1.98) a los datos dados en las tablas A1.CLVIII y A1.CLXVIII.

#### A1.C5.6.10. Cálculo del coeficiente de actividad combinatorio

El coeficiente de actividad combinatorio se calcula, para cada especie, según la expresión (A1.85.1). Su desarrollo produce las ecuaciones mostradas en (A1.99), que continúan siendo válidas, (hasta el tercer componente).

Por aplicación de tales ecuaciones a los datos consignados en las tablas A1.CLXVIII y A1.CLXXIV a A1.CLXXV, se obtiene:

Nº Equilibrio	$\ln\gamma_1^C$	$\ln\gamma_2^C$	$\ln\gamma_3^C$
1	0,065	0,004	0,063
2	0,000	0,076	0,000
3	0,062	0,004	0,060
4	0,000	0,075	0,000
5	0,069	0,003	0,067
6	0,065	0,004	0,063

Tabla. A1.CLXXVI. Cálculo del coeficiente de actividad combinatorio

#### A1.C5.6.11. Cálculo del coeficiente de actividad residual

La evaluación del coeficiente de actividad residual requiere el desarrollo de la ecuación (A1.85.2). No obstante, a fin de ahorrar esfuerzo inane, se efectúan las siguientes observaciones:

$$\ln\gamma_i^R = q_i \left[ 1 - \sum_m \left( \theta_k \frac{\beta_{ik}}{s_k} - e_{ki} \ln \frac{\beta_{ik}}{s_k} \right) \right] \quad (A1.85.2)$$

El término que resta en el sumatorio se anula, puesto que el logaritmo de la unidad es cero, ( $\beta_{ik}$  y  $s_k$  se hacen uno según lo mostrado en apartados precedentes). De la misma forma, el cociente que multiplica en el primer sumando se hace uno, por lo que (A1.85.2), en este caso, se reduce a la siguiente expresión:

$$\ln\gamma_i^R = q_i \left[ 1 - \sum_m \theta_m \right] \quad (A1.100)$$

Como se vio en el apartado A1.C5.6.6:

$$\sum_m \theta_m = 1$$

Luego:

$$\ln\gamma_i^R = 0$$

Debe enfatizarse, como se viene haciendo en los apartados que preceden al presente, en el hecho de que sólo las circunstancias que se han razonado permiten asumir, en la presente sección de cálculo de los coeficientes de actividad, las simplificaciones que se han mostrado. En definitiva:

$\ln\gamma_i^R$
0

Tabla. A1.CLXXVII. Valor de todos los coeficientes de actividad residuales

#### A1.C5.6.12. Cálculo del coeficiente de actividad

Conocidos los coeficientes de actividad combinatorio y residual, aplicando exponenciales en la expresión (A1.84) y despejando convenientemente se obtiene:

$$\gamma_i = e^{\ln\gamma_i^C + \ln\gamma_i^R} \quad (A1.101)$$

Calculando (A1.101) con los datos de las tablas A1.CLXXVI a A1.CLXXVII, se alcanza el objetivo de la sección por la obtención de los coeficientes de actividad de la fase líquida, que se tabulan seguidamente:

Nº Equilibrio	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$
1	1,067	1,004	1,065
2	1,000	1,079	1,000
3	1,064	1,004	1,062
4	1,000	1,078	1,000
5	1,072	1,003	1,069
6	1,067	1,004	1,065

Tabla. A1.CLXXVIII. Coeficientes de actividad

### **A1.C5.7. Cálculo de la presión de saturación (2)**

En la sección A1.C5.5, se obtuvo un primer valor de presión de saturación por componente, por aplicación de la ecuación de *Antoine*. En este caso, se recalcularán dichas presiones a través de expresiones deducidas directamente de la ecuación del criterio fundamental del equilibrio termodinámico. Esta primera afinación, permitirá incluir los coeficientes de actividad recién estimados. Serán de aplicación las ecuaciones (A1.106) a (A1.111) reformuladas como sigue para un sistema de tres componentes:

$$P_1^0 = \frac{P}{\frac{\gamma_1 x_1}{\Phi_1} + \frac{\gamma_2 x_2 P_2^0}{\Phi_2 P_1^0} + \frac{\gamma_3 x_3 P_3^0}{\Phi_3 P_1^0}} \quad (A1.160)$$

$$P_2^0 = \frac{P}{\frac{\gamma_1 x_1 P_1^0}{\Phi_1 P_2^0} + \frac{\gamma_2 x_2}{\Phi_2} + \frac{\gamma_3 x_3 P_3^0}{\Phi_3 P_2^0}} \quad (A1.161)$$

$$P_3^0 = \frac{P}{\frac{\gamma_1 x_1 P_1^0}{\Phi_1 P_3^0} + \frac{\gamma_2 x_2 P_2^0}{\Phi_2 P_3^0} + \frac{\gamma_3 x_3}{\Phi_3}} \quad (A1.162)$$

Tales expresiones se aplican a la presión de trabajo dada en la sección A1.C5.2, los coeficientes de actividad recién dilucidados, Tabla A1.CLXXVIII, las composiciones de fase líquida dadas en la Tabla A1.CLVIII y las presiones de saturación más actuales, consigna-

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

das en la Tabla A1.CLXVI. Fijando los  $\Phi_i$  a la unidad, suponiendo idealidad del sistema, se obtiene:

Nº Equilibrio	$P_1^0$ (atm)	$P_2^0$ (atm)	$P_3^0$ (atm)
1	2,074	1,949	1,461
2	2,768	2,611	1,983
3	2,083	1,958	1,468
4	2,759	2,603	1,976
5	2,086	1,961	1,470
6	2,074	1,949	1,461

Tabla. A1.CLXXIX. Cálculo de presiones de saturación, según el criterio fundamental del equilibrio

### **A1.C5.8. Cálculos de temperatura (2)**

A partir de las presiones de saturación de cada componente en el equilibrio, es posible recalculer la temperatura del mismo aplicando la ecuación (A1.112) y promediando las temperaturas de cada componente en el equilibrio. Los datos requeridos vienen dados por las tablas A1.CLX y A1.CLXXIX, esto es, los coeficientes de *Antoine* y las presiones de saturación más recientes, respectivamente. Se obtiene:

Nº Equilibrio	$T_1^0$ (K)	$T_2^0$ (K)	$T_3^0$ (K)	$T_2$ (K)
1	287,206	287,212	287,232	287,217
2	296,249	296,250	296,254	296,251
3	287,336	287,343	287,365	287,348
4	296,147	296,149	296,154	296,150
5	287,382	287,388	287,407	287,392
6	287,206	287,212	287,233	287,217

Tabla. A1.CLXXX. Segundo cálculo de T de equilibrio

Con la temperatura recién recalculada debería realizarse lo propio con los coeficientes de actividad, ya que las magnitudes deben mantenerse actualizadas unas con otras. Debido a que, como se ha demostrado en este capítulo, dichos coeficientes son indepen-

dientes de la temperatura, no es preciso recalcular, exclusivamente en este caso.

### **A1.C5.9. Cálculo de la presión de saturación (3)**

La nueva temperatura del equilibrio permite actualizar las presiones de saturación por aplicación de la ecuación (A1.90). Se precisarán de nuevo los parámetros de *Antoine*, notados en la Tabla A1.CLX, así como la segunda temperatura del equilibrio dilucidada en la sección anterior. De esta forma se obtiene:

Nº Equilibrio	$P_1^0$ (atm)	$P_2^0$ (atm)	$P_3^0$ (atm)
1	2,075	1,950	1,460
2	2,768	2,611	1,983
3	2,084	1,958	1,467
4	2,759	2,603	1,976
5	2,087	1,961	1,469
6	2,075	1,950	1,460

Tabla. A1.CLXXXI. Cálculo de presiones de saturación, conocida T

### **A1.C5.10. Cálculo de la composición de vapor**

Con la temperatura del equilibrio y las presiones de saturación actualizadas, pueden determinarse las composiciones de los componentes en el vapor. Para ello, se aplica la ecuación (A1.113), (hasta el tercer componente) a los datos consignados en las tablas A1.CLXXVIII, A1.CLVIII, A1.CLXXXI y la presión consignada en la sección A1.C5.2. Tomando los  $\Phi_i$  como la unidad, suponiendo idealidad del sistema, se obtiene:

Nº Equilibrio	$y_1$	$y_2$	$y_3$
1	0,189	0,812	0,000
2	0,000	0,029	0,971
3	0,185	0,800	0,015

Nº Equilibrio	$y_1$	$y_2$	$y_3$
4	0,000	0,040	0,960
5	0,157	0,836	0,008
6	0,188	0,812	0,000

Tabla. A1.CLXXXII. Cálculo de composiciones de la fase vapor

### **A1.C5.11. Cálculo de los $\Phi_i$**

Cuando son conocidas las composiciones de vapor, se ha determinado, junto con la temperatura, las variables perseguidas concordantes con la composición de la fase líquida y presión introducidas. Hasta el momento se ha determinado el valor de los coeficientes de actividad, lo que supone una caracterización de la medida en que la fase líquida se aleja de la idealidad. Resta encontrar el valor de los coeficientes de fugacidad que efectuarán lo propio con la fase vapor, y permitirán recalculer tanto la temperatura de los equilibrios como las composiciones de vapor, hasta la convergencia. Como procede con las variables mostradas, cada vez que se recalculen los coeficientes de fugacidad, se obtendrá una nueva composición de vapor y temperatura de equilibrio hasta lograr tal convergencia.

La sección actual se dividirá en varios apartados donde se calcularán las distintas variables de que dependen los  $\Phi_i$ .

#### **A1.C5.11.1. Cálculo de temperaturas reducidas puras y cruzadas**

La temperatura reducida cruzada se definió junto con las reglas de combinación de *Prausnitz* en el capítulo primero. Ésta adopta la expresión (A1.81.6). Para la temperatura reducida pura, se indicó también la validez de la anterior, siempre que se hicieran coincidir los subíndices, lo que se mostró previamente en (A1.114).

Como se mostró en el apartado A1.C5.3.5, se tienen 3 interacciones “*ij*”, que dan lugar a otras tantas temperaturas reducidas cruzadas. También se tienen tres temperaturas reducidas puras, (una por componente). Aplicando (A1.81.6) y (A1.114) al último dato de temperatura disponible, dado por la Tabla A1.CLXXX, y a las temperaturas críticas y críticas cruzadas dadas por las tablas A1.CLXI y A1.CLXIII, se obtiene:

Nº Equilibrio	$T_{r1}$	$T_{r2}$	$T_{r3}$
1	0,685	0,676	0,659
2	0,706	0,697	0,680
3	0,685	0,676	0,660
4	0,706	0,697	0,680
5	0,685	0,676	0,660
6	0,685	0,676	0,659

Tabla. A1.CLXXXIII. Temperaturas reducidas puras

Nº Equilibrio	$T_{r12}$	$T_{r13}$	$T_{r23}$
1	0,680	0,672	0,668
2	0,702	0,693	0,689
3	0,680	0,672	0,668
4	0,701	0,693	0,688
5	0,681	0,672	0,668
6	0,680	0,672	0,668

Tabla. A1.CLXXXIV. Temperaturas reducidas cruzadas

### A1.C5.11.2. Cálculo de coeficientes viriales puros y cruzados

Los coeficientes viriales segundos, B, se determinan aplicando (A1.80). Esta ecuación es válida tanto para coeficientes viriales cruzados como para los puros, cuando se hacen coincidir los subíndices, como queda mostrado en la expresión (A1.115)

Como en el apartado anterior, existen tantos coeficientes viriales cruzados como interacciones entre pares de moléculas: 3 coeficientes. También se calculan cuatro coeficientes viriales puros, uno por componente.

Aplicando (A1.115) a R, cuyo valor se fijó en el apartado A1.C5.3.4, y los datos dados en las tablas A1.CLXI y A1.CLXIII y las tablas A1.CLXXXIII a A1.CLXXXIV, se obtienen, en unidades de L/mol, los siguientes coeficientes:

Nº Equilibrio	$B_1$	$B_2$	$B_3$
1	-0,714	-0,697	-0,784
2	-0,665	-0,649	-0,729
3	-0,713	-0,697	-0,783
4	-0,665	-0,649	-0,730
5	-0,713	-0,696	-0,783
6	-0,714	-0,697	-0,784

Tabla. A1.CLXXXV. Coeficientes viriales puros

Nº Equilibrio	$B_{12}$	$B_{13}$	$B_{23}$
1	-0,706	-0,747	-0,740
2	-0,657	-0,695	-0,688
3	-0,705	-0,746	-0,739
4	-0,658	-0,696	-0,689
5	-0,705	-0,746	-0,739
6	-0,706	-0,747	-0,740

Tabla. A1.CLXXXVI. Coeficientes viriales cruzados

### A1.C5.11.3. Cálculo de coeficientes delta puros y cruzados

Los coeficientes delta cruzados se obtienen por combinación lineal de los coeficientes viriales segundos como se indicaba en (A1.77.2). Por aplicación de esta ecuación a los datos de las tablas A1.CLXXXV a A1.CLXXXVI, se obtienen los 3 coeficientes delta cruzados, en las mismas unidades que los coeficientes viriales segundos, correspondientes a las interacciones de pares de moléculas:

Nº Equilibrio	$\delta_{12} \cdot 10^3$	$\delta_{13} \cdot 10^3$	$\delta_{23} \cdot 10^3$
1	-0,948	3,883	1,805
2	-0,880	3,531	1,632
3	-0,947	3,878	1,803
4	-0,881	3,535	1,634
5	-0,947	3,876	1,802
6	-0,948	3,883	1,805

Tabla. A1.CLXXXVII. Coeficientes delta cruzados

### A1.C5.11.4. Cálculo de volúmenes de líquido saturado

Los volúmenes de líquido saturado se estiman mediante la ecuación de *Rackett*, propuesta en la expresión (A1.82). Los datos requeridos se toman de las tablas A1.CLXI y A1.CLXXXIII, y los resultados se listan en la siguiente tabla:

Nº Equilibrio	$V_1^L$	$V_2^L$	$V_3^L$	$V_4^L$
1	0,095	0,086	0,090	0,095
2	0,097	0,087	0,091	0,097
3	0,095	0,086	0,090	0,095
4	0,097	0,087	0,091	0,097
5	0,095	0,086	0,090	0,095
6	0,095	0,086	0,090	0,095

Tabla. A1.CLXXXVIII. Volúmenes de líquido saturado

Los volúmenes están dados en L/mol, al igual que los volúmenes críticos.

### A1.C5.11.5. Cálculo de $\Phi_i$

Atendiendo a la expresión (A1.118), para un sistema de tres componentes, los  $\Phi_i$  se escriben como sigue:

$$(A1.163) \left\{ \begin{array}{l} \Phi_1 = e^{\frac{(P - P_1^0)(B_1 - V_1^L) + P[y_2^2\delta_{12} + y_3^2\delta_{13} + y_2y_3(\delta_{12} + \delta_{13} - \delta_{23})]}{RT}} \quad (1) \\ \Phi_2 = e^{\frac{(P - P_2^0)(B_2 - V_2^L) + P[y_1^2\delta_{12} + y_3^2\delta_{23} + y_1y_3(\delta_{12} + \delta_{23} - \delta_{13})]}{RT}} \quad (2) \\ \Phi_3 = e^{\frac{(P - P_3^0)(B_3 - V_3^L) + P[y_1^2\delta_{13} + y_2^2\delta_{23} + y_1y_2(\delta_{13} + \delta_{23} - \delta_{12})]}{RT}} \quad (3) \end{array} \right.$$

La aplicación de éstas a la presión de trabajo, dada en la sección A1.C5.2, las últimas presiones de saturación de los componentes, listadas en la Tabla A1.CLXXXI, los coeficientes viriales segundos puros, dados en la Tabla A1.CLXXXV, los volúmenes de líquido saturado tabulados en A1.CLXXXVIII, las composiciones de vapor consignadas en la Tabla A1.CLXXXII, los coeficientes delta cruzados presentados en la Tabla A1.CLXXXVII, y la última temperatura de equilibrio en A1.CLXXX, conocido R; se obtiene:

Nº Equilibrio	$\Phi_1$	$\Phi_2$	$\Phi_3$
1	1,003	0,998	0,980
2	1,025	1,019	0,999
3	1,003	0,999	0,981
4	1,024	1,019	0,999
5	1,003	0,999	0,981
6	1,003	0,998	0,980

Tabla. A1.CLXXXIX. Cálculo de los  $\Phi_i$

### **A1.C5.12. Cálculo de la presión de saturación (4)**

Conocidos los  $\Phi_i$ , pueden actualizarse las presiones de saturación de los componentes en equilibrio, por aplicación de las ecuaciones (A1.160) a (A1.162) a los datos de presión, dada en la sección A1.C5.2, los coeficientes de actividad listados en la Tabla A1.CLXXVIII, las composiciones dadas en la Tabla A1.CLVIII, las úl-

timas presiones de saturación calculadas, tabuladas en A1.CLXXXI y los datos de la Tabla A1.CLXXXIX; se recalculan:

Nº Equilibrio	$P_1^0$ (atm)	$P_2^0$ (atm)	$P_3^0$ (atm)
1	2,073	1,947	1,459
2	2,768	2,611	1,983
3	2,082	1,956	1,465
4	2,760	2,603	1,976
5	2,085	1,959	1,468
6	2,073	1,947	1,459

Tabla. A1.CXC. Cálculo de  $P_i^0$  conocidos los  $\Phi_i$

### **A1.C5.13. Cálculos de temperatura (3)**

De nuevo, siguiendo el esquema iterativo, una vez actualizadas las presiones de saturación, procede realizar lo propio con la temperatura del equilibrio. Para ello, se procede como en la sección A1.C5.8, empleando los datos más actuales de las presiones de saturación, del apartado anterior; y se obtienen los siguientes datos:

Nº Equilibrio	$T_1^0$ (K)	$T_2^0$ (K)	$T_3^0$ (K)	$T_3$ (K)
1	287,184	287,184	287,186	287,185
2	296,253	296,253	296,253	296,253
3	287,315	287,316	287,317	287,316
4	296,153	296,153	296,152	296,153
5	287,363	287,364	287,365	287,364
6	287,184	287,185	287,186	287,185

Tabla. A1.CXCI. Tercer cálculo de T de equilibrio

Como puede observarse, la dispersión de las temperaturas de saturación alrededor de la media comienza a reducirse, respecto al anterior cálculo de temperaturas, como fruto de la convergencia creciente de los datos en torno al equilibrio. Las temperaturas de saturación deben ser coincidentes, puesto que todos los componentes vaporizan a la misma temperatura en equilibrio.

Si los coeficientes de actividad fuesen dependientes de la temperatura, sus valores habrían de recalcularse. En este caso no lo son y por tanto, puede obviarse dicho paso iterativo. Seguidamente, procedería obtener la presión de saturación, para la nueva temperatura de equilibrio, como se practicó en la sección A1.C5.9, de forma que se ha cerrado el ciclo, puesto que al volver sobre uno de los pasos, estos deberán repetirse tantas veces como se precise, hasta que la convergencia obtenida sea satisfactoria. Desde A1.C5.9 hasta A1.C5.13, se reiterará lo descrito en cada una de tales secciones, a los datos más actuales.

#### **A1.C5.14. Comprobación de la convergencia**

Se presenta en esta sección el criterio de evaluación de la convergencia, que permitirá decidir en qué punto puede concluirse el bucle de cálculo: tras cada obtención de una nueva temperatura de equilibrio, (comenzando por la tercera, dada en la sección anterior), se planteará la verificación de la ecuación del criterio del equilibrio termodinámico. A este fin, se calcula para cada componente el valor de cada miembro de la ecuación, y se decide según la diferencia entre ambos, en términos absolutos. La primera verificación se tabula seguidamente:

Nº Equilibrio	$y_1\Phi_1P$	$x_1\gamma_1P_1^0$	$\Delta$	$y_2\Phi_2P$	$x_2\gamma_2P_2^0$	$\Delta$	$y_3\Phi_3P$	$x_3\gamma_3P_3^0$	$\Delta$
1	0,378	0,377	0,001	1,620	1,621	0,001	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,000	0,059	0,058	0,001	1,940	1,942	0,001
3	0,371	0,370	0,001	1,598	1,598	0,000	0,030	0,030	0,001
4	0,000	0,000	0,000	0,082	0,080	0,001	1,918	1,920	0,002
5	0,314	0,313	0,001	1,669	1,670	0,001	0,015	0,016	0,000
6	0,377	0,376	0,001	1,621	1,622	0,001	0,000	0,000	0,000

Tabla. A1.CXCII. Verificación del criterio de equilibrio termodinámico

Donde se han tomado las composiciones de vapor de la sección A1.C5.10, los  $\Phi_i$  de la sección A1.C5.11, la presión de A1.C5.2, la composición de fase líquida de A1.C5.1, los coeficientes de actividad de la sección A1.C5.6 y las presiones de saturación de

A1.C5.12. Cada vez que se reiteran los cálculos de A1.C5.13, se verifica el criterio fundamental del equilibrio termodinámico, con los datos actualizados.

### **A1.C2.15. Datos de equilibrio**

Cuando se reitera el cálculo en nueve ocasiones, se obtienen errores inferiores al octavo decimal. Los datos finales de equilibrio, tomados de la novena iteración, se tabulan para cerrar el capítulo:

Nº Equilibrio	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$T_{11}$ (K)
1	0,188	0,812	0,000	287,182
2	0,000	0,029	0,971	296,253
3	0,184	0,800	0,015	287,313
4	0,000	0,039	0,961	296,153
5	0,156	0,836	0,008	287,362
6	0,188	0,812	0,000	287,182

Tabla. A1.CXCIII. Composiciones de la fase vapor en equilibrio

Donde las composiciones de vapor en la Tabla A1.CXCIII se encuentran en equilibrio, a la temperatura listada en la misma tabla, con las de líquido en la Tabla A1.CLVIII, a la presión recogida en la sección A1.C5.2.

### **Capítulo A1.C6. Equilibrio de fases para “BINARIA”**

En este sexto capítulo del anexo de datos termodinámicos, se procurarán las composiciones de equilibrio a las condiciones requeridas en la operación “BINARIA”. Dado que en el anexo de diseño de unidades se explicitará la idiosincrasia de dicha operación, en este capítulo únicamente se desarrollarán al caso correspondiente, las expresiones obtenidas en el capítulo primero.

La generación de datos de equilibrio es un proceso cíclico donde, en función de datos conocidos, se reiteran los cálculos tanto como sea preciso para lograr una convergencia en el criterio fundamental del equilibrio termodinámico. El procedimiento se ha mostrado en la Figura A1.1 en el capítulo segundo.

Se tiene una iteración en doble bucle, primero para los coeficientes de actividad y luego para la composición del vapor, como se explicó en el mismo capítulo.

El objetivo del capítulo presente estriba en desarrollar y particularizar el ciclo dado en la Figura A1.1. A este fin, se establecerán tantas secciones como pasos requiere el procedimiento.

#### **A1.C6.1. Introducción de la composición de la fase líquida**

La operación “BINARIA” constituye el quinto proceso del tren de separación; su alimentación es el vapor de la operación precedente cuya composición se refiere en la siguiente tabla:

$(x_G)_1$	$(x_G)_2$
0,170	0,830
<b>Composición molar de la alimentación</b>	

Tabla. A1.CXCIV. Composición de la corriente G, alimentación de “BINARIA”

Donde los componentes son los que se enumeran seguidamente:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

1. 1-Buteno ( $C_4H_8$ ).
2. 1,3-Butadieno ( $C_4H_6$ ).

La ordenación de los componentes, como en el capítulo precedente, se ha practicado por orden creciente de volatilidad.

La operación de "BINARIA", es, como su propio nombre indica, una destilación de dos componentes, y como tal consiste en vaporizar un líquido en múltiples etapas de equilibrio: las corrientes de líquido y vapor emanadas de cada etapa forman un equilibrio, por lo que deberán introducirse una serie de composiciones necesarias para el diseño de la operación. En este caso, el método de diseño requiere una horquilla de composiciones, (a diferencia de capítulos previos donde se conocían las composiciones) que permita decidir las de las corrientes de destilado y residuo. A este propósito se dedican los datos 1 al 17. El dato 18 corresponde a las composiciones del líquido del último plato de columna, que debe vaporizarse para su devolución a ésta. Los tres datos restantes representan a las composiciones de las corrientes de destilado, residuo y alimentación respectivamente. En el anexo de diseño de unidades se amplía la información a este respecto.

De acuerdo con lo anterior, se introducirán los siguientes valores de composición de fase líquida:

Nº Equilibrio	$x_1$	$x_2$
1	0,000	1,000
2	0,050	0,950
3	0,100	0,900
4	0,150	0,850
5	0,200	0,800
6	0,250	0,750
7	0,300	0,700
8	0,350	0,650
9	0,400	0,600
10	0,450	0,550

Nº Equilibrio	$x_1$	$x_2$
11	0,500	0,500
12	0,550	0,450
13	0,600	0,400
14	0,650	0,350
15	0,700	0,300
16	0,750	0,250
17	0,800	0,200
18	0,001	0,999
19	0,001	0,999
20	0,170	0,830
21	0,752	0,248

Tabla. A1.CXCV. Lista de composiciones de fase líquida

Los componentes más volátiles vaporizarán selectivamente, por lo que es de esperar un líquido, menos concentrado en tales componentes. De la misma forma, los compuestos más pesados, (o menos volátiles), enriquecerán preferentemente el líquido.

### **A1.C6.2. Introducción de la presión de equilibrio**

La presión se introduce como dato considerando la temperatura del equilibrio que generará. Una presión elevada aumenta la temperatura de los equilibrios, puesto que se fuerza a los componentes a permanecer en fase líquida a una misma temperatura de referencia.

La presión baja incrementa la volatilidad del sistema, por lo que disminuye la temperatura del equilibrio y favorece la separación, (lo que se traduce en menor número de platos).

La idiosincrasia del sistema en juego obliga a obtener una solución de compromiso: De un lado, un defecto de presión, pese a reducir el número de etapas de separación requeridas, disminuye la temperatura hasta límites no operativos, (en torno 0 °C). Por otro lado, un exceso de presión aumenta el número de etapas hasta límites no asumibles económicamente.

De esta forma, la solución intermedia se establecerá en base a la temperatura del equilibrio: aquella presión que garantice una temperatura similar a la ambiente será tomada como la presión del sistema como criterio optimizador.

La vía para averiguar el extremo antedicho, consiste en la ecuación de *Antoine*. Se prueba con una presión, (atmosférica para comenzar), y se obtiene la temperatura de saturación de los componentes, despejando convenientemente de la ecuación, (se mostrarán en subsiguientes secciones los usos de la ecuación de *Antoine*). Al promediar cada una de las temperaturas de saturación se obtiene una temperatura del equilibrio, (que no coincidirá con la final puesto

que se trata de la primera de varias iteraciones, si bien proporciona una aproximación razonable).

Tras varias pruebas, se llega a la conclusión de que una presión de 3 atm concuerda con una temperatura de los equilibrios próxima a la ambiental, como se mostrará en próximas tablas. Por tanto, la elección de la presión queda fijada en:

$$P = 3 \text{ atm}$$

### **A1.C6.3. Introducción de datos**

Los datos que requerirá la generación de composiciones de equilibrio son los que se enumeran seguidamente:

- Parámetros *UNIFAC*
  - o Parámetros de subgrupo,  $R_k$  y  $Q_k$ .
  - o Número de subgrupos,  $\nu_k^{(i)}$ .
  - o Parámetros de interacción,  $a_{mk}$ .
- Coeficientes de *Antoine*,  $A_i$ ,  $B_i$  y  $C_i$ .
- Propiedades críticas
  - o Temperatura crítica,  $T_{ci}$ .
  - o Presión crítica,  $P_{ci}$ .
  - o Volumen crítico,  $V_{ci}$ .
  - o Factor de compresibilidad crítico,  $Z_{ci}$ .
  - o Factor acéntrico crítico,  $\omega_{ci}$ .
- Otras propiedades
  - o Peso molecular,  $PM_i$ .
  - o Temperatura normal de ebullición,  $T_i^0$  (normal).
  - o Parámetro  $k_{ij}$  de interacción, (véase capítulo anterior).
  - o Constante universal de los gases,  $R$  en (atm·L/mol·K).
- Reglas de *Prausnitz*, (véase capítulo anterior).

Tales datos junto a sus particularidades, se presentan en los siguientes apartados en forma tabular, junto a las oportunas acotaciones.

### A1.C6.3.1. Parámetros *UNIFAC*

Previa consigna de los parámetros es preciso desglosar en sus subgrupos constituyentes, cada una de las moléculas de las especies del sistema en cuestión. En la figura que sigue, se presentan los componentes de la alimentación de la operación “BINARIA”, por sus fórmulas desarrolladas:

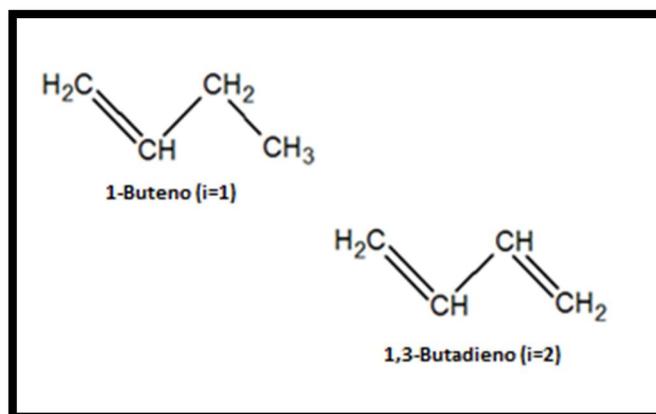


Figura. A1.6. Componentes de la alimentación G. (Elaboración propia)

De donde, atendiendo a la Tabla A1.I del capítulo primero, pueden discriminarse los siguientes subgrupos:

- 1-Buteno: Dos subgrupos  $\text{CH}_2$ , uno  $\text{CH}_3$  y uno  $\text{CH}$ .
- 1,3-Butadieno: Dos subgrupos  $\text{CH}_2$  y dos  $\text{CH}$ .

Dado que todos los subgrupos pertenecen al grupo principal “Alcanos”, las interacciones entre los mismos se anulan, según lo dispuesto en la Tabla A1.II.

Parámetros de subgrupo y de interacción <i>UNIFAC</i>					
		$a_{mk} (K)$	0	i=1	i=2
Grupo	k	$R_k$	$Q_k$	$v_k^{(1)}$	$v_k^{(2)}$
$\text{CH}_3$	1	0,9011	0,8480	1	0
$\text{CH}_2$	2	0,6744	0,5400	2	2
$\text{CH}$	3	0,4469	0,2280	1	2

Tabla. A1.CXCVI. Parámetros de subgrupo y de interacción *UNIFAC*

Donde la Tabla A1.CXCVI se ha elaborado tomando los datos listados en las tablas A1.I a A1.II.

Puesto que ningún grupo presenta interacción, se toma  $a_{mk}$  nulo para todos los casos.

### A1.C6.3.2. Coeficientes de Antoine

Los coeficientes de *Antoine* son números adimensionales que permiten, por la ecuación del mismo autor, encontrar la presión de saturación de un vapor conocida la temperatura del equilibrio, o bien la temperatura de saturación conocida la presión del sistema. En este caso, para ambos componentes, la ecuación de *Antoine* responde a la siguiente expresión:

$$\ln P_i^0 (\text{mmHg}) = A_i - \frac{B_i}{T(\text{K}) + C_i} \quad \text{Ecuación de Antoine (A1.87)}$$

Ecuación, que despejada para el caso de la temperatura de saturación, se escribe como sigue:

$$T_i^0 (\text{K}) = \frac{B_i}{A_i - \ln P (\text{mmHg})} - C_i \quad (\text{A1.88})$$

Los coeficientes de *Antoine* se tabulan a renglón seguido:

Coeficientes de Antoine			
1-Buteno (i = 1) C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>		Butadieno (i = 2) C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	
A <sub>1</sub>	15,7564	A <sub>2</sub>	15,7727
B <sub>1</sub>	2132,42	B <sub>2</sub>	2142,66
C <sub>1</sub>	-33,15	C <sub>2</sub>	-34,30

Tabla. A1.CXCVII. Coeficientes de *Antoine*

### A1.C6.3.3. Propiedades críticas y temperaturas de ebullición normal

Se consignan en tabla las propiedades críticas precisadas y listadas *ut supra*, así como las temperaturas de ebullición normales:

Propiedades críticas y temperaturas normales de ebullición					
$T_1^0$ (K) (normal)	266,9	$P_{c1}$ (atm)	39,7	$Z_{c1}$	0,277
$T_2^0$ (K) (normal)	268,7	$P_{c2}$ (atm)	42,7	$Z_{c2}$	0,270
$T_{c1}$ (K)	419,6	$V_{c1}$ (L/mol)	0,240	$\omega_1$	0,187
$T_{c2}$ (K)	425,0	$V_{c2}$ (L/mol)	0,221	$\omega_2$	0,195

Tabla. A1.CXCVIII. Propiedades críticas y temperaturas normales de ebullición

Tales propiedades se han plasmado respetándose el número de cifras significativas con que figuran en la bibliografía\*.

#### A1.C6.3.4. Otras propiedades

Los pesos moleculares de las sustancias implicadas en el equilibrio se tabulan seguidamente:

Pesos moleculares	
$PM_1$ (g/mol)	56,108
$PM_2$ (g/mol)	54,092

Tabla. A1.CXCIX. Pesos moleculares

El parámetro de interacción  $k_{ij}$ , será despreciado debido al similar carácter químico de las especies en equilibrio. La constante universal de los gases se tomará en el valor y unidades indicadas abajo:

$$k_{12} = 0$$

$$R = 0,082057 \text{ atm}\cdot\text{L/mol}\cdot\text{K}$$

#### A1.C6.3.5. Reglas de combinación de Prausnitz

La aplicación de las ecuaciones (A1.81.1) a (A1.81.5), proporciona el valor de las distintas variables cruzadas. Se considerará, además de los datos de R y  $k_{ij}$  del apartado anterior, los datos de la

\* The properties of gases & liquids. R. C. Reid, J. M. Prausnitz, B. E. Poling. McGraw-Hill. 4ª Edición.

Tabla A1.CXCVIII. Se obtendrán, por el siguiente orden:  $T_{cij}$ ,  $Z_{cij}$ ,  $V_{cij}$ ,  $P_{cij}$  y  $\omega_{cij}$ . Puesto que se tienen dos componentes, las interacciones de pares será únicamente 1-2, (considerando que la interacción “ij” es la misma que la inversa “ji” y que la interacción “ii” es la propiedad pura ya tabulada en la Tabla A1.CXCVIII).

Los resultados se consignan en la tabla siguiente:

Reglas de combinación de Prausnitz									
$T_{c12}$ (K)	422,2914	$Z_{c12}$	0,2735	$V_{c12}$ (L/mol)	0,2304	$P_{c12}$ (atm)	41,1396	$\omega_{12}$	0,1910

Tabla. A1.CC. Aplicación de las reglas de combinación de Prausnitz

#### **A1.C6.4. Cálculos de temperatura (1)**

Conocidas las composiciones de fase líquida de cada equilibrio, así como los datos previos, puede iniciarse la secuencia de cálculo, tal como se desarrollará a partir de la presente sección.

Haciendo uso de los coeficientes de *Antoine*, listados en la Tabla A1.CXCVII, se obtienen las temperaturas de saturación de cada componente en el equilibrio, por aplicación de la ecuación (A1.88) a la presión de trabajo de 3 atm.

Las temperaturas de saturación obtenidas de esta forma se listan a continuación:

$T_1^0$ (K)	$T_2^0$ (K)
298,890	300,775

Tabla. A1.CCI. Temperaturas de saturación a la presión de trabajo

Las temperaturas de saturación por componente permiten evaluar una primera temperatura de equilibrio. Si se promedian los datos de la Tabla A1.CCI, ponderándose por las composiciones dadas en la Tabla A1.CXCV según:

$$T = \sum_i x_i T_i^0 = x_1 T_1^0 + x_2 T_2^0 \quad (A1.164)$$

Se encuentra, para cada equilibrio:

Nº Equilibrio	T <sub>1</sub> (K)	Nº Equilibrio	T <sub>1</sub> (K)
1	300,775	11	299,832
2	300,680	12	299,738
3	300,586	13	299,644
4	300,492	14	299,549
5	300,398	15	299,455
6	300,303	16	299,361
7	300,209	17	299,267
8	300,115	18	300,773
9	300,021	19	300,773
10	299,926	20	300,453
		21	299,357

Tabla. A1.CCII. Primer cálculo de temperatura de equilibrio

### **A1.C6.5. Cálculo de presión de saturación (1)**

Conocida la temperatura de cada equilibrio, dada en la Tabla A1.CCII, puede calcularse la presión de saturación de los componentes en cada equilibrio, aplicando la ecuación (A1.87) convenientemente despejada para la anterior magnitud:

$$P_i^0(\text{mmHg}) = e^{A_i - \frac{B_i}{T(\text{K}) + C_i}} \quad (\text{A1.90})$$

Operando con los datos de la Tabla A1.CXC VII se obtiene:

Nº Equilibrio	P <sub>1</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>2</sub> <sup>0</sup> (atm)
1	3,174	3,000
2	3,166	2,991
3	3,157	2,983
4	3,148	2,974
5	3,139	2,966
6	3,130	2,958
7	3,121	2,949
8	3,113	2,941

Tabla. A1.CCIII. Cálculo de P<sub>i</sub><sup>0</sup>, conocida T. (Continúa en pág. siguiente)

Nº Equilibrio	P <sub>1</sub> <sup>0</sup> (atm)	P <sub>2</sub> <sup>0</sup> (atm)
9	3,104	2,932
10	3,095	2,924
11	3,086	2,916
12	3,078	2,907
13	3,069	2,899
14	3,060	2,891
15	3,052	2,882
16	3,043	2,874
17	3,034	2,866
18	3,174	3,000
19	3,174	3,000
20	3,144	2,971
21	3,043	2,874

Tabla. A1.CCIII. Cálculo de P<sub>i</sub><sup>0</sup>, conocida T. (Viene de pág. anterior)

### **A1.C6.6. Cálculo de los coeficientes de actividad**

En esta sección se desarrollarán las ecuaciones del método *UNIFAC*, proporcionadas en el capítulo primero, al sistema en cuestión. Se presentará el proceso secuenciado de cálculo en distintos apartados.

#### **A1.C6.6.1. Cálculo de r<sub>i</sub>**

De acuerdo a la ecuación (A1.86.1), para un sistema de tres componentes, los desarrollos consisten en las siguientes expresiones:

$$(A1.91) \left\{ \begin{array}{l} r_i = \sum_k v_k^{(i)} R_k \text{ (A1.86.1)} \\ r_1 = \sum_k v_k^{(1)} R_k \text{ (1)} \\ r_2 = \sum_k v_k^{(2)} R_k \text{ (2)} \end{array} \right.$$

Donde se calcularán tantos r<sub>i</sub> como componentes, multiplicando cada subgrupo por el número en que están presentes en la molécula

que defina al compuesto “i”, y sumando todos los productos. Los datos para ejecutar este cálculo vienen dados en la Tabla A1.CXCVI y los distintos  $r_i$  así obtenidos se consignan en la siguiente:

$r_1$	2,6968	$r_2$	2,2426
-------	--------	-------	--------

Tabla. A1.CCIV. Cálculo de  $r_i$

### A1.C6.6.2. Cálculo de $q_i$

De acuerdo a la ecuación (A1.86.2), para un sistema de tres componentes, los desarrollos se expresan como sigue:

$$(A1.92) \left\{ \begin{array}{l} q_i = \sum_k v_k^{(i)} Q_k \text{ (A1.86.2)} \\ q_1 = \sum_k v_k^{(1)} Q_k \text{ (1)} \\ q_2 = \sum_k v_k^{(2)} Q_k \text{ (2)} \end{array} \right.$$

Donde se calcularán tantos  $q_i$  como componentes, multiplicando cada subgrupo por el número en que están presentes en la molécula que defina al compuesto “i”, y sumando todos los productos. Los datos para ejecutar este cálculo vienen dados en la Tabla A1.CXCVI y los distintos  $q_i$  así obtenidos se consignan en la siguiente:

$q_1$	2,1560	$q_2$	1,5360
-------	--------	-------	--------

Tabla. A1.CCV. Cálculo de  $q_i$

### A1.C6.6.3. Cálculo de $e_{ki}$

El cálculo de  $e_{ki}$  está basado en la ecuación (A1.86.5). Dicha expresión implica todos los subgrupos  $k$  (del 1 al 3 en este caso), así como las especies desde  $i=1$  e  $i=2$ . Dado que para cada subgrupo, debe obtenerse una ecuación por componente, se precisarán 6 ecuaciones, que pueden tomarse del segundo capítulo:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

$$(A1.93) \left\{ \begin{array}{l} e_{ki} = \frac{v_k^{(i)} Q_k}{q_i} \quad (A1.86.5) \\ e_{11} = \frac{v_1^{(1)} Q_1}{q_1} (1); e_{12} = \frac{v_1^{(2)} Q_1}{q_2} (2); e_{21} = \frac{v_2^{(1)} Q_2}{q_1} (7) \\ e_{22} = \frac{v_2^{(2)} Q_2}{q_2} (8); e_{31} = \frac{v_3^{(1)} Q_3}{q_1} (13); e_{32} = \frac{v_3^{(2)} Q_3}{q_2} (14) \end{array} \right.$$

Operando sobre los datos consignados en las tablas A1.CLIX y A1.CLXVIII, se obtiene:

e <sub>ki</sub>		
k	i = 1	i = 2
1	0,3933	0,0000
2	0,5009	0,7031
3	0,1058	0,2969

Tabla. A1.CCVI. Cálculo de e<sub>ki</sub>

### A1.C6.6.4. Cálculo de $\tau_{mk}$

La ecuación (A1.86.6), proporciona el valor de  $\tau_{mk}$  mediante una función dependiente del parámetro de interacción,  $a_{mk}$ , (tabulado en A1.CXCVI) y la temperatura. Puesto que los subgrupos correspondientes al mismo grupo principal no presentan interacción, todos los  $a_{mk}$  se anulan, considerando que los subgrupos presentes en este equilibrio corresponden al grupo "Alcanos". De ahí que aplicando directamente (A1.86.6), los  $\tau_{mk}$  resultan la exponencial de cero, es decir, la unidad. Sea por tanto:

$\tau_{mk}$
1

Tabla. A1.CCVII. Valor de todos los  $\tau_{mk}$

De lo que se deduce que, si este parámetro, el único teóricamente dependiente de la temperatura para el cálculo de los coeficientes de actividad, resulta coincidente para todos los casos a la unidad, independientemente de la temperatura; entonces, para el exclusivo

caso de este sistema, se tiene que los coeficientes de actividad son constantes, por lo que no se recalcularán cada vez que se haga con la temperatura, ahorrándose uno de los bucles de iteración descritos en la Figura A1.1.

#### A1.C6.6.5. Cálculo de $\beta_{ik}$

Partiendo de la ecuación (A1.86.7), se tiene una expresión que va en todos los componentes y subgrupos, de donde el desarrollo pertinente, como en el apartado de cálculo de  $e_{ki}$ , incluye 6 ecuaciones. Considerando que todos los  $\tau_{mk}$  se igualan a la unidad, por lo argumentado en el apartado previo, se simplifican directamente en los desarrollos:

$$(A1.165) \left\{ \begin{array}{l} \beta_{ik} = \sum_m e_{mi} \tau_{mk} = \sum_m e_{mi} \quad (A1.86.7) \\ \beta_{11} = e_{11} + e_{21} + e_{31} = \beta_{12} = \beta_{13} \quad (1) \\ \beta_{21} = e_{12} + e_{22} + e_{32} = \beta_{22} = \beta_{23} \quad (2) \end{array} \right.$$

Una propiedad de la Tabla A1.CCVI, se observa al sumar los  $e_{ki}$  de las columnas: todas ellas suman la unidad. Ello se fundamenta en la propia expresión de  $e_{ki}$ , que para un mismo componente "i", supone la razón de cada contribución a  $q_i$  de cada componente, por lo que la suma de estas razones debe equiparar el numerador al denominador y la fracción resulta uno, como queda expresado. De las ecuaciones (A1.165), se observa que todas las  $\beta_{ik}$  para un mismo componente "i", consisten en la suma de los  $e_{ki}$ , dado que las interacciones entre subgrupos son despreciables. Por todo lo expuesto, es claro que todas las  $\beta_{ik}$  deben resultar la unidad. Por tanto:

$\beta_{ik}$
1

Tabla. A1.CCVIII. Valor de todas las  $\beta_{ik}$

Debe recalcar que exclusivamente en el caso de que los parámetros de interacción se anulen, ergo los  $\tau_{mk}$  se hagan la unidad, se cumple lo dado en la Tabla A1.CCVIII.

### A1.C6.6.6. Cálculo de $\theta_k$

Se parte de la ecuación (A1.86.8) y, puesto que ésta sólo va en los subgrupos k, se tendrán tres ecuaciones:

$$(A1.166) \left\{ \begin{array}{l} \theta_k = \frac{\sum_i x_i q_i e_{ki}}{\sum_j x_j q_j} \quad (A1.86.8) \\ \theta_1 = \frac{x_1 q_1 e_{11} + x_2 q_2 e_{12}}{x_1 q_1 + x_2 q_2} \quad (1) \\ \theta_2 = \frac{x_1 q_1 e_{21} + x_2 q_2 e_{22}}{x_1 q_1 + x_2 q_2} \quad (2) \\ \theta_3 = \frac{x_1 q_1 e_{31} + x_2 q_2 e_{32}}{x_1 q_1 + x_2 q_2} \quad (3) \end{array} \right.$$

Donde la suma de los  $\theta_k$  resulta la unidad:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_m \theta_m = 1 = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \\ \frac{x_1 q_1 \beta_{11} + x_2 q_2 \beta_{21}}{x_1 q_1 + x_2 q_2} \\ \frac{x_1 q_1 + x_2 q_2}{x_1 q_1 + x_2 q_2} = 1 \text{ q. e. d.} \end{array} \right.$$

Se han tomado las fracciones (A1.166.1) a (A1.166.3) y se ha extraído factor común los  $x_i q_i$ . El factor a que multiplican los anteriores resulta coincidente con las expresiones (A1.165.1) y (A1.166.2) y se ha sustituido directamente. Dado que todas las  $\beta_{ik}$  resultan uno para el caso particular del sistema de componentes en estudio, se igualan el numerador y el denominador y se demuestra lo sugerido más arriba. En aquellos casos donde las  $\beta_{ik}$  no resulten la unidad, éstas no podrán sustituirse por la suma de  $e_{ki}$ , como se ha practicado. En todo caso, el sumatorio de los  $e_{ki}$  siempre es la unidad, (cuando se fija un componente) y el razonamiento sigue siendo válido.

Esta propiedad resultará particularmente interesante a la hora de calcular el siguiente parámetro *UNIFAC*. En cuanto a los  $\theta_k$ , por aplicación de (A1.166) sobre los datos consignados en las tablas A1.CXCV y A1.CCV a A1.CCVI se obtiene:

Nº Equilibrio	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$
1	0,000	0,703	0,297
2	0,027	0,689	0,284
3	0,053	0,676	0,271
4	0,078	0,663	0,259
5	0,102	0,651	0,247
6	0,125	0,639	0,236
7	0,148	0,627	0,225
8	0,169	0,616	0,215
9	0,190	0,605	0,204
10	0,210	0,595	0,195

Nº Equilibrio	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$
11	0,230	0,585	0,185
12	0,248	0,575	0,176
13	0,267	0,566	0,167
14	0,284	0,557	0,159
15	0,301	0,548	0,150
16	0,318	0,540	0,142
17	0,334	0,531	0,135
18	0,001	0,703	0,297
19	0,000	0,703	0,297
20	0,088	0,658	0,254
21	0,318	0,539	0,142

Tabla. A1.CCIX. Cálculo de  $\theta_k$

#### A1.C6.6.7. Cálculo de $s_k$

Atendiendo a la ecuación (A1.86.9), y dado que los  $\tau_{mk}$  valen la unidad,  $s_k$  se calcula considerando:

$$s_k = \sum_m \theta_m \tau_{mk} = \sum_m \theta_m = 1 \quad (A1.96)$$

Lo que según el apartado anterior también resulta la unidad, por lo que:

$s_k$
1

Tabla. A1.CCX. Valor de todos los  $s_k$

#### A1.C6.6.8. Cálculo de $J_i$

La ecuación (A1.86.3) proporciona el valor de  $J_i$ . Al desarrollar para los componentes involucrados en el sistema descrito en el presente capítulo, se tienen las ecuaciones dadas por (A1.97), que continúan siendo válidas, (hasta el segundo componente).

Por aplicación de dichas ecuaciones a los datos consignados en las tablas A1.CXCXV y A1.CCIV, se calcula:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Nº Equilibrio	J <sub>1</sub>	J <sub>2</sub>
1	1,203	1,000
2	1,190	0,990
3	1,179	0,980
4	1,167	0,971
5	1,156	0,961
6	1,145	0,952
7	1,134	0,943
8	1,123	0,934
9	1,112	0,925
10	1,102	0,916

Nº Equilibrio	J <sub>1</sub>	J <sub>2</sub>
11	1,092	0,908
12	1,082	0,900
13	1,072	0,892
14	1,063	0,884
15	1,053	0,876
16	1,044	0,868
17	1,035	0,861
18	1,202	1,000
19	1,202	1,000
20	1,162	0,967
21	1,044	0,868

Tabla. A1.CCXI. Cálculo de J<sub>i</sub>

### A1.C6.6.9. Cálculo de L<sub>i</sub>

Sean los siguientes valores de L<sub>i</sub>:

Nº Equilibrio	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>
1	1,404	1,000
2	1,376	0,980
3	1,349	0,961
4	1,324	0,943
5	1,299	0,925
6	1,275	0,908
7	1,252	0,892
8	1,230	0,876
9	1,209	0,861
10	1,188	0,846

Nº Equilibrio	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>
11	1,168	0,832
12	1,149	0,818
13	1,130	0,805
14	1,112	0,792
15	1,094	0,780
16	1,077	0,768
17	1,061	0,756
18	1,403	1,000
19	1,403	1,000
20	1,313	0,936
21	1,077	0,767

Tabla. A1.CCXII. Cálculo de L<sub>i</sub>

Se han calculado siguiendo la ecuación (A1.86.4), que desarrollada para los componentes proporciona las ecuaciones dadas por (A1.98), que continúan siendo válidas, (hasta el segundo componente).

Los datos de la Tabla A1.CCXII, se han obtenido por aplicación de (A1.98) a los datos dados en las tablas A1.CXCV y A1.CCV.

### A1.C6.6.10. Cálculo del coeficiente de actividad combinatorio

El coeficiente de actividad combinatorio se calcula, para cada especie, según la expresión (A1.85.1). Su desarrollo produce las ecuaciones mostradas en (A1.99), que continúan siendo válidas, (hasta el segundo componente).

Por aplicación de tales ecuaciones a los datos consignados en las tablas A1.CCV y A1.CCXI a A1.CCXII, se obtiene:

Nº Equilibrio	$\ln\gamma_1^C$	$\ln\gamma_2^C$
1	0,104	0,000
2	0,092	0,000
3	0,080	0,001
4	0,069	0,003
5	0,060	0,005
6	0,051	0,007
7	0,043	0,010
8	0,036	0,014
9	0,030	0,017
10	0,025	0,021

Nº Equilibrio	$\ln\gamma_1^C$	$\ln\gamma_2^C$
11	0,020	0,026
12	0,016	0,030
13	0,012	0,035
14	0,009	0,040
15	0,006	0,046
16	0,004	0,051
17	0,003	0,057
18	0,104	0,000
19	0,104	0,000
20	0,065	0,004
21	0,004	0,051

Tabla. A1.CCXIII. Cálculo del coeficiente de actividad combinatorio

### A1.C6.6.11. Cálculo del coeficiente de actividad residual

La evaluación del coeficiente de actividad residual requiere el desarrollo de la ecuación (A1.85.2). No obstante, a fin de ahorrar esfuerzo inane, se efectúan las siguientes observaciones:

$$\ln\gamma_i^R = q_i \left[ 1 - \sum_m \left( \theta_k \frac{\beta_{ik}}{s_k} - e_{ki} \ln \frac{\beta_{ik}}{s_k} \right) \right] \quad (A1.85.2)$$

El término que resta en el sumatorio se anula, puesto que el logaritmo de la unidad es cero, ( $\beta_{ik}$  y  $s_k$  se hacen uno según lo mostrado en apartados precedentes). De la misma forma, el cociente que multiplica en el primer sumando se hace uno, por lo que (A1.85.2), en este caso, se reduce a la siguiente expresión:

$$\ln\gamma_i^R = q_i \left[ 1 - \sum_m \theta_m \right] \quad (A1.100)$$

Como se vio en el apartado A1.C6.6.6:

$$\sum_m \theta_m = 1$$

Luego:

$$\ln\gamma_i^R = 0$$

Debe enfatizarse, como se viene haciendo en los apartados que preceden al presente, en el hecho de que sólo las circunstancias que se han razonado permiten asumir, en la presente sección de cálculo de los coeficientes de actividad, las simplificaciones que se han mostrado. En definitiva:

$\ln\gamma_i^R$
0

Tabla. A1.CCXIV. Valor de todos los coeficientes de actividad residuales

### A1.C6.6.12. Cálculo del coeficiente de actividad

Conocidos los coeficientes de actividad combinatorio y residual, aplicando exponenciales en la expresión (A1.84) y despejando convenientemente se obtiene:

$$\gamma_i = e^{\ln\gamma_i^C + \ln\gamma_i^R} \quad (A1.101)$$

Calculando (A1.101) con los datos de las tablas A1.CCXIII a A1.CCXIV, se alcanza el objetivo de la sección por la obtención de los coeficientes de actividad de la fase líquida, que se tabulan seguidamente:

N° Equilibrio	$\gamma_1$	$\gamma_2$
1	1,110	1,000
2	1,096	1,000
3	1,083	1,001
4	1,072	1,003
5	1,061	1,005
6	1,052	1,007
7	1,044	1,010
8	1,037	1,014
9	1,031	1,017
10	1,025	1,022

N° Equilibrio	$\gamma_1$	$\gamma_2$
11	1,020	1,026
12	1,016	1,031
13	1,012	1,036
14	1,009	1,041
15	1,006	1,047
16	1,004	1,052
17	1,003	1,058
18	1,110	1,000
19	1,110	1,000
20	1,067	1,004
21	1,004	1,053

Tabla. A1.CCXV. Coeficientes de actividad

### **A1.C6.7. Cálculo de la presión de saturación (2)**

En la sección A1.C6.5, se obtuvo un primer valor de presión de saturación por componente, por aplicación de la ecuación de *Antoine*. En este caso, se recalcularán dichas presiones a través de expresiones deducidas directamente de la ecuación del criterio fundamental del equilibrio termodinámico. Esta primera afinación, permitirá incluir los coeficientes de actividad recién estimados. Serán de aplicación las ecuaciones (A1.106) a (A1.111) reformuladas como sigue para un sistema de dos componentes:

$$(A1.167) \left\{ \begin{array}{l} P_1^0 = \frac{P}{\frac{\gamma_1 x_1}{\Phi_1} + \frac{\gamma_2 x_2 P_2^0}{\Phi_2 P_1^0}} \quad (1) \\ P_2^0 = \frac{P}{\frac{\gamma_1 x_1 P_1^0}{\Phi_1 P_2^0} + \frac{\gamma_2 x_2}{\Phi_2}} \quad (2) \end{array} \right.$$

Tales expresiones se aplican a la presión de trabajo dada en la sección A1.C6.2, los coeficientes de actividad recién dilucidados, Tabla A1.CCXV, las composiciones de fase líquida dadas en la Tabla A1.CXCV y las presiones de saturación más actuales, consignadas

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

en la Tabla A1.CCIII. Fijando los  $\Phi_i$  a la unidad, suponiendo idealidad del sistema, se obtiene:

Nº Equilibrio	$P_1^0$ (atm)	$P_2^0$ (atm)
1	3,174	3,000
2	3,148	2,975
3	3,125	2,953
4	3,105	2,934
5	3,087	2,917
6	3,071	2,902
7	3,057	2,888
8	3,044	2,876
9	3,033	2,866
10	3,024	2,857

Nº Equilibrio	$P_1^0$ (atm)	$P_2^0$ (atm)
11	3,016	2,849
12	3,009	2,843
13	3,004	2,838
14	3,000	2,834
15	2,997	2,830
16	2,995	2,828
17	2,994	2,827
18	3,174	3,000
19	3,174	3,000
20	3,097	2,927
21	2,995	2,828

Tabla. A1.CCXXVI. Cálculo de presiones de saturación, según el criterio fundamental del equilibrio

### **A1.C6.8. Cálculos de temperatura (2)**

A partir de las presiones de saturación de cada componente en el equilibrio, es posible recalcular la temperatura del mismo aplicando la ecuación (A1.112) y promediando las temperaturas de cada componente en el equilibrio. Los datos requeridos vienen dados por las tablas A1.CXCVII y A1.CCXXVI, esto es, los coeficientes de *Antoine* y las presiones de saturación más recientes, respectivamente. Se obtiene:

Nº Equilibrio	$T_1^0$ (K)	$T_2^0$ (K)	$T_2$ (K)
1	300,775	300,775	300,775
2	300,499	300,501	300,500
3	300,253	300,257	300,255
4	300,033	300,039	300,036
5	299,838	299,845	299,842
6	299,664	299,673	299,669
7	299,511	299,520	299,515
8	299,375	299,385	299,380

Tabla. A1.CCXXVII. Segundo cálculo de T de equilibrio. (Continúa en pág. sig.)

Nº Equilibrio	T <sub>1</sub> <sup>0</sup> (K)	T <sub>2</sub> <sup>0</sup> (K)	T <sub>2</sub> (K)
9	299,257	299,267	299,262
10	299,154	299,165	299,159
11	299,067	299,077	299,072
12	298,994	299,004	298,999
13	298,934	298,943	298,939
14	298,887	298,896	298,891
15	298,853	298,861	298,857
16	298,830	298,837	298,834
17	298,820	298,826	298,823
18	300,769	300,769	300,769
19	300,770	300,770	300,770
20	299,951	299,958	299,954
21	298,830	298,837	298,833

Tabla. A1.CCXVII. Segundo cálculo de T de equilibrio. (Viene de pág. anterior)

Con la temperatura recién recalculada debería realizarse lo propio con los coeficientes de actividad, ya que las magnitudes deben mantenerse actualizadas unas con otras. Debido a que, como se ha demostrado en este capítulo, dichos coeficientes son independientes de la temperatura, no es preciso recalcular, exclusivamente en este caso.

### **A1.C6.9. Cálculo de la presión de saturación (3)**

La nueva temperatura del equilibrio permite actualizar las presiones de saturación por aplicación de la ecuación (A1.90). Se precisarán de nuevo los parámetros de *Antoine*, notados en la Tabla A1.CXCVII, así como la segunda temperatura del equilibrio dilucidada en la sección anterior. De esta forma se obtiene:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Nº Equilibrio	$P_1^0$ (atm)	$P_2^0$ (atm)
1	3,174	3,000
2	3,149	2,975
3	3,126	2,953
4	3,105	2,934
5	3,087	2,916
6	3,071	2,901
7	3,057	2,888
8	3,045	2,876
9	3,034	2,865
10	3,025	2,856

Nº Equilibrio	$P_1^0$ (atm)	$P_2^0$ (atm)
11	3,017	2,849
12	3,010	2,842
13	3,004	2,837
14	3,000	2,833
15	2,997	2,830
16	2,995	2,828
17	2,994	2,827
18	3,174	3,000
19	3,174	3,000
20	3,098	2,926
21	2,995	2,828

Tabla. A1.CCXVIII. Cálculo de presiones de saturación, conocida T

### **A1.C6.10. Cálculo de la composición de vapor**

Con la temperatura del equilibrio y las presiones de saturación actualizadas, pueden determinarse las composiciones de los componentes en el vapor. Para ello, se aplica la ecuación (A1.113), (hasta el segundo componente) a los datos consignados en las tablas A1.CCXV, A1.CXCV, A1.CCXVIII y la presión consignada en la sección A1.C6.2. Tomando los  $\Phi_i$  como la unidad, suponiendo idealidad del sistema, se obtiene:

Nº Equilibrio	$y_1$	$y_2$
1	0,000	1,000
2	0,058	0,942
3	0,113	0,887
4	0,166	0,834
5	0,218	0,781
6	0,269	0,731
7	0,319	0,681
8	0,368	0,632
9	0,417	0,583
10	0,465	0,535

Nº Equilibrio	$y_1$	$y_2$
11	0,513	0,487
12	0,561	0,439
13	0,608	0,392
14	0,656	0,344
15	0,704	0,296
16	0,752	0,248
17	0,801	0,199
18	0,001	0,999
19	0,001	0,999
20	0,188	0,812
21	0,754	0,246

Tabla. A1.CCXIX. Cálculo de composiciones de la fase vapor

### **A1.C6.11. Cálculo de los $\Phi_i$**

Cuando son conocidas las composiciones de vapor, se ha determinado, junto con la temperatura, las variables perseguidas concordantes con la composición de la fase líquida y presión introducidas. Hasta el momento se ha determinado el valor de los coeficientes de actividad, lo que supone una caracterización de la medida en que la fase líquida se aleja de la idealidad. Resta encontrar el valor de los coeficientes de fugacidad que efectuarán lo propio con la fase vapor, y permitirán recalcular tanto la temperatura de los equilibrios como las composiciones de vapor, hasta la convergencia. Como procede con las variables mostradas, cada vez que se recalculen los coeficientes de fugacidad, se obtendrá una nueva composición de vapor y temperatura de equilibrio hasta lograr tal convergencia.

La sección actual se dividirá en varios apartados donde se calcularán las distintas variables de que dependen los  $\Phi_i$ .

#### **A1.C6.11.1. Cálculo de temperaturas reducidas puras y cruzadas**

La temperatura reducida cruzada se definió junto con las reglas de combinación de *Prausnitz* en el capítulo primero. Ésta adopta la expresión (A1.81.6). Para la temperatura reducida pura, se indicó también la validez de la anterior, siempre que se hicieran coincidir los subíndices, lo que se mostró previamente en (A1.114).

Como se mostró en el apartado A1.C6.3.5, se tiene una interacción “*ij*”, que da lugar a otra temperatura reducida cruzada. También se tienen dos temperaturas reducidas puras, (una por componente). Aplicando (A1.81.6) y (A1.114) al último dato de temperatura disponible, dado por la Tabla A1.CCXVII, y a las temperaturas críticas y críticas cruzadas dadas por las tablas A1.CXCVIII y A1.CC, se obtiene:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Nº Equilibrio	$T_{r1}$	$T_{r2}$
1	0,717	0,708
2	0,716	0,707
3	0,716	0,706
4	0,715	0,706
5	0,715	0,706
6	0,714	0,705
7	0,714	0,705
8	0,713	0,704
9	0,713	0,704
10	0,713	0,704
11	0,713	0,704
12	0,713	0,704
13	0,712	0,703
14	0,712	0,703
15	0,712	0,703
16	0,712	0,703
17	0,712	0,703
18	0,717	0,708
19	0,717	0,708
20	0,715	0,706
21	0,712	0,703

Tabla. A1.CCXX. Temperaturas reducidas puras

Nº Equilibrio	$T_{r12}$
1	0,712
2	0,712
3	0,711
4	0,710
5	0,710
6	0,710
7	0,709
8	0,709
9	0,709
10	0,708
11	0,708
12	0,708
13	0,708
14	0,708
15	0,708
16	0,708
17	0,708
18	0,712
19	0,712
20	0,710
21	0,708

Tabla. A1.CCXXI. Temperaturas reducidas cruzadas

### A1.C6.11.2. Cálculo de coeficientes viriales puros y cruzados

Los coeficientes viriales segundos,  $B$ , se determinan aplicando (A1.80). Esta ecuación es válida tanto para coeficientes viriales cruzados como para los puros, cuando se hacen coincidir los subíndices, como queda mostrado en la expresión (A1.115)

Como en el apartado anterior, existen tantos coeficientes viriales cruzados como interacciones entre pares de moléculas: un sólo coeficiente. También se calculan dos coeficientes viriales puros, uno por componente.

Aplicando (A1.115) a R, cuyo valor se fijó en el apartado A1.C6.3.4, y los datos dados en las tablas A1.CXCVIII y A1.CC y las tablas A1.CCXX a A1.CCXXI, se obtienen, en unidades de L/mol, los siguientes coeficientes:

Nº Equilibrio	$B_1$	$B_2$
1	-0,642	-0,626
2	-0,643	-0,628
3	-0,644	-0,629
4	-0,646	-0,630
5	-0,646	-0,631
6	-0,647	-0,632
7	-0,648	-0,632
8	-0,649	-0,633
9	-0,649	-0,634
10	-0,650	-0,634
11	-0,650	-0,635
12	-0,651	-0,635
13	-0,651	-0,635
14	-0,651	-0,636
15	-0,651	-0,636
16	-0,651	-0,636
17	-0,652	-0,636
18	-0,642	-0,626
19	-0,642	-0,626
20	-0,646	-0,630
21	-0,651	-0,636

Tabla. A1.CCXXII. Coeficientes viriales puros

Nº Equilibrio	$B_{12}$
1	-0,635
2	-0,636
3	-0,637
4	-0,638
5	-0,639
6	-0,640
7	-0,641
8	-0,641
9	-0,642
10	-0,642
11	-0,643
12	-0,643
13	-0,644
14	-0,644
15	-0,644
16	-0,644
17	-0,644
18	-0,635
19	-0,635
20	-0,639
21	-0,644

Tabla. A1.CCXXIII. Coeficientes viriales cruzados

### A1.C6.11.3. Cálculo de coeficientes delta puros y cruzados

Los coeficientes delta cruzados se obtienen por combinación lineal de los coeficientes viriales segundos como se indicaba en (A1.77.2). Por aplicación de esta ecuación a los datos de las tablas A1.CCXXII a A1.CCXXIII, se obtienen el coeficiente delta cruzado, en las mismas unidades que los coeficientes viriales segundos, correspondientes a las interacciones de pares de moléculas:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Nº Equilibrio	$\delta_{12} \cdot 10^3$	Nº Equilibrio	$\delta_{12} \cdot 10^3$	Nº Equilibrio	$\delta_{12} \cdot 10^3$
1	-0,849	8	-0,858	15	-0,862
2	-0,850	9	-0,859	16	-0,862
3	-0,852	10	-0,860	17	-0,862
4	-0,854	11	-0,860	18	-0,849
5	-0,855	12	-0,861	19	-0,849
6	-0,856	13	-0,861	20	-0,854
7	-0,857	14	-0,861	21	-0,862

Tabla. A1.CCXXIV. Coeficientes delta cruzados

### A1.C6.11.4. Cálculo de volúmenes de líquido saturado

Los volúmenes de líquido saturado se estiman mediante la ecuación de *Rackett*, propuesta en la expresión (A1.82). Los datos requeridos se toman de las tablas A1.CXCVIII y A1.CCXX y los resultados se listan en la siguiente tabla:

Nº Equilibrio	$V_1^L$	$V_2^L$	Nº Equilibrio	$V_1^L$	$V_2^L$
1	0,098	0,088	11	0,098	0,088
2	0,098	0,088	12	0,098	0,088
3	0,098	0,088	13	0,098	0,088
4	0,098	0,088	14	0,098	0,088
5	0,098	0,088	15	0,098	0,088
6	0,098	0,088	16	0,098	0,088
7	0,098	0,088	17	0,098	0,088
8	0,098	0,088	18	0,098	0,088
9	0,098	0,088	19	0,098	0,088
10	0,098	0,088	20	0,098	0,088
			21	0,098	0,088

Tabla. A1.CCXXV. Volúmenes de líquido saturado

Los volúmenes están dados en L/mol, al igual que los volúmenes críticos.

### A1.C6.11.5. Cálculo de $\phi_i$

Atendiendo a la expresión (A1.118), para un sistema de tres componentes, los  $\phi_i$  se escriben como sigue:

$$(A1.168) \begin{cases} \Phi_1 = e^{\frac{(P - P_1^0)(B_1 - V_1^L) + Py_2^2\delta_{12}}{RT}} & (1) \\ \Phi_2 = e^{\frac{(P - P_2^0)(B_2 - V_2^L) + Py_1^2\delta_{12}}{RT}} & (2) \end{cases}$$

La aplicación de éstas a la presión de trabajo, dada en la sección A1.C6.2, las últimas presiones de saturación de los componentes, listadas en la Tabla A1.CCXVIII, los coeficientes viriales segundos puros, dados en la Tabla A1.CCXXII, los volúmenes de líquido saturado tabulados en A1.CCXXV, las composiciones de vapor consignadas en la Tabla A1.CCXIX, los coeficientes delta cruzados presentados en la Tabla A1.CCXXIV, y la última temperatura de equilibrio en A1.CCXVII, conocido R; se obtiene:

Nº Equilibrio	$\Phi_1$	$\Phi_2$
1	1,005	1,000
2	1,004	0,999
3	1,004	0,999
4	1,003	0,998
5	1,003	0,998
6	1,002	0,997
7	1,002	0,997
8	1,001	0,996
9	1,001	0,996
10	1,001	0,996

Nº Equilibrio	$\Phi_1$	$\Phi_2$
11	1,000	0,996
12	1,000	0,995
13	1,000	0,995
14	1,000	0,995
15	1,000	0,995
16	1,000	0,995
17	1,000	0,995
18	1,005	1,000
19	1,005	1,000
20	1,003	0,998
21	1,000	0,995

Tabla. A1.CCXVI. Cálculo de los  $\Phi_i$

#### **A1.C6.12. Cálculo de la presión de saturación (4)**

Conocidos los  $\Phi_i$ , pueden actualizarse las presiones de saturación de los componentes en equilibrio, por aplicación de las ecuaciones (A1.167.1) a (A1.167.2) a los datos de presión, dada en la sección A1.C6.2, los coeficientes de actividad listados en la Tabla A1.CCXV, las composiciones dadas en la Tabla A1.CXCV, las últimas presiones de saturación calculadas, tabuladas en A1.CCXVIII y los datos de la Tabla A1.CCXVI; se recalculan:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Nº Equilibrio	$P_1^0$ (atm)	$P_2^0$ (atm)
1	3,174	3,000
2	3,147	2,974
3	3,123	2,951
4	3,102	2,931
5	3,083	2,913
6	3,067	2,897
7	3,052	2,883
8	3,039	2,871
9	3,028	2,860
10	3,019	2,851

Nº Equilibrio	$P_1^0$ (atm)	$P_2^0$ (atm)
11	3,011	2,843
12	3,004	2,837
13	2,999	2,832
14	2,995	2,828
15	2,992	2,826
16	2,991	2,824
17	2,990	2,824
18	3,174	2,999
19	3,174	3,000
20	3,094	2,923
21	2,991	2,824

Tabla. A1.CCXXVII. Cálculo de  $P_i^0$  conocidos los  $\Phi_i$

### **A1.C6.13. Cálculos de temperatura (3)**

De nuevo, siguiendo el esquema iterativo, una vez actualizadas las presiones de saturación, procede realizar lo propio con la temperatura del equilibrio. Para ello, se procede como en la sección A1.C6.8, empleando los datos más actuales de las presiones de saturación, del apartado anterior; y se obtienen los siguientes datos:

Nº Equilibrio	$T_1^0$ (K)	$T_2^0$ (K)	$T_3$ (K)
1	300,775	300,775	300,775
2	300,487	300,487	300,487
3	300,230	300,231	300,230
4	300,002	300,002	300,002
5	299,799	299,799	299,799
6	299,619	299,619	299,619
7	299,460	299,461	299,460
8	299,321	299,321	299,321
9	299,200	299,200	299,200
10	299,096	299,096	299,096

Nº Equilibrio	$T_1^0$ (K)	$T_2^0$ (K)	$T_3$ (K)
11	299,008	299,008	299,008
12	298,935	298,936	298,935
13	298,877	298,878	298,878
14	298,833	298,834	298,834
15	298,803	298,804	298,803
16	298,786	298,787	298,786
17	298,782	298,782	298,782
18	300,769	300,769	300,769
19	300,769	300,770	300,770
20	299,916	299,917	299,916
21	298,786	298,786	298,786

Tabla. A1.CCXXVIII. Tercer cálculo de T de equilibrio

Como puede observarse, la dispersión de las temperaturas de saturación alrededor de la media comienza a reducirse, respecto al anterior cálculo de temperaturas, como fruto de la convergencia cre-

ciente de los datos en torno al equilibrio. Las temperaturas de saturación deben ser coincidentes, puesto que todos los componentes vaporizan a la misma temperatura en equilibrio.

Si los coeficientes de actividad fuesen dependientes de la temperatura, sus valores habrían de recalcularse. En este caso no lo son y por tanto, puede obviarse dicho paso iterativo. Seguidamente, procedería obtener la presión de saturación, para la nueva temperatura de equilibrio, como se practicó en la sección A1.C6.9, de forma que se ha cerrado el ciclo, puesto que al volver sobre uno de los pasos, estos deberán repetirse tantas veces como se precise, hasta que la convergencia obtenida sea satisfactoria. Desde A1.C6.9 hasta A1.C6.13, se reiterará lo descrito en cada una de tales secciones, a los datos más actuales.

#### **A1.C6.14. Comprobación de la convergencia**

Se presenta en esta sección el criterio de evaluación de la convergencia, que permitirá decidir en qué punto puede concluirse el bucle de cálculo: tras cada obtención de una nueva temperatura de equilibrio, (comenzando por la tercera, dada en la sección anterior), se planteará la verificación de la ecuación del criterio del equilibrio termodinámico. A este fin, se calcula para cada componente el valor de cada miembro de la ecuación, y se decide según la diferencia entre ambos, en términos absolutos. La primera verificación se tabula seguidamente:

Nº Equilibrio	$y_1\Phi_1P$	$x_1\gamma_1P_1^0$	$\Delta$	$y_2\Phi_2P$	$x_2\gamma_2P_2^0$	$\Delta$
1	0,000	0,000	0,000	3,000	3,000	0,000
2	0,173	0,172	0,001	2,825	2,826	0,001
3	0,340	0,338	0,002	2,658	2,659	0,002
4	0,501	0,499	0,002	2,496	2,498	0,002
5	0,657	0,655	0,003	2,339	2,341	0,003
6	0,810	0,807	0,003	2,185	2,189	0,003
7	0,959	0,956	0,003	2,035	2,039	0,003

Tabla. A1.CCXXIX. Verificación del criterio de equilibrio (Continúa en pág. sig.)

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Nº Equilibrio	$y_1\Phi_1P$	$x_1\gamma_1P_1^0$	$\Delta$	$y_2\Phi_2P$	$x_2\gamma_2P_2^0$	$\Delta$
8	1,106	1,103	0,003	1,888	1,891	0,004
9	1,252	1,248	0,004	1,742	1,746	0,004
10	1,396	1,392	0,004	1,598	1,602	0,004
11	1,539	1,536	0,004	1,455	1,459	0,004
12	1,682	1,678	0,004	1,312	1,316	0,004
13	1,825	1,821	0,004	1,170	1,173	0,003
14	1,968	1,964	0,003	1,027	1,031	0,003
15	2,111	2,108	0,003	0,884	0,887	0,003
16	2,256	2,253	0,003	0,740	0,743	0,003
17	2,401	2,399	0,003	0,595	0,598	0,002
18	0,003	0,003	0,000	2,997	2,997	0,000
19	0,003	0,003	0,000	2,997	2,997	0,000
20	0,565	0,563	0,002	2,431	2,434	0,002
21	2,262	2,259	0,003	0,734	0,737	0,003

Tabla. A1.CCXXIX. Verificación del criterio de equilibrio (Viene de pág. ant.)

Donde se han tomado las composiciones de vapor de la sección A1.C6.10, los  $\Phi_i$  de la sección A1.C6.11, la presión de A1.C6.2, la composición de fase líquida de A1.C6.1, los coeficientes de actividad de la sección A1.C6.6 y las presiones de saturación de A1.C6.12. Cada vez que se reiteran los cálculos de A1.C6.13, se verifica el criterio fundamental del equilibrio termodinámico, con los datos actualizados.

### **A1.C6.15. Datos de equilibrio**

Cuando se reitera el cálculo en nueve ocasiones, se obtienen errores inferiores al octavo decimal. Los datos finales de equilibrio, tomados de la novena iteración, se tabulan para cerrar el capítulo:

Nº Equilibrio	$y_1$	$y_2$	$T_{11}$ (K)
1	0,000	1,000	300,775
2	0,057	0,943	300,486
3	0,112	0,888	300,228
4	0,166	0,834	299,999
5	0,218	0,782	299,795
6	0,268	0,732	299,614
7	0,318	0,682	299,455
8	0,367	0,633	299,315
9	0,416	0,584	299,194
10	0,464	0,536	299,090
11	0,512	0,488	299,002
12	0,559	0,441	298,929
13	0,607	0,393	298,871
14	0,655	0,345	298,828
15	0,703	0,297	298,798
16	0,751	0,249	298,781
17	0,800	0,200	298,778
18	0,001	0,999	300,769
19	0,001	0,999	300,769
20	0,187	0,813	299,913
21	0,753	0,247	298,781

Tabla. A1.CCXXX. Composiciones de la fase vapor en equilibrio

Donde las composiciones de vapor en la Tabla A1.CCXXX se encuentran en equilibrio, a la temperatura listada en la misma tabla, con las de líquido en la Tabla A1.CXCV, a la presión recogida en la sección A1.C6.2.



### **Capítulo A1.C7. Equilibrio de fases para “RECUPERACIÓN”**

En este séptimo y último capítulo del anexo de datos termodinámicos, se procurarán las composiciones de equilibrio a las condiciones requeridas en la operación “RECUPERACIÓN”. Dado que en el anexo de diseño de unidades se explicitará la idiosincrasia de dicha operación, en este capítulo únicamente se desarrollarán al caso correspondiente, las expresiones obtenidas en el capítulo primero.

La generación de datos de equilibrio es un proceso cíclico donde, en función de datos conocidos, se reiteran los cálculos tanto como sea preciso para lograr una convergencia en el criterio fundamental del equilibrio termodinámico. El procedimiento se ha mostrado en la Figura A1.1 en el capítulo segundo.

Se tiene una iteración en doble bucle, primero para los coeficientes de actividad y luego para la composición del vapor, como se explicó en el mismo capítulo.

El objetivo del capítulo presente estriba en desarrollar y particularizar el ciclo dado en la Figura A1.1. A este fin, se establecerán tantas secciones como pasos requiere el procedimiento.

#### **A1.C7.1. Introducción de la composición de la fase líquida**

La operación “RECUPERACIÓN” constituye el sexto proceso del tren de separación; su alimentación es el residuo de la operación “EXTRACTIVA 2” cuya composición se refiere en la siguiente tabla:

$(x_X)_1$	$(x_X)_2$	$(x_X)_3$
0,112	0,217	0,671
<b>Composición molar de la alimentación</b>		

Tabla. A1.CCXXXI. Composición de X, alimentación de “RECUPERACIÓN”

Donde los componentes son los que se enumeran seguidamente:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

1. 1,3-Butadieno ( $C_4H_6$ ).
2. Cis-2-buteno ( $C_4H_8$ ).
3. Extractante: furfural, ( $C_5H_4O_2$ ).

La ordenación de los componentes, como en el capítulo precedente, se ha practicado por orden creciente de volatilidad. Esta corriente contiene el líquido rico en extractante, residuo de "EXTRACTIVA 2". En dicha operación, como sucede en las dos destilaciones extractivas, el líquido se enriquece en las sustancias más pesadas, a la sazón el componente cis-2-buteno y un mínimo contenido del clave ligero y componente de interés, el butadieno.

La operación de "RECUPERACIÓN", como su propio nombre indica, tiene por objeto reponer el extractante, lo más puro posible, al punto de operación donde se alimenta, esto es, la alimentación combinada de "EXTRACTIVA 1". Se trata de una vaporización en etapa sencilla o, si se prefiere, una destilación simple. Tal operación consiste en vaporizar un líquido en una sola etapa, de forma que las corrientes de líquido y vapor emanadas de la operación, formen un equilibrio que deberá establecerse en función de la composición deseada de las corrientes.

Se precisa sólo el siguiente valor de equilibrio que se muestra a continuación:

Nº Equilibrio	$x_1$	$x_2$	$x_3$
1	0,167	0,814	0,019

Tabla. A1.CCXXXII. Lista de composiciones de fase líquida

Los componentes más volátiles vaporizarán selectivamente, por lo que es de esperar un líquido muy concentrado en el extractante, por la gran diferencia de volatilidad con los compuestos hidrocarbonados. De la misma forma, el vapor no presentará apenas extractante ya que este no vaporiza en las condiciones en que lo hacen los hidrocarburos. Para los propósitos del presente anexo de cálculo de datos de equilibrio, es suficiente la explicación dada. Como se men-

---

cionó anteriormente, será en el anexo de diseño de unidades donde se amplíe convenientemente la justificación de la elección de estos datos de partida.

### **A1.C7.2. Introducción de la presión de equilibrio**

La presión se introduce como dato considerando la temperatura del equilibrio que generará. Una presión elevada aumenta la temperatura de los equilibrios, puesto que se fuerza a los componentes a permanecer en fase líquida a una misma temperatura de referencia.

La presión baja incrementa la volatilidad del sistema, por lo que disminuye la temperatura del equilibrio y favorece la separación.

La idiosincrasia del sistema en juego obliga a obtener una solución de compromiso: De un lado, un defecto de presión, pese a coadyuvar una mejor separación, disminuye la temperatura hasta límites no operativos, (en torno 0 °C). Por otro lado, un exceso de presión aumenta el coste por sobredimensionamiento mecánico.

De esta forma, la solución intermedia se establecerá en base a la temperatura del equilibrio: aquella presión que garantice una temperatura similar a la ambiente será tomada como la presión del sistema como criterio optimizador.

La vía para averiguar el extremo antedicho, consiste en la propia generación de datos de equilibrio. Se prueba con una presión, (atmosférica para comenzar), y se obtiene la temperatura final de equilibrio. En este caso no es válida el primer promedio de la temperatura, puesto que ésta es muy variable en los primeros estadios del procedimiento de cálculo

Tras varias pruebas, se llega a la conclusión de que una presión de 9 atm concuerda con una temperatura de los equilibrios razonable para la separación deseada.

Por tanto, la elección de la presión queda fijada en:

$$P = 9 \text{ atm}$$

### **A1.C7.3. Introducción de datos**

Los datos que requerirá la generación de composiciones de equilibrio son los que se enumeran seguidamente:

- Parámetros *UNIFAC*
  - o Parámetros de subgrupo,  $R_k$  y  $Q_k$ .
  - o Número de subgrupos,  $\nu_k^{(i)}$ .
  - o Parámetros de interacción,  $a_{mk}$ .
- Coeficientes de *Antoine*,  $A_i$ ,  $B_i$  y  $C_i$ .
- Propiedades críticas
  - o Temperatura crítica,  $T_{ci}$ .
  - o Presión crítica,  $P_{ci}$ .
  - o Volumen crítico,  $V_{ci}$ .
  - o Factor de compresibilidad crítico,  $Z_{ci}$ .
  - o Factor acéntrico crítico,  $\omega_{ci}$ .
- Otras propiedades
  - o Peso molecular,  $PM_i$ .
  - o Temperatura normal de ebullición,  $T_i^0$  (normal).
  - o Parámetro  $k_{ij}$  de interacción, (véase capítulo primero).
  - o Constante universal de los gases,  $R$  en (atm·L/mol·K).
- Reglas de *Prausnitz*, (véase capítulo primero).

Tales datos junto a sus particularidades, se presentan en los siguientes apartados en forma tabular, junto a las oportunas acotaciones.

#### **A1.C7.3.1. Parámetros *UNIFAC***

Previa consigna de los parámetros es preciso desglosar en sus subgrupos constituyentes, cada una de las moléculas de las especies del sistema en cuestión. En la figura que sigue, se presentan los

componentes de la alimentación de la operación “RECUPERACIÓN”, por sus fórmulas desarrolladas:

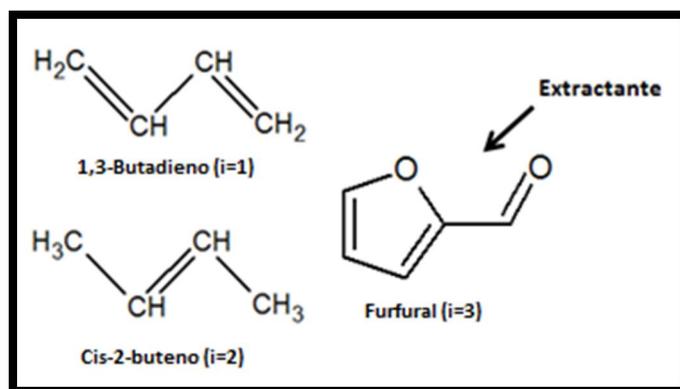


Figura. A1.7. Componentes de la alimentación X. (Elaboración propia)

De donde, atendiendo a la Tabla A1.I del capítulo primero, pueden discriminarse los siguientes subgrupos:

- 1,3-Butadieno: Dos subgrupos CH<sub>2</sub> y dos CH.
- Cis-2-buteno: Dos subgrupos CH<sub>3</sub> y dos CH.
- Furfural: Corresponde con su grupo principal.

En este caso, dado que no todos los subgrupos pertenecen al grupo principal “Alcanos”, como se mostró en el capítulo segundo, las interacciones entre los mismos no son nulas y deberán recogerse en tabla aparte, según lo dispuesto en la Tabla A1.II.

Tomando los datos listados en las tablas A1.I a A1.II, se tiene:

Parámetros de subgrupo UNIFAC				i=1	i=2	i=3
Grupo	k	R <sub>k</sub>	Q <sub>k</sub>	v <sub>k</sub> <sup>(1)</sup>	v <sub>k</sub> <sup>(2)</sup>	v <sub>k</sub> <sup>(3)</sup>
CH <sub>3</sub>	1	0,9011	0,8480	0	2	0
CH <sub>2</sub>	2	0,6744	0,5400	2	0	0
CH	3	0,4469	0,2280	2	2	0
Furfural	61	3,1680	2,4810	0	0	1

Tabla. A1.CCXXXIII. Parámetros de subgrupo UNIFAC

Parámetros de interacción $a_{mk}$ (K)				
m	k = 1	k = 2	k = 3	k = 61
1	0,000	0,000	0,000	354,600
2	0,000	0,000	0,000	354,600
3	0,000	0,000	0,000	354,600
61	-25,310	-25,310	-25,310	0,000

Tabla. A1.CCXXXIV. Parámetros de interacción UNIFAC

### A1.C7.3.2. Coeficientes de Antoine

Los coeficientes de *Antoine* son números adimensionales que permiten, por la ecuación del mismo autor, encontrar la presión de saturación de un vapor conocida la temperatura del equilibrio, o bien la temperatura de saturación conocida la presión del sistema. En este caso, para los componentes  $i=1$  e  $i=2$ , esto es, los hidrocarburos, la ecuación de *Antoine* responde a la siguiente expresión:

$$\ln P_i^0 (\text{mmHg}) = A_i - \frac{B_i}{T(\text{K}) + C_i} \quad \text{Ecuación de Antoine (A1.87)}$$

Ecuación, que despejada para el caso de la temperatura de saturación, se escribe como sigue:

$$T_i^0 (\text{K}) = \frac{B_i}{A_i - \ln P (\text{mmHg})} - C_i \quad (\text{A1.88})$$

Para el componente  $i=4$ , el extractante furfural, son aplicables las ecuaciones (A1.87) y (A1.88), considerando que la presión se expresa en bar y no en milímetros de mercurio.

Los coeficientes de *Antoine* se tabulan seguidamente:

Coeficientes de Antoine					
Butadieno (i = 1) C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>		Cis-2-buteno (i = 2) C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>		Furfural (i = 3) C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	
A <sub>1</sub>	15,7727	A <sub>2</sub>	15,8171	A <sub>3</sub>	8,5214
B <sub>1</sub>	2142,66	B <sub>2</sub>	2210,71	B <sub>3</sub>	2760,09
C <sub>1</sub>	-34,30	C <sub>2</sub>	-36,15	C <sub>3</sub>	-110,4

Tabla. A1.CCXXXV. Coeficientes de Antoine

### A1.C7.3.3. Propiedades críticas y temperaturas de ebullición normal

Se consignan en tabla las propiedades críticas precisadas y listadas *ut supra*, así como las temperaturas de ebullición normales:

Propiedades críticas y temperaturas normales de ebullición					
T <sub>1</sub> <sup>0</sup> (K) (normal)	268,7	P <sub>c1</sub> (atm)	42,7	Z <sub>c1</sub>	0,270
T <sub>2</sub> <sup>0</sup> (K) (normal)	276,9	P <sub>c2</sub> (atm)	41,5	Z <sub>c2</sub>	0,272
T <sub>3</sub> <sup>0</sup> (K) (normal)	434,9	P <sub>c3</sub> (atm)	55,9	Z <sub>c3</sub>	0,256
T <sub>c1</sub> (K)	425,0	V <sub>c1</sub> (L/mol)	0,221	ω <sub>1</sub>	0,195
T <sub>c2</sub> (K)	435,6	V <sub>c2</sub> (L/mol)	0,234	ω <sub>2</sub>	0,202
T <sub>c3</sub> (K)	670,2	V <sub>c3</sub> (L/mol)	0,252	ω <sub>3</sub>	0,3678

Tabla. A1.CCXXXVI. Propiedades críticas y temperaturas normales de ebullición

Tales propiedades se han plasmado respetándose el número de cifras significativas con que figuran en la bibliografía\*.

### A1.C7.3.4. Otras propiedades

Los pesos moleculares de las sustancias implicadas en el equilibrio se tabulan seguidamente:

\* The properties of gases & liquids. R. C. Reid, J. M. Prausnitz, B. E. Poling. McGraw-Hill. 4ª Edición.

Modelado del equilibrio líquido-vapor en mezclas binarias y ternarias de interés en destilación vónica. J. O. Valderrama, C. A. Faúndez. Revista Inf. Tecnol. Vol. 14 n° 1 (2003). Págs. 83-92.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Pesos moleculares	
$PM_1$ (g/mol)	54,092
$PM_2$ (g/mol)	56,108
$PM_3$ (g/mol)	96,1

Tabla. A1.CCXXXVII. Pesos moleculares

El parámetro de interacción  $k_{ij}$ , será despreciado debido al similar carácter químico de las especies hidrocarbonadas en equilibrio. No se presenta en la bibliografía indicación sobre la interacción posible entre el extractante y el resto de componentes, por lo que se decide hacer nulos todos los  $k_{ij}$ . La constante universal de los gases se tomará en el valor y unidades indicadas abajo:

$$k_{ij} = 0$$

$$R = 0,082057 \text{ atm}\cdot\text{L/mol}\cdot\text{K}$$

### A1.C7.3.5. Reglas de combinación de *Prausnitz*

La aplicación de las ecuaciones (A1.81.1) a (A1.81.5), proporciona el valor de las distintas variables cruzadas. Se considerará, además de los datos de  $R$  y  $k_{ij}$  del apartado anterior, los datos de la Tabla A1.CCXXXVI. Se obtendrán, por el siguiente orden:  $T_{cij}$ ,  $Z_{cij}$ ,  $V_{cij}$ ,  $P_{cij}$  y  $\omega_{cij}$ . Puesto que se tienen tres componentes, las interacciones de pares serán: 1-2, 1-3 y 2-3, en total 3 interacciones, (considerando que la interacción "ij" es la misma que la inversa "ji" y que la interacción "ii" es la propiedad pura ya tabulada en la Tabla A1.CCXXXVI).

Los resultados se consignan en la tabla siguiente:

Reglas de combinación de <i>Prausnitz</i>									
$T_{c12}$ (K)	430,2674	$Z_{c12}$	0,2710	$V_{c12}$ (L/mol)	0,2274	$P_{c12}$ (atm)	42,0688	$\omega_{12}$	0,1985
$T_{c13}$ (K)	533,6794	$Z_{c13}$	0,2630	$V_{c13}$ (L/mol)	0,2362	$P_{c13}$ (atm)	48,7675	$\omega_{13}$	0,2814
$T_{c23}$ (K)	540,2938	$Z_{c23}$	0,2640	$V_{c23}$ (L/mol)	0,2429	$P_{c23}$ (atm)	48,1869	$\omega_{23}$	0,2849

Tabla. A1.CCXXXVIII. Aplicación de las reglas de combinación de *Prausnitz*

### **A1.C7.4. Cálculos de temperatura (1)**

Conocidas las composiciones de fase líquida de cada equilibrio, así como los datos previos, puede iniciarse la secuencia de cálculo, tal como se desarrollará a partir de la presente sección.

Haciendo uso de los coeficientes de *Antoine*, listados en la Tabla A1.CCXXXV, se obtienen las temperaturas de saturación de cada componente en el equilibrio, por aplicación de la ecuación (A1.88) a la presión de trabajo de 9 atm.

Las temperaturas de saturación obtenidas de esta forma se listan a continuación:

$T_1^0$ (K)	$T_2^0$ (K)	$T_3^0$ (K)
342,945	352,573	547,745

Tabla. A1.CCXXXIX. Temperaturas de saturación a la presión de trabajo

Donde debe indicarse que la presión debe cambiarse convenientemente de unidades, (presión en bar), previa introducción en la ecuación (A1.88) para el caso del extractante furfural.

Las temperaturas de saturación por componente permiten evaluar una primera temperatura de equilibrio. Si se promedian los datos de la Tabla A1.CCXXXIX, ponderándose por las composiciones dadas en la Tabla A1.CCXXXII según:

$$T = \sum_i x_i T_i^0 = x_1 T_1^0 + x_2 T_2^0 + x_3 T_3^0 \quad (\text{A1.157})$$

Se encuentra, para el equilibrio:

Nº Equilibrio	$T_1$ (K)
1	517,427

Tabla. A1.CCXL. Primer cálculo de temperatura de equilibrio

### **A1.C7.5. Cálculo de presión de saturación (1)**

Conocida la temperatura de cada equilibrio, dada en la Tabla A1.CCXL, puede calcularse la presión de saturación de los componentes en cada equilibrio, aplicando la ecuación (A1.87), convenientemente despejada para la anterior magnitud:

$$(A1.169) \begin{cases} P_i^0(\text{mmHg}) = e^{A_i - \frac{B_i}{T(\text{K}) + C_i}} (A1.90) \\ P_3^0(\text{bar}) = e^{A_3 - \frac{B_3}{T(\text{K}) + C_3}} (1) \end{cases}$$

Donde (A1.90) continúa siendo válida para los hidrocarburos, mientras que para el furfural, debe considerarse (A1.169.1), idéntica en forma a (A1.90), con distintas unidades.

Operando con los datos de la Tabla A1.CCXXXV se obtiene:

Nº Equilibrio	$P_1^0$ (atm)	$P_2^0$ (atm)	$P_3^0$ (atm)
1	110,432	98,530	5,625

Tabla. A1.CCXXLI. Cálculo de presiones de saturación, conocida T

### **A1.C7.6. Cálculo de los coeficientes de actividad**

En esta sección se desarrollarán las ecuaciones del método UNIFAC, proporcionadas en el capítulo primero, al sistema en cuestión. Se presentará el proceso secuenciado de cálculo en distintos apartados.

#### **A1.C7.6.1. Cálculo de $r_i$**

De acuerdo a la ecuación (A1.86.1), para un sistema de tres componentes, los desarrollos consisten en las siguientes expresiones:

$$(A1.91) \left\{ \begin{array}{l} r_i = \sum_k v_k^{(i)} R_k \quad (A1.86.1) \\ r_1 = \sum_k v_k^{(1)} R_k \quad (1) \\ r_2 = \sum_k v_k^{(2)} R_k \quad (2) \\ r_3 = \sum_k v_k^{(3)} R_k \quad (3) \end{array} \right.$$

Donde se calcularán tantos  $r_i$  como componentes, multiplicando cada subgrupo por el número en que están presentes en la molécula que defina al compuesto "i", y sumando todos los productos. Los datos para ejecutar este cálculo vienen dados en la Tabla A1.CCXXXIII. Los distintos  $r_i$  así obtenidos se consignan en la siguiente:

$r_1$	2,2426	$r_2$	2,6960	$r_3$	3,1680
-------	--------	-------	--------	-------	--------

Tabla. A1.CCXLII. Cálculo de  $r_i$

#### A1.C7.6.2. Cálculo de $q_i$

De acuerdo a la ecuación (A1.86.2), para un sistema de cuatro componentes, los desarrollos se expresan como sigue:

$$(A1.92) \left\{ \begin{array}{l} q_i = \sum_k v_k^{(i)} Q_k \quad (A1.86.2) \\ q_1 = \sum_k v_k^{(1)} Q_k \quad (1) \\ q_2 = \sum_k v_k^{(2)} Q_k \quad (2) \\ q_3 = \sum_k v_k^{(3)} Q_k \quad (3) \end{array} \right.$$

Donde se calcularán tantos  $q_i$  como componentes, multiplicando cada subgrupo por el número en que están presentes en la molécula que defina al compuesto "i", y sumando todos los productos. Los datos para ejecutar este cálculo vienen dados en la Tabla

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

A1.CCXXXIII y los distintos  $q_i$  así obtenidos se consignan en la siguiente:

$q_1$	1,5360	$q_2$	2,1520	$q_3$	2,4810
-------	--------	-------	--------	-------	--------

Tabla. A1.CCXLIII. Cálculo de  $q_i$

### A1.C7.6.3. Cálculo de $e_{ki}$

El cálculo de  $e_{ki}$  está basado en la ecuación (A1.86.5). Dicha expresión implica todos los subgrupos  $k$  (del 1 al 3 y 61 para furfural), así como todas las especies desde  $i=1$  hasta  $i=3$ . Dado que para cada subgrupo, debe obtenerse una ecuación por componente, se precisarán 12 ecuaciones, que pueden tomarse de capítulos previos:

$$(A1.93) \left\{ \begin{array}{l} e_{11} = \frac{v_1^{(1)} Q_1}{q_1} (1); e_{12} = \frac{v_1^{(2)} Q_1}{q_2} (2); e_{13} = \frac{v_1^{(3)} Q_1}{q_3} (3) \\ e_{21} = \frac{v_2^{(1)} Q_2}{q_1} (7); e_{22} = \frac{v_2^{(2)} Q_2}{q_2} (8); e_{23} = \frac{v_2^{(3)} Q_2}{q_3} (9) \\ e_{31} = \frac{v_3^{(1)} Q_3}{q_1} (13); e_{32} = \frac{v_3^{(2)} Q_3}{q_2} (14); e_{33} = \frac{v_3^{(3)} Q_3}{q_3} (15) \end{array} \right.$$

$$(A1.129) \left\{ e_{61,1} = \frac{v_{61}^{(1)} Q_{61}}{q_1} (7); e_{61,2} = \frac{v_{61}^{(2)} Q_{61}}{q_2} (8); e_{61,3} = \frac{v_{61}^{(3)} Q_{61}}{q_3} (9) \right.$$

$e_{ki}$			
$k$	$i=1$	$i=2$	$i=3$
<b>1</b>	0,0000	0,7881	0,0000
<b>2</b>	0,7031	0,0000	0,0000
<b>3</b>	0,2969	0,2119	0,0000
<b>61</b>	0,0000	0,0000	1,0000

Tabla. A1.CCXLIV. Cálculo de  $e_{ki}$ .

Aplicando las ecuaciones mostradas de (A1.93) y (A1.129) sobre los datos consignados en las tablas A1.CCXXXIII y A1.CCXLIII, se ha obtenido lo presentado en la Tabla A1.CCXLIV.

#### A1.C7.6.4. Cálculo de $\tau_{mk}$

La ecuación (A1.86.6), proporciona el valor de  $\tau_{mk}$  mediante una función dependiente del parámetro de interacción,  $a_{mk}$ , (tabulado en A1.CCXXXIV) y la temperatura de equilibrio más actual, dada en la Tabla A1.CCLX.

Como en capítulos previos, el presente sistema involucra subgrupos correspondientes a distintos grupos principales, de modo que será preciso distinguir entre los  $\tau_{mk}$  derivados del cálculo de parámetros de interacción distintos de cero, de aquellos resultantes de interacciones nulas, (por corresponder los subgrupos al mismo grupo principal), cuyo valor sigue siendo la unidad por mor de lo expuesto en el capítulo segundo. Sea por tanto:

$\tau_{mk} = \tau_{kk}$
1

Tabla. A1.CCXLV. Valor de los  $\tau_{mk}$  para m y k distintos de 61

Los  $\tau_{mk}$ , para un subgrupo k distinto de 61, (el correspondiente al extractante) equivalen a la unidad, dado que los parámetros de interacción  $a_{mk}$  que les conciernen, pertenecen al mismo grupo principal, de donde la exponencial de (A1.86.6) se anula.

No puede establecerse lo mismo para aquéllos  $\tau_{mk}$ , donde los subíndices representen la interacción entre el extractante y cualquiera de los demás componentes. A continuación se presentarán en tablas. Lo que sí puede añadirse a la Tabla A1.CCXLV, es  $\tau_{kk}=1$ , cualquiera que sea k, como corresponde a las interacciones de un subgrupo consigo mismo.

Por todo lo razonado, los  $\tau_{mk}$  distintos de la unidad deben ser:  $\tau_{1,61}$ ,  $\tau_{2,61}$ ,  $\tau_{3,61}$ ,  $\tau_{61,1}$ ,  $\tau_{61,2}$  y  $\tau_{61,3}$ . Considerando que todos los subgrupos pertenecientes a un mismo grupo principal presentan la misma interacción con los subgrupos de otro grupo, (atendiendo a la Tabla A1.II), se tiene que los  $\tau_{61,k}$  son iguales para k de 1 a 3, puesto que

tales subgrupos pertenecen a un mismo grupo, como queda explicado. De la misma forma los  $\tau_{m,61}$  son también iguales para m de 1 a 3.

Argumentadas estas peculiaridades del parámetro  $\tau_{mk}$  y aplicando (A1.86.6), sobre los datos mencionados al comienzo de este apartado se obtiene:

Nº Equilibrio	$\tau_{1,61} = \tau_{2,61} = \tau_{3,61}$	$\tau_{61,1} = \tau_{61,2} = \tau_{61,3}$
1	0,504	1,050

Tabla. A1.CCXLVI. Valor de los  $\tau_{mk}$

De lo que se deduce que, si este parámetro, el único dependiente de la temperatura para el cálculo de los coeficientes de actividad, en este caso es variable debido a la interacción de los subgrupos; obligatoriamente será preciso recalcular tanto los  $\tau_{mk}$  como los propios coeficientes de actividad, cada vez que se actualice la temperatura. De forma contraria a los capítulo segundo, quinto y sexto, en esta ocasión no se ahorra el bucle iterativo de los coeficientes de actividad, y el proceso de cálculo será tan completo como muestra la Figura A1.1.

#### A1.C7.6.5. Cálculo de $\beta_{ik}$

Partiendo de la ecuación (A1.86.7), se tiene una expresión que va en todos los componentes y subgrupos, de donde el desarrollo pertinente, incluye 12 ecuaciones. La expresión (A1.94), recogió las expresiones precisas para el cálculo de  $\beta_{ik}$ , considerando que todos los  $\tau_{mk}$  valían la unidad, dado que no entraba en juego un subgrupo que presentase interacción con el resto. En este caso no se verifica este hecho para todos los casos, si bien pueden efectuarse las simplificaciones que seguidamente se razonan. Sea:

$$\beta_{ik} = \sum_m e_{mi} \tau_{mk} \quad (A1.86.7)$$

Desarrollando para  $i=1$ , se obtiene (A1.141), del capítulo cuarto, que es válido para este caso. Se observa que los primeros tres

sumandos de las  $\beta_{ik}$  para cualquier  $k$  del grupo “Alcano”, multiplican por un  $\tau_{mk}$  que supone la unidad, según lo ya demostrado; el cuarto sumando multiplica por un  $e_{ki}$ , que según la Tabla A1.CCXLIV, es nulo, por lo que no contribuye a la suma. De esta forma, las ecuaciones (A1.141.1) a (A1.141.3), se reducen a las dadas en (A1.94)\*, esto es, al sumatorio de  $e_{ki}$  para un componente fijo, por lo que puede generalizarse lo siguiente:

$\beta_{ik}$
1

Tabla. A1.CCXLVII. Valores de  $\beta_{ik}$  con  $k \neq 65$  e  $i \neq 3$

Cuando  $k$  corresponde al subgrupo del extractante furfural se observa, en (A1.141.4), que los cuatro primeros  $\tau_{mk}$ , según el apartado anterior, son coincidentes en valor, por lo que pueden extraerse como factor común:

$$\beta_{1,61} = \tau_{1,61}(e_{11} + e_{21} + e_{31})$$

El último sumando de (A1.141.4) se anula, puesto que  $e_{61,1}$  es cero, como se apuntó anteriormente. Asimismo, se demostró en el capítulo segundo, que la suma de los  $e_{ki}$  para un componente fijo resulta la unidad, de donde:

$$\beta_{1,61} = \tau_{1,61}$$

Lo que puede generalizarse como:

$$\beta_{ik} = \tau_{ik}$$

Para cualquier componente distinto del tercero, (el extractante) y para  $k$  correspondiente al furfural. Por último, para  $i=3$ , se tiene:

\* En (A1.94), se consideró un sistema en el que estaba presente un subgrupo  $k=4$ . Dado que no es caso, tales expresiones son válidas para el presente capítulo, si se elimina el sumando correspondiente a  $k=4$ , a la sazón, el último.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

$$(A1.170) \left\{ \begin{array}{l} \beta_{31} = e_{13}\tau_{11} + e_{23}\tau_{21} + e_{33}\tau_{31} + e_{61,3}\tau_{61,1} (1) \\ \beta_{32} = e_{13}\tau_{12} + e_{23}\tau_{22} + e_{33}\tau_{32} + e_{61,3}\tau_{61,2} (2) \\ \beta_{33} = e_{13}\tau_{13} + e_{23}\tau_{23} + e_{33}\tau_{33} + e_{61,3}\tau_{61,3} (3) \\ \beta_{3,61} = e_{13}\tau_{1,61} + e_{23}\tau_{2,61} + e_{33}\tau_{3,61} + e_{61,3}\tau_{61,61} (4) \end{array} \right.$$

En la expresión (A1.170), en todas las ecuaciones los tres primeros sumandos multiplican por  $e_{ki}$  nulos, mientras que  $e_{61,3}$  supone la unidad, luego (A1.142) se reduce a lo que sigue:

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta_{31} = \tau_{61,1} (1) \\ \beta_{32} = \tau_{61,2} (2) \\ \beta_{33} = \tau_{61,3} (3) \\ \beta_{3,61} = \tau_{61,61} = 1 (4) \end{array} \right.$$

En definitiva, se tiene:

Nº Equilibrio	$\beta_{1,61} = \beta_{2,61}$	$\beta_{3,1} = \beta_{3,2} = \beta_{3,3}$
1	0,504	1,050

Tabla. A1.CCXLVIII. Valor de las  $\beta_{ik}$

La cuarta expresión de la última llave produce:

$\beta_{3,61}$
1

Tabla. A1.CCXLIX. Valores de  $\beta_{ik}$

El razonamiento del presente apartado, que ha permitido tabular los datos de las  $\beta_{ik}$  ha requerido datos de las tablas A1.CCXLIV a A1.CCXLVI.

### A1.C7.6.6. Cálculo de $\theta_k$

Se parte de la ecuación (A1.86.8) y, puesto que ésta sólo va en los subgrupos k, se tendrán cuatro ecuaciones:

$$(A1.171) \left\{ \begin{array}{l} \theta_k = \frac{\sum_i x_i q_i e_{ki}}{\sum_j x_j q_j} \quad (A1.86.8) \\ \theta_1 = \frac{x_1 q_1 e_{11} + x_2 q_2 e_{12} + x_3 q_3 e_{13}}{x_1 q_1 + x_2 q_2 + x_3 q_3} \quad (1) \\ \theta_2 = \frac{x_1 q_1 e_{21} + x_2 q_2 e_{22} + x_3 q_3 e_{23}}{x_1 q_1 + x_2 q_2 + x_3 q_3} \quad (2) \\ \theta_3 = \frac{x_1 q_1 e_{31} + x_2 q_2 e_{32} + x_3 q_3 e_{33}}{x_1 q_1 + x_2 q_2 + x_3 q_3} \quad (3) \\ \theta_{61} = \frac{x_1 q_1 e_{61,1} + x_2 q_2 e_{61,2} + x_3 q_3 e_{61,3}}{x_1 q_1 + x_2 q_2 + x_3 q_3} \quad (4) \end{array} \right.$$

Para la obtención de los  $\theta_k$ , se aplica (A1.171) sobre los datos consignados en las tablas A1.CCXXXII y A1.CCXLIII a A1.CCXLIV. Se obtiene:

Nº Equilibrio	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_{61}$
1	0,058	0,032	0,029	0,881

Tabla. A1.CCL. Cálculo de  $\theta_k$

#### A1.C7.6.7. Cálculo de $s_k$

Atendiendo a la ecuación (A1.86.9), se desarrolla lo mostrado en la expresión (A1.144), válido para el capítulo presente. Por aplicación de ésta a los datos consignados en las tablas A1.CCXLV a A1.CCXLVI y A1.CCL, se obtiene:

Nº Equilibrio	$s_1$	$s_2$	$s_3$	$s_{61}$
1	0,119	0,119	0,119	0,941

Tabla. A1.CCLI. Cálculo de  $s_k$

#### A1.C7.6.8. Cálculo de $J_i$

La ecuación (A1.86.3) proporciona el valor de  $J_i$ . Al desarrollar para los tres componentes involucrados en el sistema descrito en el presente capítulo, se tienen las ecuaciones dadas por (A1.97), que continúan siendo válidas, (hasta el tercer componente).

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Por aplicación de dichas ecuaciones a los datos consignados en las tablas A1.CCXXXII y A1.CCXLII, se calcula:

Nº Equilibrio	$J_1$	$J_2$	$J_3$
1	0,732	0,880	1,034

Tabla. A1.CCLII. Cálculo de  $J_i$

### A1.C7.6.9. Cálculo de $L_i$

La ecuación (A1.86.4) proporciona el valor de  $L_i$ . Al desarrollar para los tres componentes involucrados en el sistema descrito en el presente capítulo, se tienen las ecuaciones dadas por (A1.98), que continúan siendo válidas, (hasta el tercer componente).

Por aplicación de dichas ecuaciones a los datos consignados en las tablas A1.CCXXXII y A1.CCXLIII, se calcula:

Nº Equilibrio	$L_1$	$L_2$	$L_3$
1	0,643	0,901	1,039

Tabla. A1.CCLIII. Cálculo de  $L_i$

### A1.C7.6.10. Cálculo del coeficiente de actividad combinatorio

El coeficiente de actividad combinatorio se calcula, para cada especie, según la expresión (A1.85.1). Su desarrollo produce las ecuaciones mostradas en (A1.99), que continúan siendo válidas, (hasta el tercer componente).

Por aplicación de tales ecuaciones a los datos consignados en las tablas A1.CCXLIII y A1.CCLII a A1.CCLIII, se obtiene:

Nº Equilibrio	$\ln\gamma_1^C$	$\ln\gamma_2^C$	$\ln\gamma_3^C$
1	0,023	-0,005	0,000

Tabla. A1.CCLIV. Cálculo del coeficiente de actividad combinatorio

### A1.C7.6.11. Cálculo del coeficiente de actividad residual

La evaluación del coeficiente de actividad residual requiere el desarrollo de la ecuación (A1.85.2). En esta ocasión no pueden efectuarse las simplificaciones del capítulo segundo en todos los casos, por lo que el desarrollo de la expresión para el coeficiente de actividad residual produce lo mostrado en las ecuaciones (A1.145) a (A1.147), válidas para el sistema en juego.

Aplicando tales ecuaciones a los  $q_i$  listados en la Tabla A1.CCXLI, los  $\theta_k$  mostrados en la Tabla A1.CCL, las  $\beta_{ik}$  consignadas en las tablas A1.CCXVII a A1.CCXIX, los  $s_k$  tabulados en A1.CCLI y los  $e_{ki}$  dados en la Tabla A1.CCXIV, se obtiene:

Nº Equilibrio	$\ln\gamma_1^R$	$\ln\gamma_2^R$	$\ln\gamma_3^R$
1	2,550	3,573	-2,297

Tabla. A1.CCLV. Cálculo del coeficiente de actividad residual

### A1.C7.6.12. Cálculo del coeficiente de actividad

Conocidos los coeficientes de actividad combinatorio y residual, aplicando exponenciales en la expresión (A1.84) y despejando convenientemente se obtiene (A1.101), que continúa siendo de aplicación. Introduciendo en tal expresión los datos de las tablas A1.CCLIV a A1.CCLV, se obtiene:

Nº Equilibrio	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$
1	13,099	35,443	0,100

Tabla. A1.CCLVI. Primer cálculo de coeficientes de actividad

### A1.C7.7. Cálculo de la presión de saturación (2)

En la sección A1.C7.5, se obtuvo un primer valor de presión de saturación por componente, por aplicación de la ecuación de *Antoine*. En este caso, se recalcularán dichas presiones a través de expresiones deducidas directamente de la ecuación del criterio fundamental del equilibrio termodinámico. Esta primera afinación, permitirá incluir

los coeficientes de actividad recién estimados. Serán de aplicación las ecuaciones (A1.160) a (A1.162) para un sistema de tres componentes.

Tales expresiones se aplican a la presión de trabajo dada en la sección A1.C7.2, los coeficientes de actividad recién dilucidados, Tabla A1.CCLVI, las composiciones de fase líquida dadas en la Tabla A1.CCXXXII y las presiones de saturación más actuales, consignadas en la Tabla A1.CCXLI. Fijando los  $\phi_i$  a la unidad, suponiendo idealidad del sistema, se obtiene:

Nº Equilibrio	$P_1^0$ (atm)	$P_2^0$ (atm)	$P_3^0$ (atm)
1	2,576	2,298	0,131

Tabla. A1.CCLVII. Cálculo de presiones de saturación, según el criterio fundamental del equilibrio

### **A1.C7.8. Cálculos de temperatura y coef. de actividad (2)**

A partir de las presiones de saturación de cada componente en el equilibrio, es posible recalcular la temperatura del mismo aplicando la ecuación (A1.112) y promediando las temperaturas de cada componente en el equilibrio. Los datos requeridos vienen dados por las tablas A1.CCXXXV y A1.CCLVII, esto es, los coeficientes de *Antoine* y las presiones de saturación más recientes, respectivamente. Se obtiene:

Nº Equilibrio	$T_1^0$ (K)	$T_2^0$ (K)	$T_3^0$ (K)	$T_2$ (K)
1	295,820	300,857	372,288	322,988

Tabla. A1.CCLVIII. Segundo cálculo de T de equilibrio

Con la temperatura recién recalculada\*, debe reiterarse el cálculo de los coeficientes de actividad, operación que ya en el capítulo segundo se vinculó a la actualización de la temperatura.

\* La ecuación (A1.112) es de aplicación para los compuestos 1 y 2. También lo es para el extractante furfural introduciendo la presión en bar.

Deben por tanto rehacerse los cálculos presentados en los apartados A1.C7.6.1 a A1.C7.6.12. Los resultados correspondientes a los tres primeros apartados permanecen invariantes, dado que son independientes de la temperatura. En el apartado A1.C7.6.4, donde se piden datos de temperatura de la Tabla A1.CCXL, (correspondiente a la primera temperatura calculada), se sustituyen por los de la Tablas A1.CCLVIII, esto es, las temperaturas recién recalculadas, y se opera de la misma forma, para obtener una segunda batería de coeficientes de actividad vinculados a la segunda temperatura calculada del equilibrio:

Nº Equilibrio	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$
1	16,562	49,229	0,093

Tabla. A1.CCLIX. Segundo cálculo de coeficientes de actividad

### **A1.C7.9. Cálculo de la presión de saturación (3)**

La nueva temperatura del equilibrio permite actualizar, así como los coeficientes de actividad, las presiones de saturación por aplicación de las ecuaciones (A1.90) y (A1.169.1), según convenga, a los parámetros de *Antoine* listados en la Tabla A1.CCXXXV y las temperaturas obtenidas en la sección anterior. Así, se obtiene:

Nº Equilibrio	$P_1^0$ (atm)	$P_2^0$ (atm)	$P_3^0$ (atm)
1	5,570	4,378	0,011

Tabla. A1.CCLX. Cálculo de presiones de saturación, conocida T

### **A1.C7.10. Cálculo de la composición de vapor**

Con la temperatura del equilibrio y las presiones de saturación actualizadas, pueden determinarse las composiciones de los componentes en el vapor. Para ello, se aplica la ecuación (A1.113), (hasta el tercer componente) a los datos consignados en las tablas A1.CCLIX, A1.CCXXXII, A1.CCLX y la presión consignada en la sección A1.C7.2. Tomando los  $\Phi_i$  como la unidad, suponiendo idealidad del sistema, se obtiene:

Nº Equilibrio	$y_1$	$y_2$	$y_3$
1	0,726	1,940	0,000

Tabla. A1.CCLXI. Cálculo de composiciones de fase vapor

### **A1.C7.11. Cálculo de los $\Phi_i$**

Cuando son conocidas las composiciones de vapor, se ha determinado, junto con la temperatura, las variables perseguidas concordantes con la composición de la fase líquida y presión introducidas. Hasta el momento se ha determinado el valor de los coeficientes de actividad, lo que supone una caracterización de la medida en que la fase líquida se aleja de la idealidad. Resta encontrar el valor de los coeficientes de fugacidad que efectuarán lo propio con la fase vapor, y permitirán recalcular tanto la temperatura de los equilibrios como las composiciones de vapor, hasta la convergencia. Como procede con las variables mostradas, cada vez que se recalculen los coeficientes de fugacidad, se obtendrá una nueva composición de vapor y temperatura de equilibrio hasta lograr tal convergencia.

La sección actual se dividirá en varios apartados donde se calcularán las distintas variables de que dependen los  $\Phi_i$ .

#### **A1.C7.11.1. Cálculo de temperaturas reducidas puras y cruzadas**

La temperatura reducida cruzada se definió junto con las reglas de combinación de *Prausnitz* en el capítulo primero. Ésta adopta la expresión (A1.81.6). Para la temperatura reducida pura, se indicó también la validez de la anterior, siempre que se hicieran coincidir los subíndices, lo que se mostró previamente en (A1.114).

Como se mostró en el apartado A1.C7.3.5, se tienen 3 interacciones “*ij*”, que dan lugar a otras tantas temperaturas reducidas cruzadas. También se tienen tres temperaturas reducidas puras, (una por componente). Aplicando (A1.81.6) y (A1.114) al último dato de temperatura disponible, dado por la Tabla A1.CCLVIII, y a las tempe-

raturas críticas y críticas cruzadas dadas por las tablas A1.CCXXXVI y A1.CCXXXVIII, se obtiene:

Nº Equilibrio	$T_{r1}$	$T_{r2}$	$T_{r3}$
1	0,760	0,741	0,482

Tabla. A1.CCLXII. Temperaturas reducidas puras

Nº Equilibrio	$T_{r12}$	$T_{r13}$	$T_{r23}$
1	0,751	0,605	0,598

Tabla. A1.CCLXIII. Temperaturas reducidas cruzadas

### A1.C7.11.2. Cálculo de coeficientes viriales puros y cruzados

Los coeficientes viriales segundos, B, se determinan aplicando (A1.80). Esta ecuación es válida tanto para coeficientes viriales cruzados como para los puros, cuando se hacen coincidir los subíndices, como queda mostrado en la expresión (A1.115)

Como en el apartado anterior, existen tantos coeficientes viriales cruzados como interacciones entre pares de moléculas: 3 coeficientes. También se calculan tres coeficientes viriales puros, uno por componente.

Aplicando (A1.115) a R, cuyo valor se fijó en el apartado A1.C7.3.4, y los datos dados en las tablas A1.CCXXXVI y A1.CCXXXVIII y las tablas A1.CCLXII a A1.CCLXIII, se obtienen, en unidades de L/mol, los siguientes coeficientes:

Nº Equilibrio	$B_1$	$B_2$	$B_3$
1	-0,532	-0,596	-2,539

Tabla. A1.CCLXIV. Coeficientes viriales puros

Nº Equilibrio	$B_{12}$	$B_{13}$	$B_{23}$
1	-0,563	-1,095	-1,163

Tabla. A1.CCLXV. Coeficientes viriales cruzados

### A1.C7.11.3. Cálculo de coeficientes delta puros y cruzados

Los coeficientes delta cruzados se obtienen por combinación lineal de los coeficientes viriales segundos como se indicaba en (A1.77.2). Por aplicación de esta ecuación a los datos de las tablas A1.CCLXIV a A1.CCLXV, se obtienen los 3 coeficientes delta cruzados, en las mismas unidades que los coeficientes viriales segundos, correspondientes a las interacciones de pares de moléculas:

Nº Equilibrio	$\delta_{12} \cdot 10^3$	$\delta_{13}$	$\delta_{23}$
1	1,242	0,881	0,809

Tabla. A1.CCLXVI. Coeficientes delta cruzados

### A1.C7.11.4. Cálculo de volúmenes de líquido saturado

Los volúmenes de líquido saturado se estiman mediante la ecuación de *Rackett*, propuesta en la expresión (A1.82). Los datos requeridos se toman de las tablas A1.CCXXXVI y A1.CCLXII y los resultados se listan en la siguiente tabla:

Nº Equilibrio	$V_1^L$	$V_2^L$	$V_3^L$
1	0,093	0,097	0,081

Tabla. A1.CCLXVII. Volúmenes de líquido saturado

Los volúmenes están dados en L/mol, al igual que los volúmenes críticos.

### A1.C7.11.5. Cálculo de $\Phi_i$

Atendiendo a la expresión (A1.118), para un sistema de tres componentes, procede aplicar al cálculo de los  $\Phi_i$  las ecuaciones contenidas en (A1.163).

La aplicación de éstas a la presión de trabajo, dada en la sección A1.C7.2, las últimas presiones de saturación de los componentes, listadas en la Tabla A1.CCLX, los coeficientes viriales segundos puros, dados en la Tabla A1.CCLXIV, los volúmenes de líquido satu-

rado tabulados en A1.CCLXVII, las composiciones de vapor consignadas en la Tabla A1.CCLXI, los coeficientes delta cruzados presentados en la Tabla A1.CCLXVI, y la última temperatura de equilibrio en A1.CCLVIII, conocido R; se obtiene:

Nº Equilibrio	$\Phi_1$	$\Phi_2$	$\Phi_3$
1	0,924	0,886	3,037

Tabla. A1.CCLXVIII. Cálculo de los  $\Phi_i$

#### **A1.C7.12. Cálculo de la presión de saturación (4)**

Conocidos los  $\Phi_i$ , pueden actualizarse las presiones de saturación de los componentes en equilibrio, por aplicación de las ecuaciones (A1.160) a (A1.162) a los datos de presión, dada en la sección A1.C7.2, los últimos coeficientes de actividad listados en la Tabla A1.CCLIX, las composiciones dadas en la Tabla A1.CCXXXII, las últimas presiones de saturación calculadas, tabuladas en A1.CCLX y los datos de la Tablas A1.CCLXVIII; se recalculan:

Nº Equilibrio	$P_1^0$ (atm)	$P_2^0$ (atm)	$P_3^0$ (atm)
1	1,873	1,472	0,004

Tabla. A1.CCLXIX. Cálculo de  $P_i^0$  conocidos los  $\Phi_i$

#### **A1.C7.13. Cálculos de temperatura y coef. de actividad (3)**

De nuevo, siguiendo el esquema iterativo, una vez actualizadas las presiones de saturación, procede realizar lo propio con la temperatura del equilibrio. Para ello, se procede como en la sección A1.C7.8, empleando los datos más recientes de presiones de saturación, tomados del apartado anterior; y se obtienen los siguientes datos:

Nº Equilibrio	$T_1^0$ (K)	$T_2^0$ (K)	$T_3^0$ (K)	$T_3$ (K)
1	286,022	287,449	306,524	293,332

Tabla. A1.CCLXX. Tercer cálculo de T de equilibrio

Como puede observarse, la dispersión de las temperaturas de saturación alrededor de la media comienza a reducirse, respecto al anterior cálculo de temperaturas, como fruto de la convergencia creciente de los datos en torno al equilibrio. Las temperaturas de saturación deben ser coincidentes, puesto que todos los componentes vaporizan a la misma temperatura en equilibrio.

Puesto que los coeficientes de actividad son dependientes de la temperatura, sus valores han de recalcularse. Para ello, se repiten los pasos dependientes de la temperatura, (cambiando a la de la Tabla A1.CCLXX), dentro de la sección A1.C7.6, para la obtención del coeficiente de actividad. Con esto se obtiene un nuevo valor recalculado, tal como se indicó en la anterior sección de obtención de la temperatura del equilibrio:

Nº Equilibrio	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$
1	17,403	52,767	0,091

Tabla. A1.CCLXXI. Tercer cálculo de coeficientes de actividad

Seguidamente, procedería obtener la presión de saturación, para la nueva temperatura de equilibrio, como se practicó en la sección A1.C7.9, de forma que se ha cerrado el ciclo, puesto que al volver sobre uno de los pasos, estos deberán repetirse tantas veces como se precise, hasta que la convergencia obtenida sea satisfactoria. Desde A1.C7.9 hasta A1.C7.13, se reiterará lo descrito en cada una de tales secciones, a los datos más actuales.

#### **A1.C7.14. Comprobación de la convergencia**

Se presenta en esta sección el criterio de evaluación de la convergencia, que permitirá decidir en qué punto puede concluirse el bucle de cálculo: tras cada obtención de una nueva temperatura de equilibrio, (comenzando por la tercera, dada en la sección anterior), se planteará la verificación de la ecuación del criterio del equilibrio termodinámico. A este fin, se calcula para cada componente el valor de cada miembro de la ecuación, y se decide según la diferencia en-

tre ambos, en términos absolutos. La primera verificación se tabula seguidamente:

Nº Equilibrio	$y_1\Phi_1P$	$x_1\gamma_1P_1^0$	$\Delta$	$y_2\Phi_2P$	$x_2\gamma_2P_2^0$	$\Delta$	$y_3\Phi_3P$	$x_3\gamma_3P_3^0$	$\Delta$
1	6,038	1,738	4,300	15,474	4,226	11,248	0,003	0,000	0,002

Tabla. A1.CCLXXII. Verificación del criterio de equilibrio termodinámico

Donde se han tomado las composiciones de vapor de la sección A1.C7.10, los  $\Phi_i$  de la sección A1.C7.11, la presión de A1.C7.2, la composición de fase líquida de A1.C7.1, los coeficientes de actividad de la sección A1.C7.8 y las presiones de saturación de A1.C7.12. Cada vez que se reiteran los cálculos de A1.C7.13, se verifica el criterio fundamental del equilibrio termodinámico, con los datos actualizados.

### **A1.C7.15. Datos de equilibrio**

Cuando se reitera el cálculo en diecisiete ocasiones, se obtienen errores inferiores al octavo decimal. Los datos finales de equilibrio, para cada sistema, tomados de la decimoséptima iteración, se tabulan para cerrar el capítulo:

Nº Equilibrio	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$T_{19}$ (K)
1	0,269	0,731	0,000	278,788

Tabla. A1.CCLXXIII. Composiciones de la fase vapor en equilibrio

Donde las composiciones de vapor de la Tabla A1.CCLXXIII se encuentran en equilibrio, a la temperatura listada en la misma tabla, con las de líquido en la Tabla A1.CCXXXII, a la presión recogida en la sección A1.C7.2.



# Documento 1. Memoria

---

## Anexo 2. Diseño de unidades

1. Diseño de "SIMPLE"
2. Resolución de "EXTRACTIVA 1"
3. Resolución de "EXTRACTIVA 2"
4. Resolución de "MÚLTIPLE"
5. Resolución de "BINARIA"
6. Diseño de "RECUPERACIÓN"
7. Estrategia de recirculaciones



---

## **Capítulo A2.C1. Diseño de “SIMPLE”**

### **A2.C1.1. Introducción**

El anexo primero, de generación de datos termodinámicos, ha permitido caracterizar las condiciones de presión, temperatura y composición de las distintas corrientes que involucrará el proceso de separación que intitula el presente PFC.

Como se ha podido observar a partir de las distintas tablas que mostraban algunos equilibrios en particular, hasta el momento se ha jugado con la ventaja de conocer cuáles eran las composiciones de fase líquida para las unidades de separación necesarias. Se hace preciso aclarar el hecho de que el cálculo sucedió justo en orden inverso, esto es, en primer lugar se balancearon y calcularon, una tras otra, las corrientes y unidades respectiva y sucesivamente, mientras que, de forma paralela, se generaban los datos de equilibrio que se iban precisando.

Por lo antedicho, en este anexo se dará cumplida justificación de la selección de las composiciones de fase líquida fijadas en la generación de datos de equilibrio; que estriba en la necesidad de proveer, de datos que caractericen las distintas corrientes a la intención de practicar los distintos balances de materia.

Para concluir las explicaciones dadas en estos primeros párrafos, y antes de iniciar la introducción propiamente dicha del presente capítulo inicial, debe incidirse en que el procedimiento de cálculo de unidades, ejecución de balances y generación de datos de equilibrio, se ha efectuado de forma paralela, en los términos ya reflejados. La ordenación, por tanto, de los anexos primero y segundo responde al principio aristotélico de priorizar lo general y deducir lo particular: primero se caracterizan las corrientes, (sus condiciones) y seguidamente se determina su flujo particular en el proceso de estudio, sin perjuicio de que la aplicación de lo mostrado en tales anexos haya sido conjunta.

En este segundo anexo se tratará el balanceo de unidades de forma conjunta al diseño de las mismas. Lo primero permitirá conocer el flujo de las corrientes que parten de cada una ellas, al tiempo que lo segundo proveerá de las ecuaciones precisas para obtener un sistema compatible y determinado, (una vez fijadas las variables de diseño, sólo debe obtenerse una solución que se optimizará en función de éstas).

De forma más concreta, este capítulo describirá la primera operación del proceso diseñado por el PFC y denominada "SIMPLE". En ella, la alimentación se vaporiza parcialmente con la intención de eliminar el componente más pesado, aprovechando no tanto el diferente carácter químico como la escasa cantidad del mismo, lo que permite obtener una corriente con un contenido despreciable en dicho componente más pesado.

Seguidamente, se diseñarán las operaciones de destilación en columnas de platos, (en lo que a caracterización de las corrientes y número de etapas de equilibrio se refiere). Se tienen dos destilaciones extractivas, una múltiple y una última binaria. El método de resolución para las primeras, que involucran más de dos componentes, será el conocido método de FUG, mientras que la resolución de la operación binaria requerirá el método de cálculo de *McCabe-Thiele*.

La operación de recuperación del agente extractante para las destilaciones extractivas se diseñará de modo similar a la primera operación, puesto que consiste básicamente en vaporizar los ligeros que acompañan a dicho agente cuando ha culminado su labor.

Finalmente se expondrá y justificará la necesidad de efectuar recirculaciones, a fin de garantizar un mejor aprovechamiento de las corrientes excedentes. Tales corrientes suponen una pérdida sustancial del componente de interés, así como un consumo insostenible del agente extractante, que, pese a recuperarse, no puede obtenerse con una pureza suficiente que permita su mezcla directa sin alterar la composición de la alimentación de las distintas operaciones. Por tal

razón se planteará la obtención de una corriente de recirculación, que garantice la composición constante de la alimentación de la primera destilación extractiva.

Valga esta introducción al objeto de situar los cálculos de diseño y balance de unidades dentro del proceso justificativo, que se desarrolla en los anexos a la memoria, así como para indicar el orden de los capítulos que comprenderá el presente anexo.

### **A2.C1.2. Balance y diseño de “SIMPLE”**

La operación “SIMPLE”, primer paso del tren de separación propuesto para la obtención del componente de interés, es una destilación sencilla en etapa simple. Considérese la figura que se muestra seguidamente:

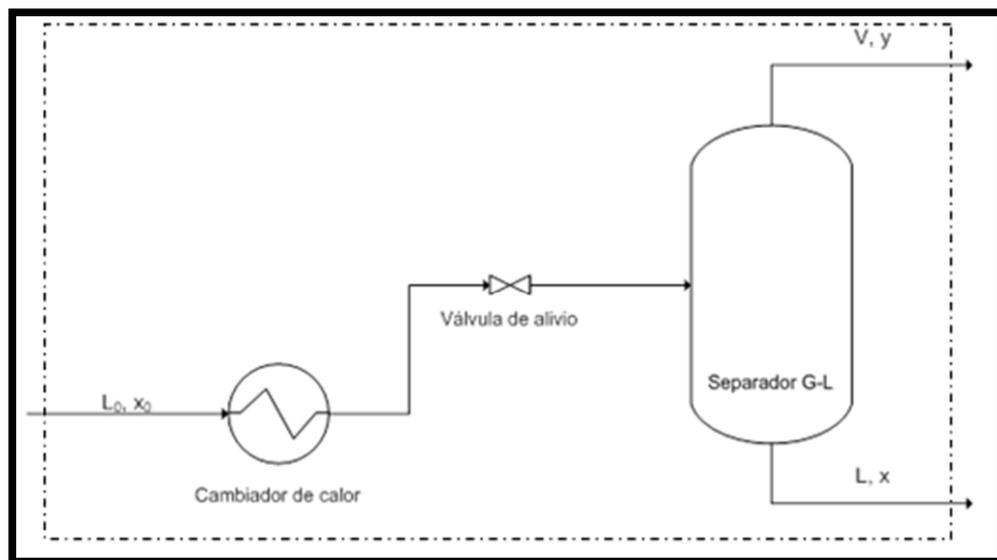


Figura. A2.1. Esquema de una destilación simple. (Elaboración propia)

En una destilación simple, la alimentación previamente acondicionada, (calentada o enfriada según convenga), se descomprime previo paso a un separador de fase que, dependiendo de la relación altura-diámetro requerida, podrá construirse horizontal o verticalmente. La descompresión ocasiona una súbita escisión del líquido y el vapor, de modo que proporcionando el suficiente tiempo de contacto,

(para el que se diseña el separador), se logra una separación de líquido y vapor en equilibrio. Dicho vapor puede o no condensarse en función de las necesidades futuras.

En el caso que ocupa a este PFC, la destilación de "SIMPLE" consiste en una vaporización, por el método descrito, de la alimentación bruta del proceso. Como se ha mencionado en varias ocasiones, el interés de la operación estriba en la eliminación del componente más pesado que apenas aparece en el vapor. Por consiguiente, se hace menester describir con precisión la corriente de alimentación general del proceso y, por ende, de la primera operación.

La bibliografía consultada<sup>\*</sup> permite establecer una primera composición, que se precisará afinar, para la alimentación. En los apartados introductorios de la citada tesis se indica que las fracciones de hidrocarburos  $C_4$ , (o fracción de butanos tal como se menciona en el título del PFC), están constituidas fundamentalmente por mezclas de n-butano, i-butano, 1-buteno, cis-2-buteno, i-buteno y butadieno.

Su origen viene derivado de la actividad de las plantas de craqueo, cuya función principal consiste romper parafinas de mayor o menor peso molecular, (dependiendo de la alimentación así se decidirá la severidad del craqueo), al objeto de obtener gasolinas y olefinas, principalmente etileno y propileno. La fracción de butanos se origina por tanto, como subproducto del craqueo.

La cantidad y composición de la citada fracción  $C_4$  depende fundamentalmente de la alimentación al proceso de craqueo, (gas natural, nafta o gasóleo), de la modalidad de craqueo, (térmico o catalítico) y de la severidad del mismo.

En lo que a modalidad de craqueo se refiere, el catalítico, más orientado a la producción de gasolinas a partir de fracciones de me-

---

<sup>\*</sup> Conversión de n-butano en hidrocarburos aromáticos con catalizadores de zeolita ZSM-5. *J. C. Ramírez Camacho*. Tesis doctoral, Madrid 1995.

nor valor, rinde olefinas ligeras, etileno y principalmente propileno, en su correspondiente fracción de gases licuados de petróleo o GLP.

Dicha fracción de GLP contiene asimismo cierta cantidad de butilenos, (olefinas de cuatro carbonos), que se separa de una fracción C<sub>3</sub> en una columna denominada “despropanizadora”. La corriente de butilenos es rica en isobuteno, compuesto útil para la producción de ETBE, un aditivo de las gasolinas. El resto de olefinas, cis-2-buteno, 1-buteno y butadieno, se encuentran en baja proporción y se alimentan a la operación de alquilación, donde se prepara otro aditivo de las gasolinas que mejora su octanaje por ramificación de las parafinas.

En definitiva, lo que puede concluirse del craqueo catalítico es que su objetivo decididamente es inconsistente con el del presente PFC, dado que dicha operación se centra en rentabilizar en gasolinas fracciones de escaso valor de refinería, (su rendimiento en gasolinas supone prácticamente la mitad en peso). Aunque inevitablemente produce olefinas y, entre ellas, butadieno, no rinde proporciones suficientes como para plantear un proceso para su recuperación. Por tal razón las corrientes que contienen butilenos se aplican a la formulación de distintos aditivos para gasolina comercial.

El craqueo térmico, por su parte, es una operación en comparación bastante más sencilla, que persigue, por calentamiento de fracciones más o menos pesadas, la rotura de parafinas pesadas y formación de olefinas. Según la Guía de Mejores Técnicas Disponibles para el sector del refino, publicada por el Ministerio de Medio Ambiente, la práctica totalidad del butadieno demandado en el mundo se obtiene a partir de corrientes derivadas del proceso “*steam cracking*”, una variante de craqueo térmico, conocida en español como pirólisis con vapor. En este proceso, diferentes cargas de refinería, (las que se han mostrado previamente), se someten a un calentamiento severo, (en torno los 850 °C), durante un breve lapso de tiempo, en presencia de vapor de agua en proporciones que oscilan el 20-50% de la carga alimentada.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

El proceso rinde mezclas complejas de olefinas ligeras, aromáticos inferiores y, en cantidades variables GLP, hidrógeno y parafinas pesadas, (superiores al decano), que no craquean. La siguiente figura muestra un esquemático del proceso de pirólisis con vapor:

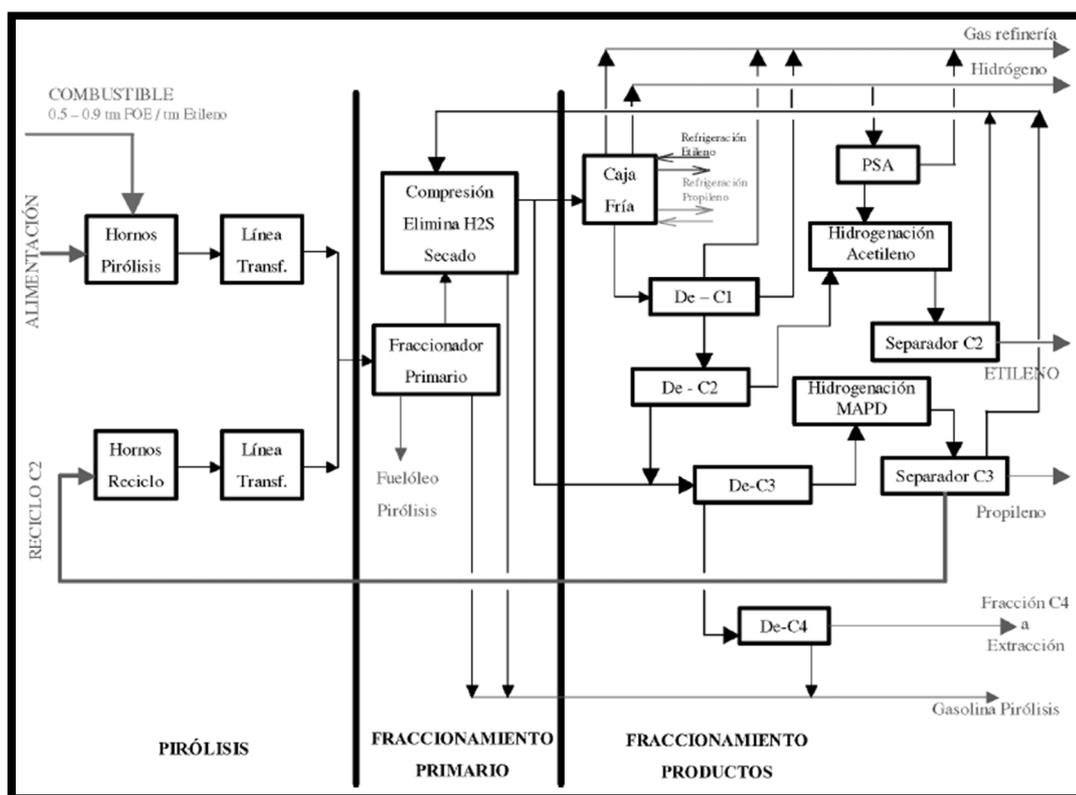


Figura. A2.2. Esquema del proceso de pirólisis con vapor.  
(Guía MTD del sector refino. MMA)

Se observan tres zonas: una primera de pirólisis y dos subsecuentes de fraccionamiento. En el ejemplo se muestra una alimentación indefinida que, depende de la intención productiva: en general será más ligera cuanto mayor rendimiento en C<sub>2</sub> y C<sub>3</sub> se desee, y más pesada cuando la intención, como es el caso, sea la de maximizar la corriente de C<sub>4</sub>. La operación se ha descrito previamente en la Memoria descriptiva, por lo que se excusa en el presente capítulo.

Como se ha mostrado, es la operación de craqueo térmico la más indicada para procurar la alimentación al PFC. Queda por tanto

abierta la posibilidad de diseñar de una unidad de pirólisis con vapor para suministrar una corriente de butilenos, hábil para la purificación de butadieno, como futuro PFC previo al presente.

En este caso, dado que no es objeto el diseño de la planta antedicha, la composición de la alimentación se toma directamente de la bibliografía, (la tesis doctoral). En esta se indican las siguientes composiciones de la fracción C<sub>4</sub>, a resultas de los distintos procesos de craqueo:

Componente	Craqueo catalítico	Craqueo térmico
<b>Butadieno (1)</b>	0,1 - 0,5	37,0 - 48,0
<b>i-Buteno (2)</b>	8,0 - 26,0	22,0 - 27,0
<b>1-Buteno (3)</b>	7,0 - 8,0	14,0 - 16,0
<b>Cis-2-Buteno (4)</b>	20,0 - 31,0	11,0 - 12,0
<b>i-Butano (5)</b>	28,0 - 52,0	2,0 - 5,0
<b>n-Butano (6)</b>	7,0 - 13,0	0,5 - 1,5

Tabla. A2.I. Composición (% en peso) de la fracción C<sub>4</sub> en función del craqueo

Donde se concreta lo expuesto con anterioridad. Atendiendo a esta primera tabla, se propone la siguiente composición inicial de la alimentación:

	<b>L<sub>0</sub> (kt/año)</b>	1170	<b>L<sub>0</sub> (Mmol/año)</b>	21150,663	
<b>% (1) en peso</b>	43	<b>Q<sub>m,1</sub> (kt/año)</b>	503,1	<b>Q<sub>1</sub> (Mmol/año)</b>	9300,821
<b>% (2) en peso</b>	25	<b>Q<sub>m,2</sub> (kt/año)</b>	292,5	<b>Q<sub>2</sub> (Mmol/año)</b>	5213,160
<b>% (3) en peso</b>	16	<b>Q<sub>m,3</sub> (kt/año)</b>	187,2	<b>Q<sub>3</sub> (Mmol/año)</b>	3336,423
<b>% (4) en peso</b>	11	<b>Q<sub>m,4</sub> (kt/año)</b>	128,7	<b>Q<sub>4</sub> (Mmol/año)</b>	2293,791
<b>% (5) en peso</b>	4	<b>Q<sub>m,5</sub> (kt/año)</b>	46,8	<b>Q<sub>5</sub> (Mmol/año)</b>	805,175
<b>% (6) en peso</b>	1	<b>Q<sub>m,6</sub> (kt/año)</b>	11,7	<b>Q<sub>6</sub> (Mmol/año)</b>	201,294
<b>Datos de la alimentación (L<sub>0</sub>)</b>					

Tabla. A2.II. Composición y caudales por componente de la alimentación

Donde los componentes se notan por su subíndice "i". Los porcentajes en peso se han fijado atendiendo a la Tabla A2.I. Considerando una alimentación anual de 1170 miles de toneladas y aten-

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

diendo a los porcentajes, se tiene el caudal anual de cada uno de los componentes según:

$$Q_{m,i} = x_{m,i}L_0 \quad (A2.1)$$

Donde  $Q_{m,i}$  corresponde a los caudales másicos de cada componente,  $x_{m,i}$  la fracción másica y  $L_0$  la corriente de alimentación. La fracción másica se obtiene dividiendo por cien los distintos porcentajes. De esta manera se han obtenido los distintos caudales másicos por componente y se han transformado a términos molares haciendo aplicación de la siguiente expresión:

$$Q_i \left( \frac{\text{Mmol}}{\text{año}} \right) = 1000 \cdot \frac{Q_{m,i} \left( \frac{\text{kt}}{\text{año}} \right)}{PM \left( \frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)} \quad (A2.2)$$

Donde  $Q_i$  es el caudal molar por componente. El peso molecular requerido por (A2.2) para completar la Tabla A2.II, se encuentra en la siguiente:

Pesos moleculares	
$PM_1$ (g/mol)	54,092
$PM_2$ (g/mol)	56,108
$PM_3$ (g/mol)	56,108
$PM_4$ (g/mol)	56,108
$PM_5$ (g/mol)	58,124
$PM_6$ (g/mol)	58,124

Tabla. A2.III. Pesos moleculares de las distintas sustancias alimentadas

Finalmente se ha expresado, junto al caudal másico de la alimentación, el expresado en términos molares, que se obtiene como suma de los caudales molares individuales de los distintos componentes.

Conocidos los caudales molares individuales y el total de la corriente de alimentación, dividiendo cada uno de los primeros por el segundo, se obtiene la fracción molar para cada especie:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

$$(x_0)_i = \frac{Q_i \left( \frac{\text{Mmol}}{\text{año}} \right)}{L_0 \left( \frac{\text{Mmol}}{\text{año}} \right)} \quad (\text{A2.3})$$

Donde  $(x_0)_i$ , es la fracción molar de cada componente en la alimentación. Aplicando (A2.3) a los datos de A2.II se obtiene, para cada componente:

$(x_0)_1$	$(x_0)_2$	$(x_0)_3$	$(x_0)_4$	$(x_0)_5$	$(x_0)_6$
0,4397	0,2465	0,1577	0,1085	0,0381	0,0095
<b>Composición molar de la alimentación</b>					

Tabla. A2.IV. Composición molar de la alimentación

Considérense seguidamente los datos consignados en las tablas A1.IV y A1.XXXIX del anexo anterior:

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_6$	T (K)
0,000	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,000	0,213	0,212	0,155	0,245	0,175	294,537
<b>0,438</b>	<b>0,245</b>	<b>0,155</b>	<b>0,122</b>	<b>0,030</b>	<b>0,010</b>	<b>0,440</b>	<b>0,262</b>	<b>0,158</b>	<b>0,091</b>	<b>0,039</b>	<b>0,009</b>	<b>293,520</b>
0,434	0,244	0,154	0,121	0,029	0,017	0,437	0,260	0,158	0,091	0,038	0,016	293,542
0,430	0,242	0,153	0,121	0,029	0,024	0,434	0,259	0,157	0,090	0,037	0,023	293,565
0,427	0,241	0,153	0,120	0,028	0,032	0,431	0,257	0,156	0,090	0,037	0,029	293,588
0,423	0,239	0,152	0,119	0,028	0,039	0,428	0,256	0,155	0,089	0,036	0,036	293,612
0,419	0,238	0,151	0,119	0,027	0,046	0,425	0,254	0,154	0,089	0,035	0,043	293,636
0,415	0,237	0,150	0,118	0,027	0,053	0,422	0,253	0,154	0,088	0,034	0,049	293,661
0,412	0,235	0,149	0,117	0,026	0,061	0,419	0,251	0,153	0,088	0,034	0,056	293,686
0,408	0,234	0,148	0,117	0,026	0,068	0,416	0,250	0,152	0,087	0,033	0,062	293,711
0,404	0,233	0,148	0,116	0,025	0,075	0,413	0,248	0,151	0,087	0,032	0,069	293,737
0,400	0,231	0,147	0,115	0,024	0,082	0,410	0,247	0,150	0,086	0,031	0,076	293,763
0,396	0,230	0,146	0,115	0,024	0,089	0,407	0,245	0,150	0,086	0,031	0,082	293,789
0,393	0,228	0,145	0,114	0,023	0,097	0,403	0,244	0,149	0,086	0,030	0,089	293,816
0,389	0,227	0,144	0,113	0,023	0,104	0,400	0,242	0,148	0,085	0,029	0,095	293,843
0,385	0,226	0,143	0,113	0,022	0,111	0,397	0,241	0,147	0,085	0,028	0,102	293,871
0,381	0,224	0,143	0,112	0,022	0,118	0,394	0,239	0,147	0,084	0,028	0,108	293,899
0,378	0,223	0,142	0,111	0,021	0,126	0,391	0,238	0,146	0,084	0,027	0,115	293,928
0,374	0,221	0,141	0,111	0,021	0,133	0,388	0,236	0,145	0,083	0,026	0,121	293,957
0,370	0,220	0,140	0,110	0,020	0,140	0,385	0,235	0,144	0,083	0,026	0,128	293,986
1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	294,866

Tabla. A2.V. Datos de equilibrio para la operación "SIMPLE"

Se propuso una horquilla de valores de equilibrio oscilantes entre la composición molar dada en la Tabla A2.IV. Se escoge aquél que presenta una composición menor de n-butano a fin de satisfacer el objeto para el que se diseña esta primera unidad que, como queda expresado, consiste en eliminar al máximo la presencia del componente más pesado.

Por consiguiente, a la luz de los datos de equilibrio para las corrientes de líquido y vapor salientes de "SIMPLE", la unidad de craqueo térmico, que necesariamente precede a la planta para purificación de butadieno, objeto de diseño; proporcionará una corriente de alimentación con una composición lo más ajustada posible a la tabulada en A2.IV y a una temperatura de 20,4 °C, (la temperatura de equilibrio). Puesto que se conoce la presión de operación requerida, se suministrará la alimentación a 5 atm, el doble de la anterior, a fin de garantizar el flujo líquido hasta la primera operación.

De esta forma, delimitadas las áreas de diseño, para el presente PFC el esquema de "SIMPLE" se ajusta al de la Figura A2.1 a partir de la válvula de alivio. Será competencia de otro proyecto el diseño del tren de intercambio de calor, preciso para proporcionar la alimentación a la temperatura requerida en la presente operación.

En este punto queda convenientemente descrita la corriente de alimentación, del proceso que se diseña en el actual capítulo, por conocerse sus condiciones de temperatura, presión y composición. Puede por tanto practicarse balance de materia a la unidad de separación.

Vuélvase la atención nuevamente a la Figura A2.1. Puede observarse que sólo tres corrientes ingresan o abandonan el proceso, representado por el cuadro trazado con línea discontinua:  $L_0$ , la alimentación entra al proceso y se separa en las dos corrientes salientes líquido, L y vapor, V. La planta de purificación de butadieno está concebida para funcionar en continuo, produciendo diariamente la cuota anual establecida como objetivo. De este modo, salvando los

períodos de obligatoria parada por motivos de mantenimiento o inspección, se espera un funcionamiento de 24 h para cada día del año. Sea la siguiente ecuación:

$$(A) = (E) - (S) + (G) - (C) \quad (A2.4)$$

Expresión particularmente oportuna para practicar el balance de materia a las distintas unidades.

El primer término (A), hace referencia a la cantidad de materia que acumula el sistema. Considerando el funcionamiento continuo, es de esperar que en cada punto del sistema, independientemente del tiempo, se tenga un fluido en las mismas condiciones de temperatura, presión y composición: el sistema no acumula materia, puesto que al no existir transitorios, las corrientes no varían con el tiempo sus características.

Como es lógico, los transitorios no son totalmente evitables: cuando se arranca por primera vez la unidad o cada vez que se detenga y se arranque, un sistema tan complejo como el que se diseña presenta un tiempo de ajuste; en el que las corrientes tienden a converger hacia los valores obtenidos suponiendo el estado estacionario. Asimismo, debido a las perturbaciones que hacen preciso un sistema de control afinado, (se está trabajando con caudales y composiciones que oscilan un estrecho margen de ajuste), los períodos en que el sistema automático de control introduzca cambios son también transitorios.

No obstante lo anterior, frente al tiempo nominal de funcionamiento de un año, el tiempo de arranque y parada, por no mencionar el lapso, mayor o menor, en que acciones de control son introducidas efectivamente al sistema; es despreciable, por lo que, no se comete gran error al describir las operaciones del presente PFC como si sucediesen en estado estacionario, ya que, literalmente, así funcionarán la mayor parte del tiempo. Por consiguiente y según lo razonado, el término de acumulación se anula en todos los casos.

Por su parte, el término (E) se refiere a la entrada de materia al sistema. De la Figura A2.1 se infiere que la única entrada al sistema consiste en la alimentación,  $L_0$ .

El término (S) incluye las dos salidas del sistema: el líquido L y el vapor V.

Finalmente, los términos (G) y (C) se asocian a reacción química, puesto que suponen la cantidad de materia, no existente a la entrada del proceso, que se ha generado a la salida, (G) o que se ha consumido (C). La materia, respetando el principio de *Lavoisier*, no surge por generación espontánea y estos términos sólo tienen justificación en la reacción química donde, la reordenación atómica genera compuestos nuevos a expensas de la materia prima, (la masa total del sistema debe permanecer invariante, a excepción de procesos nucleares con conversión de materia en energía). Considerando que ningún proceso de este PFC cursa con reacción química, puesto que la separación por destilación es de tipo físico, los términos de (G) y (C) se anularán en todos los casos.

De esta forma, la ecuación general del balance se reduce, desde este punto en adelante a la expresión que sigue:

$$(E) = (S) \quad (A2.5)$$

Lo que aplicado a la Figura A2.1 proporciona:

$$(A2.6) \begin{cases} L_0 = L + V & (1) \\ (x_0)_i L_0 = x_i L + y_i V & (2) \end{cases}$$

El caudal de la alimentación ha de coincidir con la suma de los de las corrientes de líquido y vapor escindidas de tal corriente. La expresión (A2.6.1) es el balance de materia global de la operación "SIMPLE". Por su parte, y considerando la anterior, (A2.6.2) indica que el caudal individual de un componente cualquiera en la alimentación debe coincidir con la suma de los respectivos caudales en el líquido y el vapor. Esta ecuación es la conocida como balance de ma-

teria global por componente. Introduciendo (A2.6.1) en (A2.6.2) y operando se obtiene:

$$\begin{aligned}(x_0)_i(L + V) &= x_iL + y_iV \\ (y_i - (x_0)_i)V &= ((x_0)_i - x_i)L\end{aligned}$$

Ergo:

$$\frac{L}{V} = \frac{y_i - (x_0)_i}{(x_0)_i - x_i} \quad (A2.7)$$

Ecuación que procura la proporción del líquido sobre el vapor, o entendido de otra forma, el grado de vaporización a que debe someterse la alimentación. Dicha razón se encuentra ligada únicamente a composiciones molares de las distintas corrientes, como se ha encontrado manipulando expresiones a partir de la ecuación del balance.

Considerando conocidas las composiciones de cada corriente, (véanse tablas A2.IV a A2.V), debe encontrarse una expresión para determinar los caudales de líquido y vapor. Para ello, tómesese (A2.6.1) y divídase por el caudal de vapor, V:

$$\frac{L_0}{V} = \frac{L}{V} + 1$$

Despejando para el volumen, (en función de L/V):

$$V = \frac{L_0}{L/V + 1} \quad (A2.8)$$

Combinando (A2.8) y (A2.7):

$$L = \frac{L}{V} \cdot V = \frac{L}{V} \cdot \frac{L_0}{L/V + 1} = \frac{L_0}{V/L (L/V + 1)}$$

Se obtiene, para L:

$$L = \frac{L_0}{1 + V/L} \quad (A2.9)$$

Puesto que L/V en (A2.7) incluye seis ecuaciones, (una por cada componente), así (A2.8) y (A2.9), por ser dependientes de la mencionada razón, también incluyen una ecuación por componente cada una. Se aplica el siguiente procedimiento de cálculo:

- Se resuelve (A2.7) una vez para cada componente. Las composiciones se toman de las tablas A2.IV a A2.V.
- Se determina, para cada componente tomando los datos del guión anterior, el caudal de vapor y líquido por aplicación de las ecuaciones (A2.8) a (A2.9).

Se obtiene:

<b>L/V</b>	0,183	<b>L/V</b>	10,519	<b>L/V</b>	0,280
<b>V (Mmol/año)</b>	17880,668	<b>V (Mmol/año)</b>	1836,177	<b>V (Mmol/año)</b>	16523,633
<b>L (Mmol/año)</b>	3269,995	<b>L (Mmol/año)</b>	19314,486	<b>L (Mmol/año)</b>	4627,030
<b>Balance (al componente 1)</b>		<b>Balance (al componente 2)</b>		<b>Balance (al componente 3)</b>	
<b>L/V</b>	1,266	<b>L/V</b>	0,106	<b>L/V</b>	0,438
<b>V (Mmol/año)</b>	9332,570	<b>V (Mmol/año)</b>	19117,209	<b>V (Mmol/año)</b>	14712,189
<b>L (Mmol/año)</b>	11818,094	<b>L (Mmol/año)</b>	2033,454	<b>L (Mmol/año)</b>	6438,474
<b>Balance (al componente 4)</b>		<b>Balance (al componente 5)</b>		<b>Balance (al componente 6)</b>	

Tabla. A2.VI. Primera ejecución del balance de materia para “SIMPLE”

Como puede comprobarse, las relaciones L/V varían según sobre qué componente se aplique (A2.7) y, por consiguiente, los caudales de líquido y vapor no son coincidentes. Es claro que la operación de destilación sencilla sólo posee una relación de líquido a vapor, puesto que éstos son únicos. Será preciso variar las composiciones de líquido y vapor, (las de vapor están en función de las de líquido según el procedimiento aplicado de generación de datos de equilibrio), o bien la composición de la alimentación. Puesto que los datos de equilibrio para el líquido y el vapor son satisfactorios, (puesto que se elimina suficiente n-butano), se decide modificar la composición

de la alimentación sobre la que, a tenor de lo reflejado en la Tabla A2.I, se dispone de cierto margen de variación.

Siguiendo lo anterior, se toma el promedio de las relaciones L/V, así como de los caudales de líquido y vapor en la Tabla A2.VI y se calculan los caudales de cada componente en tales corrientes.

<b>L/V</b>	2,132
<b>V (Mmol/año)</b>	13233,741
<b>L (Mmol/año)</b>	7916,922
<b>Balance (promedio)</b>	

Tabla. A2.VII. Solución promedio del balance de materia

A continuación, multiplicando el líquido y el vapor de la Tabla A2.VII por las conocidas composiciones, tomadas de la Tabla A2.V, se obtiene para el líquido:

<b>Composición L</b>					
<b>x<sub>1</sub></b>	<b>x<sub>2</sub></b>	<b>x<sub>3</sub></b>	<b>x<sub>4</sub></b>	<b>x<sub>5</sub></b>	<b>x<sub>6</sub></b>
0,438	0,245	0,155	0,122	0,030	0,010
<b>Q<sub>L,1</sub></b>	<b>Q<sub>L,2</sub></b>	<b>Q<sub>L,3</sub></b>	<b>Q<sub>L,4</sub></b>	<b>Q<sub>L,5</sub></b>	<b>Q<sub>L,6</sub></b>
3467,612	1939,646	1227,123	966,656	236,716	79,169
<b>L (Mmol/año)</b>				<b>7916,922</b>	

Tabla. A2.VIII. Composición de la corriente de líquido

Y para el vapor:

<b>Composición V</b>					
<b>y<sub>1</sub></b>	<b>y<sub>2</sub></b>	<b>y<sub>3</sub></b>	<b>y<sub>4</sub></b>	<b>y<sub>5</sub></b>	<b>y<sub>6</sub></b>
0,440	0,262	0,158	0,091	0,039	0,009
<b>Q<sub>V,1</sub></b>	<b>Q<sub>V,2</sub></b>	<b>Q<sub>V,3</sub></b>	<b>Q<sub>V,4</sub></b>	<b>Q<sub>V,5</sub></b>	<b>Q<sub>V,6</sub></b>
5823,637	3467,477	2097,738	1206,451	515,288	123,151
<b>V (Mmol/año)</b>				<b>13233,7411</b>	

Tabla. A2.IX. Composición de la corriente de vapor

Donde  $Q_{L,i}$  y  $Q_{V,i}$ , (en Mmol/año), son los caudales por componente en las corrientes líquido y vapor, que, como queda explicado se han calculado según:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

$$(A2.10) \begin{cases} Q_{L,i} = x_i L & (1) \\ Q_{V,i} = y_i V & (2) \end{cases}$$

La suma de todos los caudales por componente resulta, para cada corriente, el total de su caudal:

$$(A2.11) \begin{cases} \sum_{i=1}^6 Q_{L,i} = \sum_{i=1}^6 x_i L = L \sum_{i=1}^6 x_i = L & (1) \\ \sum_{i=1}^6 Q_{V,i} = \sum_{i=1}^6 y_i V = V \sum_{i=1}^6 y_i = V & (2) \end{cases}$$

Donde el sumatorio de las composiciones de todos los componentes es el total, lo que referido en tanto por uno supone la unidad.

Puesto que las L/V no coinciden en el primer cálculo, la suma de los caudales de cada componente en el líquido y el vapor no sumarán la misma cantidad que en la alimentación, como es preceptivo para que se cumpla el principio de conservación de la materia. En la siguiente tabla se reiteran los cálculos mostrados en A2.II, con las particularidades que se detallarán:

	<b>L<sub>0</sub> (kt/año)</b>	1169,914	<b>L<sub>0</sub> (Mmol/año)</b>	21150,663	
<b>% (1) en peso</b>	42,959	<b>Q<sub>m,1</sub> (kt/año)</b>	502,582	<b>Q<sub>1</sub> (Mmol/año)</b>	9291,249
<b>% (2) en peso</b>	25,932	<b>Q<sub>m,2</sub> (kt/año)</b>	303,383	<b>Q<sub>2</sub> (Mmol/año)</b>	5407,123
<b>% (3) en peso</b>	15,946	<b>Q<sub>m,3</sub> (kt/año)</b>	186,551	<b>Q<sub>3</sub> (Mmol/año)</b>	3324,861
<b>% (4) en peso</b>	10,422	<b>Q<sub>m,4</sub> (kt/año)</b>	121,929	<b>Q<sub>4</sub> (Mmol/año)</b>	2173,107
<b>% (5) en peso</b>	3,736	<b>Q<sub>m,5</sub> (kt/año)</b>	43,709	<b>Q<sub>5</sub> (Mmol/año)</b>	752,004
<b>% (6) en peso</b>	1,005	<b>Q<sub>m,6</sub> (kt/año)</b>	11,760	<b>Q<sub>6</sub> (Mmol/año)</b>	202,320
<b>Datos de la alimentación (L<sub>0</sub>)</b>					

Tabla. A2.X. Reiteración del cálculo de composición y caudales por componente de la alimentación

Se han obtenido los Q<sub>i</sub> como suma de los caudales de cada componente en el líquido y el vapor en las tablas A2.VIII a A2.IX, según (A2.12.1):

$$(A2.12) \left\{ \begin{array}{l} Q_i = Q_{L,i} + Q_{V,i} \quad (1) \\ L_0 = \sum_{i=1}^6 Q_i \quad (2) \end{array} \right.$$

No debe olvidarse el sentido de lo notado:  $Q_i$  es el caudal molar de cada componente en la alimentación, esto es, la entrada al sistema;  $Q_{L,i}$  y  $Q_{V,i}$  son los caudales molares por componente en las corrientes líquido y vapor, o si se prefiere, las salidas del sistema de cada componente. Por tanto, (A2.12), no es más que una concreción de la ecuación del balance de materia particularizado para el sistema en estudio, según la ecuación (A2.5).

Por su parte la alimentación en términos molares se ha recalculado según (A2.12.2), como suma de los nuevos caudales molares individuales. Puede observarse, por comparación de las tablas A2.II y A2.X, que los caudales individuales, como ya se advirtió, no son coincidentes ya que la relación L/V a partir de la que se han obtenido no era coincidente para todos los balances. A partir de los nuevos caudales molares, se recalcula en términos másicos la corriente de alimentación, invirtiendo el proceso de cálculo aplicado para la obtención de los datos de la Tabla A2.II:

- Se emplea la ecuación (A2.2), convenientemente despejada, para obtener los caudales individuales másicos,  $Q_{m,i}$  a partir de los conocidos caudales molares y los pesos moleculares tabulados en A2.III.
- El sumatorio de los caudales individuales másicos proporciona el caudal total  $L_0$  en términos másicos.
- Se aplica (A2.1) a la obtención de las fracciones másicas,  $x_{m,i}$ , despejando convenientemente, a partir de los valores ya dilucidados en estos guiones.

Todos los cálculos referidos se encuentran consignados en la Tabla A2.X. Las fracciones másicas se han transformado a porcentaje en peso multiplicando los  $x_{m,i}$  por cien. Se comprueba que, salvo el

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

contenido en cis-2-buteno, el resto de composiciones se encuentra comprendido entre el rango típico indicado en la Tabla A2.I, para el caso de craqueo térmico. El componente referido no se aleja excesivamente de la horquilla de composiciones, por lo que se considera que la composición recalculada de la alimentación se ajusta a la realidad de la operación precedente.

Aplicando nuevamente (A2.3) a los datos de la última tabla, se recalcula la composición molar de la alimentación:

$(x_0)_1$	$(x_0)_2$	$(x_0)_3$	$(x_0)_4$	$(x_0)_5$	$(x_0)_6$
0,439	0,256	0,157	0,103	0,036	0,010
<b>Composición molar de la alimentación</b>					

Tabla. A2.XI. Composición molar recalculada de la alimentación

Puesto que la temperatura del equilibrio no se ha modificado, así como tampoco la presión de trabajo ha sufrido variación alguna en este proceso de reiteración del cálculo de la composición de la alimentación, se está a lo dispuesto con anterioridad acerca de tales condiciones.

Procede reiterar los balances de materia para los distintos componentes:

- Se resuelve (A2.7) una vez para cada componente. Las composiciones se toman de las tablas A2.V y A2.XI.
- Se determina, para cada componente tomando los datos del guión anterior, el caudal de vapor y líquido por aplicación de las ecuaciones (A2.8) y (A2.9).

Se obtiene:

<b>L/V</b>	0,598	<b>L/V</b>	0,598	<b>L/V</b>	0,598
<b>V (Mmol/año)</b>	13233,741	<b>V (Mmol/año)</b>	13233,741	<b>V (Mmol/año)</b>	13233,741
<b>L (Mmol/año)</b>	7916,992	<b>L (Mmol/año)</b>	7916,992	<b>L (Mmol/año)</b>	7916,992
<b>Balance (al componente 1)</b>		<b>Balance (al componente 2)</b>		<b>Balance (al componente 3)</b>	

Tabla. A2.XII. Segunda ejecución del balance de materia (Continúa en pág. siguiente)

<b>L/V</b>	0,598	<b>L/V</b>	0,598	<b>L/V</b>	0,598
<b>V (Mmol/año)</b>	13233,741	<b>V (Mmol/año)</b>	13233,741	<b>V (Mmol/año)</b>	13233,741
<b>L (Mmol/año)</b>	7916,992	<b>L (Mmol/año)</b>	7916,992	<b>L (Mmol/año)</b>	7916,992
<b>Balance (al componente 4)</b>		<b>Balance (al componente 5)</b>		<b>Balance (al componente 6)</b>	

Tabla. A2.XII. Segunda ejecución del balance de materia (Viene de pág. anterior)

De donde se observa lograda la convergencia en L/V. De esta forma, los caudales de líquido y vapor son coincidentes siendo indiferente qué balance los arroje. Resta finalmente calcular la composición de las corrientes salientes de la operación, lo que se logra multiplicando el líquido y el vapor de la Tabla A2.XII por las conocidas composiciones, tomadas de la Tabla A2.V. Se obtiene para el líquido:

<b>Composición L</b>					
<b>x<sub>1</sub></b>	<b>x<sub>2</sub></b>	<b>x<sub>3</sub></b>	<b>x<sub>4</sub></b>	<b>x<sub>5</sub></b>	<b>x<sub>6</sub></b>
0,438	0,245	0,155	0,122	0,030	0,010
<b>Q<sub>L,1</sub></b>	<b>Q<sub>L,2</sub></b>	<b>Q<sub>L,3</sub></b>	<b>Q<sub>L,4</sub></b>	<b>Q<sub>L,5</sub></b>	<b>Q<sub>L,6</sub></b>
3467,612	1939,646	1227,123	966,656	236,716	79,169
<b>L (Mmol/año)</b>				<b>7916,922</b>	

Tabla. A2.XIII. Composición de la corriente de líquido

Y para el vapor:

<b>Composición V</b>					
<b>y<sub>1</sub></b>	<b>y<sub>2</sub></b>	<b>y<sub>3</sub></b>	<b>y<sub>4</sub></b>	<b>y<sub>5</sub></b>	<b>y<sub>6</sub></b>
0,440	0,262	0,158	0,091	0,039	0,009
<b>Q<sub>V,1</sub></b>	<b>Q<sub>V,2</sub></b>	<b>Q<sub>V,3</sub></b>	<b>Q<sub>V,4</sub></b>	<b>Q<sub>V,5</sub></b>	<b>Q<sub>V,6</sub></b>
5823,637	3467,477	2097,738	1206,451	515,288	123,151
<b>V (Mmol/año)</b>				<b>13233,7411</b>	

Tabla. A2.XIV. Composición de la corriente de vapor

Los datos de estas tablas son coincidentes con los de sus homólogas A2.VIII y A2.IX, justo como era de esperar, teniendo en cuenta que se han fijado las composiciones del líquido y el vapor para aprovechar el grado de libertad modificando la composición de la alimentación que, por no existir PFC previo al presente, no queda impuesta. De nuevo los caudales individuales de componente en el líquido y el vapor se expresan en Mmol/año en las tablas previas.

### **A2.C1.3. Diseño hidromecánico de “SIMPLE”**

Esta tercera sección se dividirá en varios apartados imbricados tanto en el diseño de la unidad separadora como en el diseño mecánico de la misma. No se incluirán aspectos tales como el diseño de la válvula de alivio de presión o la red de tuberías, si bien, se indicarán los diámetros nominales requeridos en las bridas de entrada y salida a la unidad de “SIMPLE”.

Aun sin ser objeto del presente anexo la inclusión de los apartados de diseño mecánico, se exceptuarán tanto el caso presente como el de la operación “RECUPERACIÓN”, por ser éstas destilaciones sencillas. Se dedicará el anexo de diseño mecánico al dimensionado final y selección de materiales para las torres de platos, cuyo funcionamiento hidráulico se describe en el anexo que sigue.

Aclarado el aspecto anterior, la sección se divide, como queda indicado, en los siguientes apartados:

- Dimensionado hidráulico de la unidad de separación.
- Diseño mecánico (I). Determinación de la presión de diseño.
- Diseño mecánico (II). Determinación de espesores para el casco y los cabezales sometidos a presión interna.
- Diseño mecánico (III). Determinación del espesor del aislamiento y de la chapa envolvente.
- Diseño mecánico (IV). Determinación del espesor requerido para soportar la carga por viento.
- Diseño mecánico (V). Determinación del peso del aparato en operación.
- Diseño mecánico (VI). Determinación del espesor del faldón.
- Diseño mecánico (VII). Determinación del espesor requerido para soportar la carga sísmica.
- Diseño mecánico (VIII). Diseño del anillo de la base.
- Diseño mecánico (IX). Cálculo de las tubuladuras y peso del extractor de neblina.
- Diseño mecánico (X). Iteración de cálculos.

- Diseño mecánico (XI). Comprobaciones.
- Cálculo de orejas de izado y pintado del casco y cabezales.

Lo que a expensas del presupuesto cerrará el cálculo para la primera unidad.

### A2.C1.3.1. Dimensionado hidráulico de la unidad de separación

Previamente al dimensionado, y puesto que se requerirán con posterioridad, es necesario generar datos de densidad de fases. Tal como se mostrará por extenso en el anexo siguiente, se estimará la citada propiedad para las corrientes de líquido y vapor en equilibrio, así como para la alimentación a distintas presiones.

El cálculo de la densidad de la fase líquida se practica haciendo uso de la ecuación de *Rackett*<sup>\*</sup> para la estimación de volumen de líquido saturado:

$$(A2.13) \left\{ \begin{array}{l} V_i^{Lsat} \text{ (L/mol)} = V_{ci} Z_{ci}^{(1-T_{ri})^{0,2857}} \text{ Ecuación de Rackett (1)} \\ T_{ri} = T_L / T_{ci} \text{ (2)} \end{array} \right.$$

Donde se requieren los volúmenes críticos,  $V_{ci}$ , y los factores de compresibilidad críticos,  $Z_{ci}$ , de las sustancias puras. También se requerirán las temperaturas críticas de las mismas, a fin de hallar la temperatura reducida según (A2.13.2):

Propiedades críticas					
$T_{c1}$ (K)	425,0	$V_{c1}$ (L/mol)	0,221	$Z_{c1}$	0,270
$T_{c2}$ (K)	417,9	$V_{c2}$ (L/mol)	0,239	$Z_{c2}$	0,275
$T_{c3}$ (K)	419,6	$V_{c3}$ (L/mol)	0,240	$Z_{c3}$	0,277
$T_{c4}$ (K)	435,6	$V_{c4}$ (L/mol)	0,234	$Z_{c4}$	0,272
$T_{c5}$ (K)	408,1	$V_{c5}$ (L/mol)	0,263	$Z_{c5}$	0,283
$T_{c6}$ (K)	425,2	$V_{c6}$ (L/mol)	0,255	$Z_{c6}$	0,274

Tabla. A2.XV. Propiedades críticas requeridas por la ecuación (A2.13)

\* H. G. Rackett. J. Chem. Eng. Data, vol. 15, pgs. 514-517, 1970.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Con los datos de la Tabla A2.XV y aplicando (A2.13) sobre la temperatura de equilibrio tabulada en A2.V, se tiene:

$T_{r1}$	$T_{r2}$	$T_{r3}$	$T_{r4}$	$T_{r5}$	$T_{r6}$
0,691	0,702	0,700	0,674	0,719	0,690

Tabla. A2.XVI. Aplicación de (A2.13). (Continúa)

$V_1^{Lsat}$ (L/mol)	$V_2^{Lsat}$ (L/mol)	$V_3^{Lsat}$ (L/mol)	$V_4^{Lsat}$ (L/mol)	$V_5^{Lsat}$ (L/mol)	$V_6^{Lsat}$ (L/mol)
0,087	0,096	0,097	0,091	0,109	0,101

Tabla. A2.XVI. Aplicación de (A2.13). (Sigue)

Donde los volúmenes de líquido saturados, según la ecuación de Rackett, presentan las mismas unidades que los volúmenes críticos. Considerando que el recíproco de los volúmenes saturados coincide con la densidad molar de las sustancias puras, y ponderando según las composiciones de las mismas como regla de mezclado, se obtiene:

$$(A2.14) \left\{ \begin{array}{l} \rho_{Li} = 1/V_i^{Lsat} \quad (1) \\ \rho_L = \sum_i^n x_i \rho_{Li} = x_1 \rho_{L1} + \dots + x_6 \rho_{L6} \quad (2) \end{array} \right.$$

Cuya aplicación sobre, los volúmenes saturados de la Tabla A2.XVI y las composiciones tanto de líquido como de la alimentación en las tablas A2.XIII y A2.XI, respectivamente; convirtiendo a unidades más convenientes, produce:

$\rho_L$ (mol/cm <sup>3</sup> )
0,011

Tabla. A2.XVII. Estimación de densidades molares del líquido y la alimentación

Pese a diferir las composiciones, tal variación entre ambas es mínima, lo que no afecta al redondeo de la densidad de líquido. Debe añadirse que, sin perjuicio de lo indicado, en el cálculo se han considerado las mínimas diferencias de densidad que en este punto se excusan.

Como puede observarse, las ecuaciones aplicadas al cálculo de la densidad son independientes de la presión, (aunque existe cierta dependencia de la densidad con la presión sobre fluidos incompresibles, ésta es sólo significativa a presiones altas). En la sección previa se sugirió elevar la presión de la alimentación a 5 atm a fin de garantizar su flujo líquido. Puesto que se requirió que el transporte se realizara a la misma temperatura de equilibrio, el valor de la densidad es invariante, así la presión sea 5 atm en el transporte ó 2,5 en operación, merced a lo explicado sobre las expresiones para estimarla.

En resumen, la Tabla A2.XVII recoge la densidad tanto de la fase líquida, separada en la operación "SIMPLE", así como de la alimentación de la misma, que es la del proceso global, tanto a presión de transporte como de operación.

Por su parte, la estimación de la densidad de la corriente de vapor, se ha realizado a partir de la ecuación de *Pitzer*\*:

$$(A2.15) \left\{ \begin{array}{l} Z_i = Z_i^0 + \omega_i Z_i^1 \text{ Ecuación de Pitzer (1)} \\ Z_i^0 = 1 + B_i^0 \frac{P_{ri}}{T_{ri}} \text{ (2)} \\ Z_i^1 = B_i^1 \frac{P_{ri}}{T_{ri}} \text{ (3)} \\ P_{ri} = \frac{P_i}{P_{ci}} \text{ (4)} \\ T_{ri} = \frac{T_V}{T_{ci}} \text{ (5)} \\ \left\{ \begin{array}{l} B_i^0 = 0,083 - \frac{0,422}{T_{ri}^{1,6}} \text{ (6)} \\ B_i^1 = 0,139 - \frac{0,172}{T_{ri}^{4,2}} \text{ (7)} \end{array} \right. \end{array} \right.$$

La presión parcial de cada especie viene dada por:

$$P_i = y_i P \text{ Ley de Dalton (A2.16)}$$

\* Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química. *J. M. Smith, H. C. Van Ness, M. M. Abbott*. McGraw-Hill. 6ª Edición, pgs. 108-112.

Donde P, es la presión de operación especificada en el anexo de generación de datos termodinámicos: P = 2,5 atm. De esta forma, puede estimarse el factor de compresibilidad,  $Z_i$ , para sustancias puras. Atendiendo a las siguientes ecuaciones, puede obtenerse tanto el volumen de compuesto puro en cada corriente, como la densidad, de modo similar al empleado para la fase líquida:

$$(A2.17) \begin{cases} Z_i = \frac{P_i V_{Vi}}{RT_V} \Rightarrow V_{Vi}(\text{L/mol}) = \frac{Z_i R \left(\frac{\text{atm}\cdot\text{L}}{\text{mol}\cdot\text{K}}\right) T_V(\text{K})}{P_i(\text{atm})} & (1) \\ \rho_{Vi}(\text{mol/L}) = \frac{1}{V_{Vi}} & (2) \end{cases}$$

El cálculo final de la densidad de vapor se efectúa a través de la siguiente regla de mezclado:

$$\rho_V = \sum_i y_i \rho_{Vi} = y_1 \rho_{V1} + \dots + y_6 \rho_{V6} \quad (A2.18)$$

Haciendo uso de la temperatura de equilibrio dada en A2.V, las propiedades críticas de A2.XV y la ecuación (A2.15.5), se determinan las siguientes temperaturas reducidas:

$T_{r1}$	$T_{r2}$	$T_{r3}$	$T_{r4}$	$T_{r5}$	$T_{r6}$
0,691	0,702	0,700	0,674	0,719	0,690

Tabla. A2.XVIII. Temperaturas reducidas de fase vapor

Se sigue el procedimiento empleando la Tabla A2.V y aplicando la ecuación (A2.16):

$P_1(\text{atm})$	$P_2(\text{atm})$	$P_3(\text{atm})$	$P_4(\text{atm})$	$P_5(\text{atm})$	$P_6(\text{atm})$
1,100	0,655	0,396	0,228	0,097	0,023

Tabla. A2.XIX. Presiones parciales de fase vapor

El siguiente paso de cálculo requiere como dato las presiones de vapor críticas. En la siguiente tabla se proporcionarán también los factores acéntricos críticos:

Propiedades críticas			
$P_{c1}$ (atm)	42,7	$\omega_1$	0,195
$P_{c2}$ (atm)	39,5	$\omega_2$	0,190
$P_{c3}$ (atm)	39,7	$\omega_3$	0,187
$P_{c4}$ (atm)	41,5	$\omega_4$	0,202
$P_{c5}$ (atm)	36,0	$\omega_5$	0,176
$P_{c6}$ (atm)	37,5	$\omega_6$	0,193

Tabla. A2.XX. Propiedades críticas requeridas por la ecuación (A2.15)

Por medio de las dos tablas anteriores y por aplicación de (A2.15.4), se obtienen las presiones reducidas:

$P_{r1}$	$P_{r2}$	$P_{r3}$	$P_{r4}$	$P_{r5}$	$P_{r6}$
0,026	0,017	0,010	0,005	0,003	0,001

Tabla. A2.XXI. Presiones reducidas de fase vapor

La aplicación de la ecuación (A2.15) generará los factores de compresibilidad de cada componente en su correspondiente vapor, haciendo uso de los datos de la Tabla A2.XVIII, la Tabla A2.XX y la Tabla A2.XXI:

$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$Z_5$	$Z_6$
0,970	0,982	0,989	0,993	0,997	0,999

Tabla. A2.XXII. Factores de compresibilidad de fase vapor

La tabla anterior, por aplicación de la ecuación (A2.17.1), proporciona volúmenes de cada especie en fase vapor. La presión parcial se toma de la Tabla A2.XIX y la temperatura de la Tabla A2.V:

$V_1$ (L/mol)	$V_2$ (L/mol)	$V_3$ (L/mol)	$V_4$ (L/mol)	$V_5$ (L/mol)	$V_6$ (L/mol)
21,230	36,094	60,099	104,933	246,749	1034,526

Tabla. A2.XXIII. Volúmenes por componente en fase vapor

Donde se ha tomado  $R = 0,082057$  atm·L/mol·K. Se observa que el volumen del butano es bastante más elevado que el resto de los correspondientes a las demás especies. Ello es debido a la míni-

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

ma composición de dicha sustancia en el vapor: si la composición es baja, así la presión parcial debe resultar un valor nimio. Al introducirla en (A2.17.1) se encuentra explicación al valor discordante. Ahora bien, pese a su inclusión en la suma de (A2.18), no debe esperarse un alejamiento de la realidad, ya que el recíproco de una cantidad elevada es un valor insignificante, en este caso, frente al resto de sumandos.

Haciendo uso combinado de las ecuaciones (A2.17.2) y (A2.18), leyendo volúmenes molares de la tabla anterior, las composiciones de vapor de la Tabla A2.V y cambiando a unidades más convenientes:

$\rho_v \cdot 10^5 \text{ (mol/cm}^3\text{)}$
3,166

Tabla. A2.XXIV. Estimación de las densidades molares de fase vapor

Seguidamente pueden presentarse las ecuaciones y secuencia de cálculo para el dimensionado del equipo separador correspondiente a "SIMPLE". Sea la Figura A2.4: e muestra en ésta un esquema genérico de separador gas-líquido, en este caso vertical. Las razones propuestas por el autor para emplear tal unidad consisten en reaprovechar productos de interés, (como es el caso del extractante rescatado en la operación "RECUPERACIÓN"), mejorar la pureza de una corriente, reducir emisiones o proteger equipos aguas abajo.

En este caso, y como viene siendo explicado a lo largo del presente capítulo, el objeto se adecúa, según lo expuesto, a la mejora de la pureza de la corriente de la alimentación, dado que se reduce el contenido en una sustancia de no interés.

La unidad mostrada en la Figura A2.3, encuentra su principio físico de funcionamiento en la separación por gravedad e impacto: la mezcla alimentada ingresa al separador aproximadamente a la mitad de su altura, donde una placa deflectora, (*splash plate*, véase Figura A2.3), dirige el líquido hacia la salida inferior.

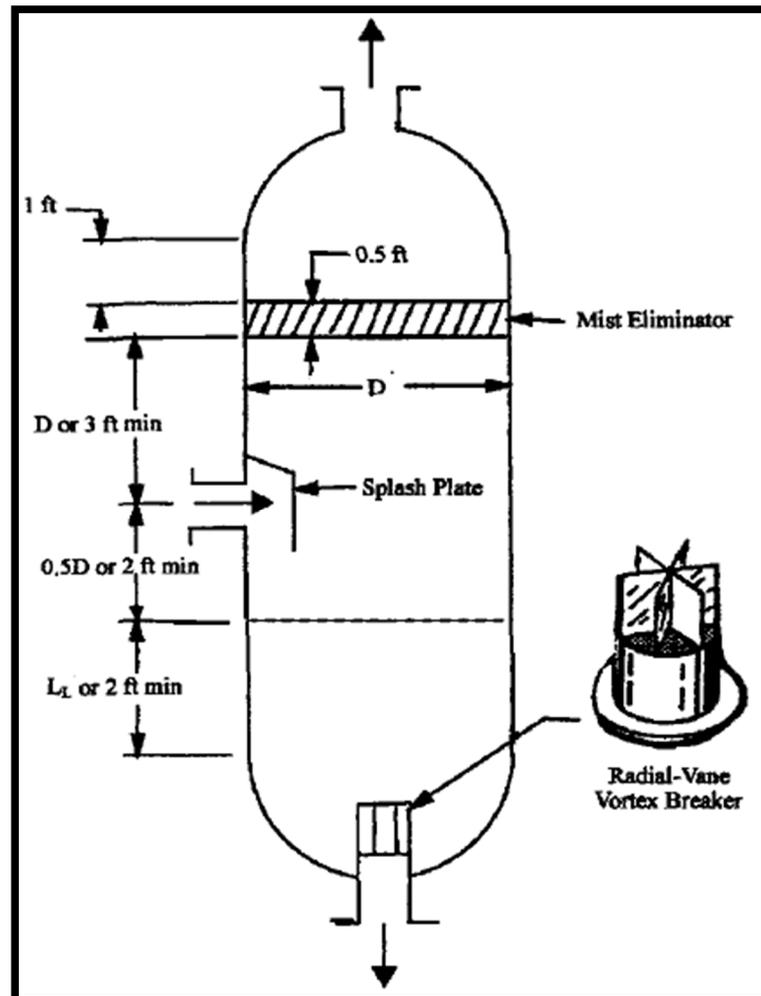


Figura. A2.3. Esquema de un separador vertical. (H. Silla, 2003)

El vapor conteniendo pequeñas gotas de líquido fluye hacia la salida superior. En este caso no se contempla el diseño de una pletina deflectora, puesto que ésta queda indicada para aplicaciones de bajo porcentaje de vaporización; basta comprobar el caudal molar de las corrientes implicadas para comprobar que es el vapor la corriente mayoritaria.

En el camino ascendente del vapor, las gotas de mayor diámetro coalescen y caen por gravedad hacia el fondo del equipo. En general la eficacia de separación gas-líquido suele oscilar el 95%, es decir, el vapor contiene un 5% de líquido, en forma de gotas micronizadas, que ha arrastrado en su seno.

Se requiere un porcentaje mayor de separación puesto que el arrastre de líquido supone limitar el éxito de la separación del componente butano, de modo que el propósito de la operación quedaría insatisfecho.

Al respecto anterior, se utilizará un extractor de neblina, (*mist eliminator*, véase Figura A2.3), cerca de la salida de vapor. Estos extractores consisten en anillos de malla metálica que se oponen al flujo de vapor, forzando la coalescencia de las gotas contenidas. Las mallas metálicas consisten usualmente en hilos de alambre de 0,011 pulgadas de diámetro, trenzados mecánicamente para formar un arreglo de 6 pulgadas de espesor, (0,5 ft). Las gotas de líquido arrastradas por el vapor impactan en los hilos de modo que, por coalescencia, se produce un goteo de líquido constante resultando mejorada la eficacia de la separación gas-líquido hasta el 99,9% ó incluso más. Gracias al elevado volumen intersticial de la malla, la pérdida de carga causada al vapor es menor de una pulgada de agua, (apenas 2 mmHg), por lo que se desprejará a efectos de diseño.

El objetivo principal del dimensionado del separador, consiste en minimizar la velocidad del vapor lo suficiente para reducir el arrastre de gotas líquidas, (sin perjuicio de la actuación del extractor de neblina). Por consiguiente, es preciso encontrar el diámetro óptimo, acorde con lo anterior, y con el hecho de que el separador debe contemplarse también como un acumulador de líquido, que garantice un funcionamiento estable ante un eventual transitorio. De ese modo, también deberá calcularse la altura óptima que permita ese nivel de líquido "colchón", (según el argot propio de refinería), que amortigüe las variaciones en el flujo.

Tal nivel de líquido no sólo incluirá el propósito señalado, sino que permitirá el burbujeo de vapor atrapado en el líquido, mejorando la separación.

Existen en la bibliografía distintos procedimientos. En este caso se aplicará el que se indica en el libro de Silla\*, contrastado al tiempo que simple. En su capítulo de diseño de operaciones de separación se proponen ecuaciones para separadores gas-líquido, tanto verticales como horizontales. Debe partirse, en primera instancia de la suposición de disposición vertical y verificar *a posteriori* la relación de altura a diámetro H/D. Si esta relación no supera el valor de 5, deberá disponerse el separador verticalmente.

Inicialmente debe determinarse el diámetro de la unidad separadora. A tal propósito se resuelven sucesivamente las siguientes ecuaciones:

$$(A2.19) \left\{ \begin{array}{l} v_v(\text{ft/s}) = k_v(\text{ft/s}) \cdot \sqrt{\frac{\rho_L - \rho_v}{\rho_v}} \quad (1) \\ A(\text{ft}^2) = \frac{V(\text{ft}^3/\text{s})}{v_v(\text{ft/s})} \quad (2) \\ A = \pi \frac{D^2}{4} \Rightarrow D(\text{ft}) = \sqrt{\frac{4A(\text{ft}^2)}{\pi}} \quad (3) \end{array} \right.$$

Donde  $v_v$  corresponde a la velocidad lineal del vapor,  $k_v$  es una constante de corrección que depende del extractor de neblina instalado; para un extractor de malla de alambre instalado en separador vertical adquiere el valor<sup>†</sup> de  $k_v = 0,5 \text{ ft/s}$ . Asimismo,  $V$  es el caudal de vapor dado en la Tabla A2.XIV,  $A$  es el área de la sección transversal del separador y  $D$ , el diámetro perseguido.

Las densidades de líquido y vapor se toman de las tablas A2.XVII y A2.XXIV y los caudales de líquido y vapor, de las tablas A2.XIII a A2.XIV.

La aplicación de (A2.19) se tabula seguidamente:

\* Chemical Process Engineering. Design and Economics. H. Silla. Marcel Dekker, 2003

† Este valor se ha tomado del catálogo comercial "Mesh & Vane mist eliminators" de la empresa de productos de separación AMISTCO.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Dimensionado del separador vertical					
$k_v$ (ft/s)	0,5	$\rho_L$ (mol/cm <sup>3</sup> )	0,011	$\rho_V$ (mol/cm <sup>3</sup> )	$3,166 \cdot 10^{-5}$
L (Mmol/año)	1979,231	V (Mmol/año)	3308,435	1 ft → m	0,3048
1 año → s	31536000	L (ft <sup>3</sup> /s)	0,203	V (ft <sup>3</sup> /s)	117,017
$v_v$ (ft/s)	9,277	A (ft <sup>2</sup> )	12,614	D (ft)	4,008

Tabla. A2.XXVI. Cálculo del diámetro del separador

Puede apreciarse que los caudales han sido divididos por cuatro: una vez efectuados todos los cálculos, se encontró como mejor solución dividir la corriente de alimentación en cuatro conducciones que alimentarán sendos separadores gemelos, cuyas dimensiones serán las que se definan más adelante.

La razón de la división de corrientes halla explicación en el ingente caudal manipulado, sobre todo desde el punto de vista del vapor: un caudal tan elevado de vapor obligaría a la instalación de una conducción de salida del separador de un diámetro muy elevado, lo que no es acorde tanto con la optimización del coste de inversión como el de mantenimiento y seguridad.

Las conversiones aplicadas para obtener un caudal volumétrico en unidades anglosajonas son las que se muestran seguidamente:

$$(A2.20) \left\{ \begin{array}{l} L \left( \frac{\text{ft}^3}{\text{s}} \right) = \frac{L \left( \frac{\text{Mmol}}{\text{año}} \right)}{\rho_L \left( \frac{\text{mol}}{\text{cm}^3} \right)} \cdot \frac{10^6 \text{ mol}}{1 \text{ Mmol}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{10^6 \text{ cm}^3} \cdot \frac{1 \text{ año}}{31536000 \text{ s}} \cdot \left( \frac{1 \text{ ft}}{0,3048 \text{ m}} \right)^3 \quad (1) \\ V \left( \frac{\text{ft}^3}{\text{s}} \right) = \frac{V \left( \frac{\text{Mmol}}{\text{año}} \right)}{\rho_V \left( \frac{\text{mol}}{\text{cm}^3} \right)} \cdot \frac{10^6 \text{ mol}}{1 \text{ Mmol}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{10^6 \text{ cm}^3} \cdot \frac{1 \text{ año}}{31536000 \text{ s}} \cdot \left( \frac{1 \text{ ft}}{0,3048 \text{ m}} \right)^3 \quad (2) \end{array} \right.$$

Todos los datos para la aplicación de (A2.20) vienen dados en la Tabla A2.XXVI, donde también figuran los caudales calculados. Por aplicación sucesiva de (A2.19.1) a (A2.19.3), se logra dilucidar el diámetro de la unidad.

Seguidamente, puede calcularse la altura de líquido en la unidad. En primer lugar se seleccionará un tiempo de residencia del líquido, en el fondo del separador, comprendido en la horquilla de 3 a 5 minutos, ambos inclusive. En un primer cálculo, se tomará 4 minutos como tiempo intermedio. Debe precisarse la necesidad de fijar un mínimo de nivel de líquido, (a expensas de lo que pueda determinar la expresión que se mostrará más adelante), que prevenga la formación de vórtices en la tubuladura de salida de líquido; este nivel mínimo sugerido es de 2 pies. Asimismo deberá instalarse, en la tubuladura de salida, un rompedor de vórtice radial de paletas (*radial vane vortex breaker*, véase Figura A2.3) con un ancho de dos veces el diámetro del tubo de descarga, (se indicará ulteriormente tal dimensión) y una altura, sobre tal descarga, de un diámetro. Sea:

$$(A2.21) \begin{cases} H_L(\text{ft}) = \frac{L(\text{ft}^3/\text{s}) \cdot t_s(\text{s})}{A(\text{ft}^2)} & (1) \\ H_{L,\text{mín}} = 2 \text{ ft} & (2) \end{cases}$$

Donde  $H_L$  es la altura en pies de la columna de líquido,  $t_s$  es el tiempo de residencia para dicho líquido, seleccionado 240 s (4 min) y  $L$  y  $A$  corresponden al caudal de líquido y al área de la sección transversal, ambos tabulados en A2.XXVI.

La altura final se dilucida considerando las apreciaciones que se efectuarán seguidamente. La longitud desde la abertura de alimentación hasta el extractor de neblina debe tomarse, como recomendación de diseño, como un diámetro ó 3 ft como mínimo. De la misma forma, para prevenir la inundación del separador, debe existir una cierta distancia desde la admisión hasta el nivel de líquido. A esta sazón, la bibliografía consultada en este apartado especifica una longitud igual a la mitad del diámetro o, en todo caso, no menos de 2 ft. La altura se completa considerando el espesor del extractor de neblina, (que se toma como 6 pulgadas, como se señaló *ut supra*), así como una distancia adicional entre el extractor y la abertura de salida de vapor. Esta distancia asegura un flujo uniforme del vapor hacia su conducción correspondiente, puesto que si el extractor se

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

situase en exceso próximo a la salida de vapor la mayor parte del mismo se dirigiría hacia el centro del extractor, reduciéndose tanto su eficacia como la de la separación gas-líquido. La altura recomendada para el concepto anterior es de 12 pulgadas, (1 ft).

Con lo anterior, la altura del separador se calcula como se muestra:

$$(A2.22) \begin{cases} H(\text{ft}) = H_L(\text{ft}) + 1,5D(\text{ft}) + 1,5 & (1) \\ H_{\text{mín}} = 2 + 2 + 3 + 0,5 + 1 = 8,5 \text{ ft} & (2) \end{cases}$$

Donde se considera la contribución a la altura del nivel de líquido,  $H_L$  ó 2 ft, la distancia entre éste y la toma de alimentación,  $0,5D$  ó 2 ft, que sumado a la distancia entre ésta y el extractor de neblina,  $D$  ó 3 ft, supone  $1,5D$ ; el espesor del extracción de neblina, 0,5 ft que sumado a las 12 pulgadas de margen entre la salida de vapor y la cara superior del extractor, supone 1,5 ft. La altura mínima es la suma de las mínimas dimensiones recomendadas.

Las ecuaciones (A2.21) a (A2.22) permiten determinar la altura y con ello concluye el dimensionado del separador. No obstante, los requerimientos de diseño requieren garantizar una relación de altura a diámetro,  $H/D$ , comprendida entre 3 y 5 para separadores verticales. Se indican también dos aspectos adicionales. En primer lugar, si el diámetro encontrado es inferior a 30 in, (2,5 ft), se instalará una tubería en lugar de un separador; no es el caso a tenor de lo obtenido en la Tabla A2.XXVI. El segundo aspecto permite incrementar la longitud de las distancias relacionadas con el diámetro, de modo que la longitud del separador aumente caso de necesitarse aumentar la relación  $H/D$ . Efectuadas las prevenciones, se muestra el resultado de aplicar las ecuaciones (A2.21) a (A2.22) a los datos señalados previamente:

Dimensionado del separador vertical					
$t_s$ (s)	240	$H_L$ (ft)	3,858	$L$ (ft)	11,369
		$H/D$	2,837		

Tabla. A2.XXVII. Cálculo de la altura del separador

La relación H/D es inferior a 3 lo que constata dos hechos. El primero consiste en la ratificación del procedimiento empleado: puesto que H/D es inferior a 5, la elección del separador vertical es la correcta. El segundo hecho obliga a replantear la altura, puesto que H/D es asimismo inferior a 3, el valor mínimo recomendado. A efectos de rehacer el cálculo, se respeta el diámetro calculado previamente y se supone el tiempo de residencia máximo a fin de aumentar la altura de líquido respetándose las distancias desde la alimentación hasta el extractor de neblina, (de un diámetro) y hasta el nivel de líquido, (de medio diámetro). Así se obtiene:

Reiteración del cálculo de la altura			
H (ft)	12,023	$t_s$ (s)	300
$H_L$ (ft)	4,822	$H_{L-E}$ (ft)	2,004
$H_{E-N}$ (ft)	4,008	$H_{N-S}$ (ft)	1,5
H (ft)	12,334	D (ft)	4,008
	H/D	3,078	

Tabla. A2.XXVIII. Cálculo final

Se han vuelto a aplicar (A2.21) a (A2.22) sobre los datos de las tablas A2.XXVI y A2.XXVIII. La primera altura mostrada en A2.XXVIII es la que correspondería a una relación H/D de tres, esto es, el triple del diámetro. La altura del líquido,  $H_L$ , ha aumentado a resultas de la modificación al alza del tiempo de residencia. La longitud  $H_{L-E}$  corresponde a la distancia entre la conducción de alimentación y el nivel de líquido, (se ha mantenido respecto al caso anterior en medio diámetro, como queda indicado). *Ídem ibídem*, la longitud  $H_{E-N}$ , desde la alimentación hasta el extractor de neblina, se mantiene en un diámetro. Por último, la distancia  $H_{N-S}$ , desde la cara superior del extractor de neblina hasta la tubuladura de salida, se conserva en 1,5 ft como en el caso anterior. La nueva suma de alturas viene dada por la segunda altura presentada en la Tabla A2.XXVIII, que se tomará como final. La nueva H/D, cumple con los requisitos de diseño.

Por tanto, la unidad “SIMPLE” se compone de cuatro separadores en paralelo, cada uno de los cuales presenta las siguientes dimensiones:

- Altura de casco, (sin incluir cabezales ni faldón), de 12,334 ft (3,8 m).
- Diámetro interno de 4,008 ft (1,2 m).
- La tubuladura de alimentación de cada separador se localiza a 6,826 ft (2,1 m). Se trata de la suma de  $H_L$  y  $H_{L-E}$ .
- El extractor de neblina, trenzado de hilos de alambre, posee un espesor de 6 pulgadas (153 mm) y se localiza a una altura de 10,834 ft (3,3 m). Se trata de la suma de la anterior y  $H_{E-N}$ . Su diseño se especifica en ulteriores apartados.
- El diseño del rompedor de vórtices se especifica en los siguientes apartados.
- El nivel de líquido en cada separador es de 4,822 ft (1,5 m) y el tiempo de residencia de 5 min (300 s).

Se sigue en los próximos apartados el diseño mecánico de uno de los separadores, que, por ser éstos gemelos, será compartido por los tres restantes.

#### A2.C1.3.2. Diseño mecánico (I). Determinación de la presión de diseño

En el primer apartado de diseño mecánico debe establecerse cuál es la presión para la que se diseñará el equipo. Debe distinguirse entre la presión de operación y la de diseño. La primera es la presión habitual de trabajo a que se someterá el equipo, (como se ha mencionado con anterioridad supone 2,5 atm). La segunda es la presión sobredimensionada que garantice el correcto desempeño mecánico, frente a eventualidades de funcionamiento.

Según normas *ASME*, la presión de diseño se obtiene sumando a la de operación la cantidad mayor entre un 10% de la misma ó 30 psi, (libras fuerza por pulgada cuadrada). Adicionalmente, para la

prueba hidráulica, se considerará la presión que ejercería sobre las paredes del recipiente, el peso de un volumen de agua equivalente al volumen interno del aparato:

$$(A2.23) \begin{cases} P_{diseño} = P_{operación} + (0,1P_{operación} \text{ ó } 30 \text{ psi}) + P_{agua} & (1) \\ P_{agua} = \frac{p_{agua}}{S_{int}} = \frac{m_{agua} \cdot g}{S_{int}} = \frac{\rho_{agua} \cdot V_{int} \cdot g}{S_{int}} & (2) \end{cases}$$

Donde la presión de operación equivale a 2,5 atm, como queda indicado,  $P_{agua}$  es la presión que ejercería el agua sobre las paredes del recipiente completamente lleno,  $p_{agua}$  es el peso del agua, que según la segunda ley de *Newton*, es igual al producto de la masa de agua,  $m_{agua}$  y la aceleración de la gravedad,  $g$ . Por su parte, la masa de agua es el producto de la densidad de la misma por el volumen que ocupa, esto es, el volumen interno del casco, (no se considera el volumen de los cabezales).

Las magnitudes geométricas de volumen y superficie internos,  $V_{int}$  y  $S_{int}$  respectivamente, corresponden a las de un cilindro cuyo diámetro es el tabulado en A2.XXVIII, que en adelante pasa a notarse  $D_i$ , o diámetro interno. La altura del cilindro se encuentra en la misma tabla y se trata de  $H$  recalculada:

$$(A2.24) \begin{cases} V_{int} = \frac{\pi}{4} D_i^2 \cdot H & (1) \\ S_{int} = \pi D_i \cdot H & (2) \end{cases}$$

Conversiones y otros datos		Cálculo para $P_{agua}$		Cálculo para $P_{diseño}$	
1 in → m	0,0254	H (ft)	12,334	$P_{operación}$ (atm)	2,5
1 ft → m	0,3048	T (ft)	4,008	10% P (atm)	0,25
1 lb → kg	0,4535924	V (m <sup>3</sup> )	4,405	30 psi (atm)	2,041
1 mi → m	1609,344	S (m <sup>2</sup> )	14,426	$P_{diseño}$ (psi)	67,174
1 gal(US) → L	3,785412	$m_{agua}$ (kg)	40405,283		
1 h → s	3600	$p_{agua}$ (N)	43201,070		
1 atm → Pa	101325	$P_{agua}$ (atm)	0,030		
1 psi → Pa	6894,757749				
g (ft/s <sup>2</sup> )	32,2				
g (m/s <sup>2</sup> )	9,80665				
$\rho_{agua}$ (kg/m <sup>3</sup> )	1000				

Tabla. A2.XXIX. Cálculo de la presión de diseño

Introduciendo (A2.24) en (A2.23.2) y ésta a su vez en (A2.23.1) sobre los datos referidos y los que se notan en la tabla anterior, de densidad del agua y aceleración de la gravedad, se ha encontrado el valor de la presión de diseño.

La Tabla A2.XXIX incluye las conversiones que se requerirán a lo largo del proceso de diseño mecánico. En este caso, para el cálculo del volumen y superficie internos, se han tomado las dimensiones de altura y diámetro en pies, para luego convertir a unidades SI y así obtener la  $P_{\text{agua}}$ . De igual forma, se ha comparado el valor del 10% de la presión de operación frente a 30 psi, en atmósferas. Se encuentra que ésta última presión es superior a la primera, por lo que convirtiendo a libras por pulgada cuadrada tanto la  $P_{\text{agua}}$  obtenida como la  $P_{\text{operación}}$ , y sumando éstas y 30 psi; se ha obtenido la presión de diseño, conforme a lo establecido en el apartado.

#### A2.C1.3.3. Diseño mecánico (II). Determinación de espesores para el casco y los cabezales sometidos a presión interna

El recipiente diseñado, según la Figura A2.3, consiste básicamente en un cilindro formado por un casco y dos cabezales o tapas, que cierran la unidad por sus lados superior e inferior. Sin embargo, la construcción del recipiente requiere una serie de consideraciones técnicas de diseño que comienzan a estipularse en este apartado.

El casco es la envoltura metálica que constituye el cuerpo del recipiente. Se construye a partir de la soldadura de una serie de chapas o virolas, entendiéndose por virola la porción de casco curvado y soldado longitudinalmente, (por la generatriz del cilindro que se forma al curvar la chapa plana). Las virolas se sueldan unas a otras circunferencialmente, es decir, siguiendo la línea de circunferencia perpendicular al plano del eje del cilindro.

Los cabezales que cierran el casco son de muy diversas formas, dependiendo fundamentalmente de la presión.

La bibliografía consultada\* recomienda utilizar cierres toriesféricos cuando se trabaja a presiones de operación inferiores a 10 atm, como es el caso.

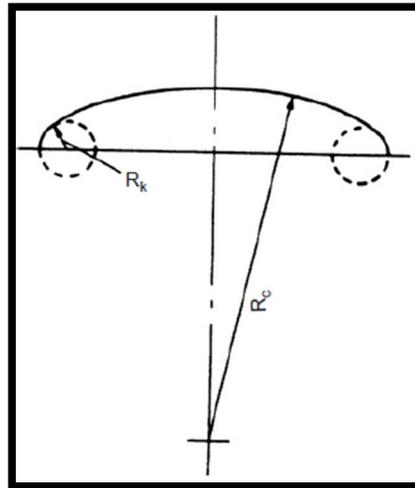


Figura. A2.4. Geometría de un cabezal toriesférico. (G. Towler, R. Sinnott, 2008)

Un cabezal toriesférico es el resultado de abombar una chapa plana por estampación, hasta lograr un cuerpo geométrico que supone la intersección entre un toro de revolución, (o toroide) y un casquete esférico que lo corona. La Figura A2.4 ilustra lo descrito: el toro de revolución viene generado por un círculo de radio  $R_k$  que gira sobre un eje circunferencial perpendicular a dicho círculo generador, mientras que el casquete esférico presenta un radio de curvatura  $R_c$ .

El valor de  $R_c$  se tomará igual al diámetro del casco cuando la presión de operación no supere  $7 \text{ kg/cm}^2$ , (6,8 atm), como es el caso. Estos fondos se conocen como “*fondo Klopper*”, mientras que para presiones de operación comprendidas entre 6,8 y 10 atm, se utilizan fondos “*Korboggen*”, con un radio  $R_c$  de 0,8 veces el diámetro del casco.

En todos los fondos sucede una transición entre la figura bombeada y la cilíndrica del casco. Esta línea de tangencia está sometida

\* Chemical Engineering Design. G. Towler, R. Sinnott. Butterworth-Heinemann, año 2008.

a gran carga axial, por lo que supone el punto más débil de los recipientes a presión. Por este motivo, no es recomendable aplicar el cordón de soldadura justo en la línea de tangencia entre el casco y el cabezal; en su lugar los cabezales se construyen con una faldilla o extensión cilíndrica de los mismos, con una altura determinada, proporcionada por el fabricante.

El recipiente compuesto por el casco y sus correspondientes cabezales, debe diseñarse para soportar tanto su propio peso, como las cargas debidas al viento, sismos, nieve si procediese, peso del líquido en operación y del agua de prueba hidráulica, entre otras. Los recipientes verticales se soportan principalmente sobre faldones: estructuras cilíndricas soldadas a tope al cabezal inferior, de modo que su diámetro externo coincida con el de éste.

Por último, el recipiente incluye distintos registros: entrada y salida de fluidos, *ídem* para aparatos de medición y control, venteos de seguridad, válvulas de seguridad, bocas de hombre, etc.

Valgan los párrafos anteriores como introducción descriptiva de los elementos más significativos de los recipientes a presión, que serán desgranados en apartados posteriores.

El presente apartado contempla el dimensionado de las virolas del casco y de los cabezales sometidos a presión interna. A este objetivo contribuyen distintas expresiones tomadas del libro de *Megyesy*<sup>\*</sup>, compendio de distintos códigos de diseño y construcción de recipientes a presión. Dada la prolijidad de los cálculos que se realizarán en materia de diseño mecánico, en adelante se sustituirá la referencia a algún código en especial por la de *Megyesy*, por motivos de brevedad, siempre que proceda.

Para el espesor de casco sometido a presión interna *Megyesy* recoge las siguientes expresiones:

---

<sup>\*</sup> Manual de recipientes a presión. *E. F. Megyesy*. Limusa. Grupo Noriega Editores, año 1992.

$$(A2.25) \begin{cases} t(\text{in}) = \frac{P(\text{psi}) \cdot R(\text{in})}{S(\text{psi}) \cdot E - 0,6 \cdot P(\text{psi})} & (1) \\ P(\text{psi}) = \frac{S(\text{psi}) \cdot E \cdot t(\text{in})}{R(\text{in}) + 0,6 \cdot t(\text{in})} & (2) \end{cases}$$

Siendo P la presión de diseño tabulada en A2.XXIX, t el espesor, R el radio interior, esto es la mitad del diámetro tabulado en A2.XXVIII, S es el valor de resistencia del material seleccionado, E es la eficacia de la junta de soldadura y P de (A2.25.2) es la presión soportada por el material nuevo.

El material seleccionado para el casco es acero al carbono, según especificación SA-285 grado C. La elección se justifica en el costo: para fluidos no corrosivos como son los tratados, (lo que se verifica tras la lectura del capítulo de corrosión en *Megyesy*), puede seleccionarse el acero al carbono más económico posible, gracias asimismo a los bajos requerimientos mecánicos derivados de una operación a presión baja, (inferior a 5 atm, como es el caso). La resistencia para el material seleccionado, en una horquilla de temperatura de -20 a 650 °F (-28,9 a 343,3 °C) es de S = 13800 psi. Se empleará el mismo material para los cabezales.

Por su parte, la eficacia de soldadura para las juntas del casco se toma como 0,85, (juntas a tope examinadas por zonas). En la siguiente página, (Figura A2.5), se presenta la tabla de *Megyesy*, que proporciona las distintas eficacias requeridas a lo largo del actual capítulo de diseño mecánico.

Con estos datos puede aplicarse (A.25.1) a fin de obtener el espesor del casco. A este espesor debe sumársele un margen de corrosión, C.A. (del inglés *Corrosion Allowance*), que, como criterio de diseño, se toma de 5 milésimas de pulgada por año de vida proyectado.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

TIPOS DE JUNTAS SOLDADAS		EFICIENCIA DE LA JUNTA, E		
TIPOS NORMA UW-12		Cuando la junta es:		
		a. Radiografiada totalmente	b. Examinada por zonas	c. No Examinada
1	 <p>Junta a tope hechas por doble cordón de soldadura o por otro medio con el que se obtenga la misma calidad de metal de soldadura depositada sobre las superficies interior y exterior de la pieza. Si se emplea placa de respaldo, debe quitarse ésta después de terminar la soldadura.</p>	1.00	0.85	0.70
2	 <p>Junta a tope de un solo cordón con tira de respaldo que queda en su lugar después de soldar En juntas circunferenciales únicamente</p>	0.90	0.80	0.65
3	 <p>Junta a tope de un solo cordón sin tira de respaldo</p>	—	—	0.60
4	 <p>Junta a traslape de doble filete completo</p>	—	—	0.55
5	 <p>Junta a traslape de un solo filete completo con soldaduras de tapón</p>	—	—	0.50
6	 <p>Junta a traslape de un solo filete completo sin soldaduras de tapón</p>	—	—	0.45

Figura. A2.5. Eficacias de distintos tipos de soldadura. (E. F. Megyesy, 1992)

Finalmente, la suma del espesor y el margen de corrosión, se redondeará a la suma de fracciones de 1/16 de pulgada más próxima a la obtenida y se introducirá en (A2.25.2) para obtener la presión admitida. Si tal presión excede a la de diseño el cálculo es conforme, puesto que las prestaciones iniciales del material superan las expectativas de diseño, con vistas a la prevención, tomada genéricamente, para prevenir la corrosión. Se obtiene:

<b>Espesor por presión interna</b>	
<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	67,174
<b>S (psi)</b>	13800
<b>E</b>	0,85
<b>R (in) (interior)</b>	24,045
<b>D (in) (interior)</b>	48,090
<b>C.A. (in) (20 años)</b>	0,1
<b>t (in)</b>	<b>0,139</b>
<b>t<sub>c,pi</sub> (in) (20 años)</b>	<b>0,239</b>
<b>P<sub>adm</sub> (psi)</b>	<b>121,203</b>
<b>t<sub>c,circ</sub> (in) (20 años)</b>	<b>0,169</b>

Tabla. A2.XXX. Cálculo del espesor de casco sometido a presión interna

Se ha denominado  $t_{c,pi}$  al espesor final, incluyendo el margen de corrosión, requerido para el casco sometido a presión interna.

Debe matizarse que las ecuaciones (A2.25) se refieren al espesor y presión admitida de acuerdo con el esfuerzo ejercido sobre las costuras longitudinales de las violas. Dichas ecuaciones no consideran el esfuerzo soportado por las costuras circunferenciales, ya que usualmente no superan al esfuerzo ejercido sobre las longitudinales. Expresado en otros términos, si el casco es resistente para el mayor esfuerzo sobre unas costuras, resistirá un esfuerzo menos severo en otras. No en vano es preciso demostrar el extremo anterior y, para ello, se ha calculado el espesor que requeriría el aparato si rigiesen esfuerzos circunferenciales, (se trata del último espesor mostrado,  $t_{c,circ}$ , en la Tabla A2.XXX. El primero,  $t_{c,pi}$ , corresponde al espesor se-

gún esfuerzos longitudinales). Puesto que el espesor a esfuerzo circunferencial es menor que el homólogo a esfuerzo longitudinal, es éste último el más restrictivo y el que se toma como espesor del casco sometido a presión interna. La comprobación del espesor por tensión circunferencial se ha efectuado aplicando:

$$t_{c,circ}(\text{in}) = \frac{P(\text{psi}) \cdot R(\text{in})}{2 \cdot S(\text{psi}) \cdot E + 0,4 \cdot P(\text{psi})} \quad (\text{A2.26})$$

Los datos son los mismos que los empleados para la ejecución de (A2.25.1). Análogamente podría comprobarse la presión admitida, si bien se omite dado que no rige el régimen circunferencial de esfuerzo como queda demostrado.

El redondeo del espesor proporciona:

$$\boxed{t_{c,pi} = 1/4 \text{ de pulgada (6,35 mm)}}$$

Este será el espesor final de casco sometido a presión interna, que se empleará en cálculos posteriores.

Para determinar el espesor de los cabezales se procede de forma similar aplicando las siguientes ecuaciones:

$$(\text{A2.27}) \left\{ \begin{array}{l} t(\text{in}) = \frac{P(\text{psi}) \cdot L(\text{in}) \cdot M}{2 \cdot S(\text{psi}) \cdot E - 0,2 \cdot P(\text{psi})} \quad (1) \\ P(\text{psi}) = \frac{2 \cdot S(\text{psi}) \cdot E \cdot t(\text{in})}{L(\text{in}) \cdot M + 0,2 \cdot t(\text{in})} \quad (2) \\ \frac{L}{r} = 10; M = 1,54 \quad (3) \end{array} \right.$$

Las únicas magnitudes distintas al caso anterior son L, el radio interno de curvatura del cabezal, que, por lo expuesto en este apartado, se tomará igual al diámetro interno, y r, el radio interno de curvatura, ( $R_c$  y  $R_k$ , respectivamente de la Figura A2.4). El factor M, dependiente de L/r, viene dado por Megyesy junto a las expresiones (A2.27). Tomando la presión de operación, el esfuerzo máximo permitido, la eficacia de junta igual a la unidad en este caso, (ya que el

cabezal carece de costura longitudinal) y L igual al diámetro, todos estos datos de la Tabla A2.XXX, por aplicación de (A2.27.1), puede obtenerse el espesor de cada cabezal.

Seguidamente se comprueba la presión admitida por el cabezal aplicando (A2.27.2) a los datos anteriores y al espesor dilucidado, (una vez sumado el mismo margen de corrosión de la Tabla A2.XXX y redondeado a espesor comercial).

No es preciso efectuar distinción entre régimen circunferencial o longitudinal de esfuerzo, ya que la junta de soldadura del casco al cabezal es circunferencial y éste último carece de costuras longitudinales, como presentan las virolas del casco. Con lo anterior, se obtiene:

Espesor por presión interna	
<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	67,174
<b>D (in) (interior)</b>	48,090
<b>S (psi)</b>	13800
<b>E</b>	1
<b>M</b>	1,54
<b>C.A. (in) (20 años)</b>	0,1
<b>t (in)</b>	<b>0,181</b>
<b>t<sub>cab,pi</sub> (in) (20 años)</b>	<b>0,281</b>
<b>P<sub>adm</sub> (psi)</b>	<b>116,364</b>

Tabla. A2.XXXI. Cálculo del espesor de los cabezales sometidos a presión interna

La presión admisible supera la de diseño, por lo que el cálculo es conforme. Así, se toma para cada cabezal el siguiente espesor comercial:

$$t_{cab,pi} = 5/16 \text{ de pulgada (7,9 mm)}$$

Según normas de diseño mecánico, el espesor de los cabezales debe ser superior al del casco, a fin de asegurar un cierre adecuado. Lo que, según lo dado, se corrobora.

En los cálculos de espesor, el diámetro o radio se ha introducido como suma del interno más el margen de corrosión, como criterio conservador sugerido por *Megyesy*.

#### A2.C1.3.4. Diseño mecánico (III). Determinación del espesor del aislamiento y de la chapa envolvente

Puesto que la operación de separación es fuertemente dependiente de la temperatura, debe garantizarse la invariabilidad de la misma frente a las inclemencias meteorológicas propias de la zona de instalación de la planta.

Sobre la ubicación de la planta para el proceso de que es objeto el presente PFC se da cumplida exposición en la memoria descriptiva, por lo que se omitirá redundar en los distintos aspectos que aquella abordó. No en vano, es preciso sacar a colación los datos climatológicos que atañen al aislamiento térmico de las unidades: las temperaturas medias de las máximas y mínimas absolutas.

Normalmente, los estudios históricos representativos sobre el clima de una región involucran medidas de una magnitud, a la sazón, la temperatura atmosférica, de un período no inferior a 30 años. Las estaciones meteorológicas registran diariamente las temperaturas máximas y mínimas. El promedio de dichas temperaturas proporciona la temperatura media diaria que, a su vez, se vuelven a promediar mensualmente obteniéndose el perfil del año concreto.

Eventualmente, se producen excursiones del comportamiento medio anual, registrándose picos de temperatura tanto máxima como mínima. Para garantizar un diseño seguro, debería tomarse la mayor temperatura máxima, y la menor mínima, comprendidas en el período del estudio climatológico. Sin embargo, en aras de minimizar el coste de instalación, es recomendado tomar la temperatura media de las máximas y mínimas absolutas. Estos valores son suficientemente representativos de las variaciones extremas del comportamiento habitual climatológico, lo que es garante de una elevada probabilidad de

operación segura, puesto que las excursiones de temperatura son poco comunes.

El estudio base empleado en el presente PFC procede de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Se han tomado las temperaturas medias de las máximas y mínimas absolutas, correspondientes a un período de 59 años (1952-2011), según datos proveídos por la estación meteorológica del Aeropuerto de Jerez de la Frontera. Dicha estación es el observatorio más próximo al campo de Gibraltar, donde se ubicaría la planta de procesos objeto del PFC. Considerando que el perfil de temperaturas en dicha región es algo más benigno que en los alrededores de la población jerezana, la referencia tomada garantiza un funcionamiento adecuado de la operación "SIMPLE" con una probabilidad suficiente.

Se toman las siguientes temperaturas:

$$\mathbf{T \text{ (media de máximas absolutas) = } 36,6 \text{ }^\circ\text{C}}$$

$$\mathbf{T \text{ (media de mínimas absolutas) = } 1,7 \text{ }^\circ\text{C}}$$

Estas serán las temperaturas ambiente que se tomen para calcular el espesor de aislante requerido. Se practicará un procedimiento de cálculo dividido en dos partes: estimación del espesor de aislante a temperatura máxima, en primer lugar, e *ídem* para temperatura mínima. La ecuación del citado método es la que se muestra seguidamente:

$$(A2.28) \left\{ \begin{array}{l} Q(\text{W/m}^2) = \frac{T_{op}(\text{K}) - T_{amb}(\text{K})}{\frac{t_{ais}(\text{m})}{k(\frac{\text{W}}{\text{mK}})} - \frac{1}{f(\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}})}}, \text{ con } f = h_c + h_r(1) \\ h_c = 3,0075C \left[ \frac{1,11}{T_s + T_{amb} - 510,44} \right]^{0,181} [1,8(T_s - T_{amb})]^{0,266} \sqrt{1 + 7,9366 \cdot 10^{-4}v}(2) \\ h_r = 0,9824\varepsilon \left[ \frac{T_s^4 - T_{amb}^4}{T_s - T_{amb}} \right] (3) \end{array} \right.$$

Donde  $Q$  es el calor transferido por el aislamiento,  $T_{op}$  es la temperatura de operación tomada de la Tabla A2.V,  $T_{amb}$  es la temperatura ambiente, (las dos mostradas en el presente apartado),  $t$  corresponde al espesor de aislante precisado,  $k$  es la conductividad del material aislante, lana de vidrio cuyo valor, según el portal de ingeniería *Construmática*, es  $k = 0,042 \text{ W/mK}$ ;  $f$  es la suma de los coeficientes de transporte de calor convectivo,  $h_c$  y radiante,  $h_r$ ,  $C$  es un factor de forma que, para geometrías cilíndricas adquiere un valor de 1,016,  $T_s$  es la temperatura de la superficie expuesta del aislante en K,  $v$ , que debe introducirse en m/h, es la velocidad del viento, (29 m/s, se justificará en el cálculo de la carga por viento) y  $\epsilon$  es la emisividad de la envolvente protectora del arreglo aislante, (se toma 0,4 para aluminio 1100 según el libro de *Smith*<sup>\*</sup>). La magnitud  $t_{ais}$  es el espesor del aislamiento.

Los coeficientes de transporte  $h_c$  y  $h_r$  están dados en las mismas unidades que el coeficiente de transporte de calor por conducción, (el primer sumando del denominador de (A2.28.1),  $t/k$ ).

Las expresiones de (A2.28) se han tomado de una norma<sup>†</sup> para aislamiento térmico de equipos, de la empresa de Petróleos Mexicanos, *PEMEX*. Son válidas para estructura plana de geometría cilíndrica, (como son los recipientes a presión), para el caso de temperatura ambiente menor que la de operación. Cuando se opera a temperatura próxima a la ambiental, es preciso garantizar que el aislamiento cumple con el mantenimiento de la temperatura de operación, tanto cuando la temperatura ambiental es menor que la de operación en los meses fríos, como cuando es mayor en época estival.

Lo anterior explica la necesidad, tal como queda expuesto, de aplicar dos veces el procedimiento de cálculo del espesor de aislante. Para el caso de temperatura ambiente mayor que la de operación,

<sup>\*</sup> Fundamentos de Ciencia e Ingeniería de Materiales. *W. F. Smith, J. Hashemi*. 4ª Edición. Ed. McGraw-Hill.

<sup>†</sup> Norma de referencia *NRF-034-PEMEX-2004*. Aislamientos térmicos para altas temperaturas en equipos, recipientes y tubería superficial.

las ecuaciones (A2.28) son válidas siempre que se cambie el signo en la suma de temperaturas, (de modo que se obtengan resultados positivos).

El procedimiento de cálculo es el que sigue:

- La temperatura de la superficie del aislante es desconocida: tómesese, en primera iteración, promediando  $T_{op}$  y  $T_{amb}$ .
- Dada  $T_s$ , pueden obtenerse  $h_c$  y  $h_r$  aplicando (A2.28.2) y (A2.28.3).
- Despéjese  $t_{ais}$  de (A2.28.1).

La ecuación (A2.28.1) despejada en  $t_{ais}$  queda en función del calor transferido en el aislamiento. Para diámetros de recipiente superiores a 30 in, como es el caso, (véase Tabla A2.XXX), el anexo B de la *NRF-034-PEMEX-2004*, proporciona un valor asumible de dicho calor de  $Q = 29,60 \text{ W/m}^2$  para  $T_{op}$  de hasta  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Aplicada esta primera parte del procedimiento, se obtiene un espesor de aislante que será el adecuado siempre que se verifique, simultáneamente, la coincidencia de  $T_s$  recalculada con  $T_s$  supuesta. La temperatura  $T_s$  se recalcula considerando la transferencia de calor desde el exterior a la superficie del aislamiento:

$$Q = \frac{T_s - T_{amb}}{\frac{1}{\bar{f}}} \Rightarrow T_s (\text{K}) = \frac{Q \left( \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right)}{f \left( \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right)} + T_{amb} (\text{K}) \quad (\text{A2.29})$$

Se rehará el procedimiento indicado los guiones anteriores, cambiando a la  $T_s$  recalculada en cada reiteración hasta lograr la convergencia. Para temperatura ambiente inferior a la de operación se obtuvieron los siguientes resultados:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Aislamiento			
$T_{op}$ (K)	293,52	$T_{amb}$ (K)	274,85
$Q$ (W/m <sup>2</sup> )	29,60	$k$ (W/mK)	0,042
$v$ (m/h)	104400	$\epsilon$	0,4
$c$	1,016	$T_s$ (K)	284,18
$h_c$ (W/m <sup>2</sup> K)	29,906	$h_r$ (W/m <sup>2</sup> K)	0,343
$1/f$ (m <sup>2</sup> K/W)	0,033	$t_{ais}$ (mm)	<b>25,102</b>

Tabla. A2.XXXII. Cálculo del espesor de aislamiento ( $T_{op} > T_{amb}$ ). 1ª iteración

La temperatura ambiente es la media de las mínimas absolutas. Se recalcula la temperatura de superficie,  $T_s$  aplicando (A2.29) sobre los datos obtenidos en la primera iteración. Se obtiene:

Aislamiento			
$T_s$ (K)	275,83	$h_c$ (W/m <sup>2</sup> K)	16,984
$h_r$ (W/m <sup>2</sup> K)	0,328	$1/f$ (m <sup>2</sup> K/W)	0,058
$T_s$ (K)	276,56	$t_{ais}$ (mm)	<b>24,065</b>

Tabla. A2.XXXIII. Cálculo del espesor de aislamiento ( $T_{op} > T_{amb}$ ). 2ª iteración

La primera  $T_s$  mostrada en la Tabla A2.XXXIII, corresponde a la segunda iteración y es bastante discordante respecto de la supuesta inicialmente, promediada entre las temperaturas de operación y ambiente. La segunda  $T_s$  mostrada en la misma tabla corresponde a la tercera iteración. Al repetir sucesivamente los cálculos se obtiene, para la sexta iteración:

Aislamiento			
$T_s$ (K)	276,37	$h_c$ (W/m <sup>2</sup> K)	19,058
$h_r$ (W/m <sup>2</sup> K)	0,329	$1/f$ (m <sup>2</sup> K/W)	0,052
$T_s$ (K)	276,38	$t_{ais}$ (mm)	<b>24,325</b>
$t_{ais}$ (mm)	<b>25</b>	in	<b>0,984</b>
	$Q$ (W/m <sup>2</sup> )	<b>28,864</b>	

Tabla. A2.XXXIV. Cálculo del espesor de aislamiento ( $T_{op} > T_{amb}$ ). 6ª iteración

De nuevo la primera  $T_s$  corresponde a la iteración previa, y la segunda a la recalculada para la última iteración. Se redondea el es-

pesor a 25 mm, (espesor comercial), y se comprueba el calor transferido por este espesor de aislamiento, por aplicación de (A2.28.1) sobre los datos más recientes de la Tabla A2.XXXIV y las temperaturas de operación y ambiente y conductividad consignadas en la Tabla A2.XXXII. El calor transferido es inferior a  $29,60 \text{ W/m}^2$ , el valor permitido, por lo que el espesor para temperatura de operación mayor que la ambiente es conforme.

Aislamiento			
$T_{op} \text{ (K)}$	293,52	$T_{amb} \text{ (K)}$	309,75
$Q \text{ (W/m}^2\text{)}$	29,60	$k \text{ (W/mK)}$	0,042
$v \text{ (m/h)}$	104400	$\epsilon$	0,4
$C$	1,016	$T_s \text{ (K)}$	301,63
$h_c \text{ (W/m}^2\text{K)}$	25,241	$h_r \text{ (W/m}^2\text{K)}$	0,449
$1/f \text{ (m}^2\text{K/W)}$	0,039	$t_{ais} \text{ (mm)}$	<b>21,394</b>

Tabla. A2.XXXV. Cálculo del espesor de aislamiento ( $T_{op} < T_{amb}$ ). 1ª iteración

En la Tabla A2.XXXV se repite el procedimiento mostrado en las tres tablas previas, al objeto de hallar el espesor indicado cuando la temperatura de operación es inferior a la ambiente, esto es, considerando la temperatura ambiente la media de las máximas absolutas.

Las propiedades son las mismas, incluido el máximo calor permitido, y las ecuaciones de nuevo son aplicables cambiando el signo a las operaciones con temperaturas, como queda indicado. Los cálculos en la primera iteración proporcionan los resultados presentados en la Tabla A2.XXXV.

Iterando seis veces se obtiene:

Aislamiento			
$T_s \text{ (K)}$	308,02	$h_c \text{ (W/m}^2\text{K)}$	16,560
$h_r \text{ (W/m}^2\text{K)}$	0,463	$1/f \text{ (m}^2\text{K/W)}$	0,059
$T_s \text{ (K)}$	308,01	$t_{ais} \text{ (mm)}$	<b>20,562</b>
$t_{ais} \text{ (mm)}$	<b>25</b>	<b>in</b>	<b>0,984</b>
	$Q \text{ (W/m}^2\text{)}$	<b>24,817</b>	

Tabla. A2.XXXVI. Cálculo del espesor de aislamiento ( $T_{op} < T_{amb}$ ). 6ª iteración

De nuevo el calor transferido a través del aislamiento es inferior al permitido, con lo que el espesor obtenido es conforme.

Debe tomarse, de entre los dos espesores, el más restrictivo que garantizará el aislamiento en condiciones de temperatura de operación mayor o menor que la ambiente. En este caso el espesor es el mismo en los dos casos desarrollados por tanto se tiene:

$$t_{\text{ais}} = 25 \text{ mm}$$

La normativa *PEMEX* consultada indica proteger el aislamiento mediante el recubrimiento con una chapa de aluminio de aleación 1100 con tratamiento de envejecido H14, de 0,61 mm (0,024 in) de espesor. En definitiva, se tiene como espesor de la envolvente de aluminio:

$$t_{\text{env}} = 0,61 \text{ mm}$$

Según normas ASTM B 209, incluirá recubrimiento corrosivo a base de papel *kraft* con película de polietileno para protección contra intemperie.

#### A2.C1.3.5. Diseño mecánico (IV). Determinación del espesor requerido para soportar la carga por viento

Las torres se exponen al ataque de los elementos meteorológicos como son el viento, los sismos y las nevadas. Tomando datos de *AEMET*, se constata el no registro de días de nieve, por lo que este esfuerzo puede preterirse en lo que toca al diseño mecánico.

La carga que sufren los equipos por golpe sísmico se estudiará en apartados posteriores, por lo que el presente apartado se dedica al diseño del espesor resistente al eventual ataque del viento.

Los recipientes sujetos a empuje eólico se consideran vigas en voladizo sobre las que actúa una carga uniforme. El procedimiento para el cálculo del espesor resistente se basa en determinar el esfuerzo cortante y el momento máximo en la base del recipiente. La

formulación para estos cálculos se ha tomado de *Megyesy* y se participa seguidamente:

$$(A2.30) \left\{ \begin{array}{l} V(\text{lb}) = P_w(\text{lb}/\text{ft}^2) \cdot D_e(\text{ft}) \cdot H_{tot}(\text{ft}) \quad (1) \\ M(\text{lb}\cdot\text{ft}) = V(\text{lb}) \cdot h_1(\text{ft}) \quad (2) \\ M_T(\text{lb}\cdot\text{ft}) = M(\text{lb}\cdot\text{ft}) - h_T(\text{ft}) \left( V(\text{lb}) - 0,5 \cdot P_w(\text{lb}/\text{ft}^2) \cdot D_e(\text{ft}) \cdot h_T(\text{ft}) \right) \quad (3) \\ t_{c,w}(\text{in}) = \frac{12 \cdot M_T(\text{lb}\cdot\text{ft})}{R_m^2(\text{in}) \cdot \pi \cdot S(\text{psi}) \cdot E} \end{array} \right.$$

Donde  $V$  es la fuerza cortante total,  $P_w$  la presión del viento,  $D_e$  el diámetro externo del recipiente, (incluyendo casco, aislamiento y chapa envolvente),  $H_{tot}$  es la altura total del recipiente, (incluyendo al faldón cuya altura es  $h_T$ ),  $M$  es el momento máximo tomado en la base del recipiente,  $h_1$  la mitad de la altura total tomada como brazo de palanca,  $M_T$  el momento a la altura del faldón,  $t_{c,w}$  el espesor requerido del casco sometido a carga de viento,  $R_m$  el radio medio del recipiente,  $S$ , el esfuerzo admisible del material y  $E$ , la eficacia de la junta de soldadura longitudinal. Estos dos últimos valores son comunes a los de apartados previos. La siguiente figura ilustra las distintas medidas presentadas:

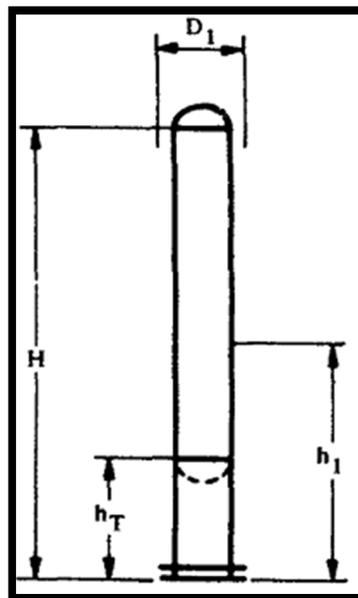


Figura. A2.6. Dimensiones del recipiente a presión. (*E. F. Megyesy, 1992*)

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Donde  $H$  y  $D_1$  corresponden a  $H_{\text{tot}}$  y  $D_e$  respectivamente, tal como se ha señalado previamente.

La presión del viento depende de las condiciones meteorológicas en la región en que se ubican las instalaciones. Presenta la siguiente expresión de cálculo:

$$P_w (\text{lb/ft}^2) = q_s (\text{lb/ft}^2) \cdot C_q \cdot C_e \quad (A2.31)$$

Donde  $q_s$  es la presión de estancamiento del viento, dependiente de la velocidad básica del viento a una altura determinada. El factor  $C_q$  es un coeficiente de forma, (denominado coeficiente de presión), que para recipientes cilíndricos con tubuladuras adquiere el valor de 0,9. Por último,  $C_e$  corresponde al coeficiente del factor de ráfagas. Este coeficiente se tabula en función de la altura sobre el suelo del recipiente y de la exposición, como figura en la siguiente tabla:

Coeficiente $C_e$		
Altura sobre el suelo (ft)	Exposición C	Exposición B
0-20	1,2	0,7
20-40	1,3	0,8
40-60	1,5	1,0
60-100	1,6	1,1
100-150	1,8	1,3
150-200	1,9	1,4
200-300	2,1	1,6
300-400	2,2	1,8

Tabla. A2.XXXVII. Factor  $C_e$  para estimación de la presión de viento

Seguidamente se calcula la presión del viento. Obsérvese el siguiente mapa:



Figura. A2.7. Mapa eólico nacional. (DB-HS de CTE de 2006)

La Figura A2.7, presenta el mapa eólico nacional extraído del Documento Básico de Higiene y Salubridad enmarcado en el Código Técnico de la Edificación aprobado por Real Decreto 314/2006 de 17 de marzo. Considerando la ubicación de la planta, para el proceso objeto del PFC, en el Campo de Gibraltar, según el mapa ésta se encuentra en “zona C”, a la que corresponde una velocidad básica del viento de 29 m/s.

La presión de estancamiento del viento viene proporcionada por *Megyesy* en forma tabular:

Presión de estancamiento, $q_s$	
Velocidad básica del viento (mi/h)	$q_s$ (lb/ft <sup>2</sup> )
70	13
80	17
90	21
100	26
110	31

Tabla. A2.XXXVIII. Presión  $q_s$  para estimación de la presión de viento

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Convirtiendo 29 m/s a mi/h (millas por hora), haciendo uso de la conversión proporcionada en la Tabla A2.XXIX, se tiene una velocidad básica de 64,87 mi/h. Se toma por tanto la velocidad básica del viento como 70 mi/h a la que corresponde una presión de estancamiento de 13 lb/ft<sup>2</sup>, según la Tabla A2.XXXVIII.

Atendiendo a la altura recalculada de la Tabla A2.XXVIII, se selecciona de la Tabla A2.XXXVII el factor  $C_e = 1,2$ , correspondiente a “exposición C” para una altura comprendida entre 0 y 20 pies. La exposición C se refiere a terreno plano y abierto que permite la libre circulación del viento en torno a las instalaciones, (es la elección típica para el diseño de plantas petroquímicas, por suponer condiciones más severas). La exposición B se selecciona cuando el terreno está rodeado por construcciones, bosques u otros obstáculos que dificulten el normal flujo del viento, (y por tanto abriguen a las instalaciones). Con todo lo anterior, por aplicación de la ecuación (A2.31), sobre los datos considerados, se obtiene:

Presión del viento					
Velocidad básica del viento (m/s)		29	(mi/h)	70	
$q_s$ (lb/ft <sup>2</sup> )	13	$C_e$	1,2	$C_q$	0,9
		$P_w$ (lb/ft <sup>2</sup> )	14,04		

Tabla. A2.XXXIX. Estimación de la presión del viento

Sigue el cálculo del diámetro externo, incluyendo casco, aislamiento y chapa envolvente:

$$D_e(\text{ft}) = D_i(\text{ft}) + 2t_{c,pi}(\text{ft}) + 2t_{ais}(\text{ft}) + 2t_{env}(\text{ft}) \quad (\text{A2.32})$$

Donde  $t_{c,pi}$  es el espesor del casco sometido a presión interna,  $t_{ais}$  el espesor del aislamiento y  $t_{env}$  el espesor de la chapa envolvente, (todos ellos oportunamente convertidos a pies usando las conversiones de la Tabla A2.XXIX). Cada uno de estos espesores se especificó en los apartados A2.C1.3.3 y A2.C1.3.4: 1/4 de pulgada, 25 y 0,61 mm, respectivamente. Tomando el diámetro interno de la Tabla A2.XXVIII el diámetro externo se recoge en la siguiente tabla:

Carga por viento					
<b>P<sub>w</sub> (lb/ft<sup>2</sup>)</b>	14,04	<b>D<sub>e</sub> (ft)</b>	4,217	<b>E</b>	0,85
<b>h<sub>T</sub> (ft)</b>	6,562	<b>H<sub>tot</sub> (ft)</b>	18,895	<b>h<sub>1</sub> (ft)</b>	9,448
<b>H<sub>esc</sub> (ft lin.)</b>	16,895	<b>H<sub>plat</sub> (ft lin.)</b>	8	<b>N° plataformas</b>	2
		<b>S (psi)</b>	13800		

Tabla. A2.XL. Datos previos para la estimación de la carga por viento

En la Tabla A2.XL se ha incluido tanto la presión del viento, recién calculada, como el diámetro externo. Asimismo se han presentado la eficacia de soldadura para juntas longitudinales examinadas por zonas, E y la altura del faldón  $h_T$  que, según *Megyesy*, se ha tomado de 2 m, (figura tabulada su equivalencia en pies). Entre los demás datos figura la altura total, calculada según:

$$H_{tot}(\text{ft}) = H(\text{ft}) + h_T(\text{ft}) \quad (A2.33)$$

Donde H es la altura recalculada del recipiente tomada de la Tabla A2.XXVIII y  $h_T$  es la altura del faldón, que, como queda indicado, viene tabulada en A2.XL.

La altura  $h_1$  es la mitad de la altura total, tomada como brazo de palanca para el cálculo de momentos.

Los recipientes a presión deben incluir registros que permitan el acceso a operarios, ante la eventual necesidad de efectuar operaciones de mantenimiento y limpieza. Para los recipientes objeto de diseño, se contempla la instalación de una escalera y dos plataformas a la altura de las entradas de hombre previstas: una próxima a la tubería de alimentación y otra cercana a la de descarga, que dé acceso tanto a dicha tubuladura, como al extractor de neblina.

La escalera presenta el área equivalente a su altura en pies lineales, (la altura de la escalera es dos pies menor que la total del recipiente), mientras que cada una de las plataformas presentan un área correspondiente a 8 pies lineales. (Las dimensiones de las es-

caleras y plataformas están estandarizadas y se han mostrado en la memoria descriptiva). De esta forma:

$$(A2.34) \begin{cases} H_{esc} \text{ (ft lin.)} = H_{tot} \text{ (ft)} - 2 \\ H_{plat} \text{ (ft lin.)} = 8 \end{cases}$$

Estas dos magnitudes son las últimas incluidas en la Tabla A2.XL. Haciendo uso de los datos de dicha tabla, pueden aplicarse las expresiones (A2.30) con las siguientes particularidades para cada elemento del recipiente:

$$(A2.35) \begin{cases} V \text{ (lb)} \begin{cases} \text{Casco: (A2.30.1)} \\ \text{Escalera: } V \text{ (lb)} = P_w \text{ (lb/ft}^2\text{)} \cdot H_{esc} \text{ (ft lin.)} \text{ (1)} \\ \text{Plataformas: } V \text{ (lb)} = P_w \text{ (lb/ft}^2\text{)} \cdot H_{plat} \text{ (ft lin.)} \text{ (2)} \end{cases} \\ M \text{ (lb}\cdot\text{ft)} \begin{cases} \text{Casco: (A2.30.2)} \\ \text{Escalera: } M \text{ (lb}\cdot\text{ft)} = V \text{ (lb)} \cdot \frac{H_{esc}}{2} \text{ (ft)} \text{ (3)} \\ \text{Plataformas: } M \text{ (lb}\cdot\text{ft)} = V \text{ (lb)} \cdot h_{plat,i} \text{ (ft)} \text{ (4)} \end{cases} \end{cases}$$

Debe calcularse el cortante, causado por el esfuerzo debido al viento, sobre cada uno de los elementos externos del recipiente y de este mismo. Cada una de las plataformas contribuye al cortante con el valor que determina la aplicación de (A2.35.2) y el cortante total es la suma de la aplicación de (A2.30.1), esto es, el cortante del casco, (A2.35.1), el cortante de la escalera y los dos cortantes de las plataformas.

Análogamente, el momento para el casco se calcula según (A2.30.2) y, sumado al momento de la escalera, dado por (A2.35.3) y los momentos de las plataformas, dados por (A2.35.4); proporcionan el momento máximo de la torre a la altura de la base. La única magnitud nueva es  $h_{plat,i}$ , que corresponde a la distancia desde el suelo a que se disponen cada una de las dos plataformas. Este par de datos se tabulan seguidamente junto a la aplicación de las ecuaciones (A2.35) y (A2.30) para obtener el espesor requerido para soportar la carga por viento:

<b>Carga por viento</b>					
<b>V (lb)</b>	1118,786	<b>M (lb-ft)</b>	10569,914	<b>Casco</b>	
<b>V (lb)</b>	237,210	<b>M (lb-ft)</b>	2003,873	<b>Escalera</b>	
<b>V (lb)</b>	112,320	<b>M (lb-ft)</b>	1503,720	<b>h<sub>plat,1</sub> (ft)</b>	13,388
<b>V (lb)</b>	112,320	<b>M (lb-ft)</b>	1897,683	<b>h<sub>plat,2</sub> (ft)</b>	16,895
<b>V (lb)</b>	1580,636	<b>M (lb-ft)</b>	15975,190	<b>Total</b>	
<b>M<sub>T</sub> (lb-ft)</b>	6878,214	<b>R<sub>m</sub> (in)</b>	24,674	<b>t<sub>c,w</sub> (in)</b>	<b>0,004</b>

Tabla. A2.XLI. Primera estimación del espesor por carga del viento

El radio medio  $R_m$  se ha calculado según:

$$R_m (\text{in}) = \frac{D_e (\text{in}) + D_i (\text{in})}{4} \quad (\text{A2.36})$$

Es decir, la mitad del promedio de los diámetros que se toman de las tablas A2.XXVIII y A2.XL, (debidamente convertida).

Las alturas de las plataformas corresponden: la primera a la suma de la altura del faldón  $h_T$ , la altura del líquido  $H_L$  y la distancia entre la anterior y la entrada,  $H_{L-E}$ ; y la segunda a la altura de la escalera,  $H_{esc}$ . Las alturas se han tomado de las tablas A2.XXVIII y A2.XL.

El espesor calculado debe añadirse al encontrado para presión interna. Se está en condiciones de estimar el peso del recipiente en una primera prueba.

#### A2.C1.3.6. Diseño mecánico (V). Determinación del peso del aparato en operación

Los siguientes cálculos requerirán conocer el peso del aparato, por lo que, llegado este punto se hace preciso dilucidarlo en una primera prueba.

El aparato está compuesto por: casco, cabezales, plataformas, escalera, envolvente de aluminio, aislamiento y líquido en operación en primera instancia. Conocido el peso en operación del recipiente,

podrá estimarse tanto el espesor del faldón como aquél preciso para soportar la carga sísmica. Conocidos éstos se reevalúa la carga por viento, (ya que el espesor del casco es mayor al sumar la anterior contribución), se efectúa lo propio con el peso y así sucesivamente hasta lograr la convergencia.

El primer elemento mencionado en el presente cálculo es el casco. Conocida la geometría del cilindro, el volumen de material viene dado por:

$$V_{casco}(\text{in}^3) = \frac{\pi}{4} [D_{e,c}^2(\text{in}) - D_i^2(\text{in})]H(\text{in}) \quad (\text{A2.37})$$

El diámetro interno y la altura del casco, (recalculada) se toman y convierten oportunamente de la Tabla A2.XXVIII. El diámetro externo se calcula a partir del interno conocido el espesor del casco. Sean las siguientes expresiones:

$$(\text{A2.38}) \begin{cases} t_{c,pi+w}(\text{in}) = t_{c,pi}(\text{in}) + t_{c,w}(\text{in}) & (1) \\ D_{e,c}(\text{in}) = D_i(\text{in}) + 2t_{c,pi+w}(\text{in}) & (2) \end{cases}$$

Donde  $t_{c,pi+w}$  es la suma de los espesores del casco sometido a presión interna y la carga del viento, (tomados, respectivamente de A2.XXX y A2.XLI). El espesor debe redondearse convenientemente al valor comercial, como se ha efectuado en apartados anteriores.

Conocido el volumen del casco, una vez aplicadas (A2.38) y (A2.37), el peso del mismo se calcula según:

$$\rho = mV \Rightarrow m_{casco}(\text{lb}) = \rho_{acero}(\text{lb}/\text{in}^3)V_{casco}(\text{in}^3) \quad (\text{A2.39})$$

La densidad teórica del acero se ha tomado de *Megyesy*, (es la que emplea el autor para calcular el peso de cascos y cabezales), con el valor de  $\rho_{acero} = 0,28333 \text{ lb}/\text{in}^3$ . Se tiene:

Peso del separador						
$t_{c,pi+w}$ (in)	0,242	1/4"	$D_i$ (in)	48,090	$D_{e,c}$ (in)	48,590
H (in)	148,004	$\rho_{acero}$ (lb/in <sup>3</sup> )	0,28333	$m_{casco}$ (lb)	1592,070	

Tabla. A2.XLII. Primera estimación del peso del casco

Se sigue el cálculo del peso de cada cabezal. La geometría de estos elementos es algo más complicada que la del casco cilíndrico. Ilústrese con la figura siguiente las dimensiones correspondientes al cabezal toriesférico tipo “Klopper”, seleccionado y justificado en apartados precedentes:

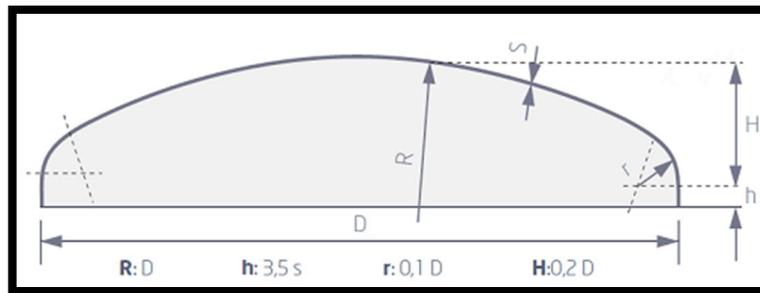


Figura. A2.8. Dimensiones de un cabezal Klopper.  
(Catálogo de fondos. Empresa Hermanos García y Pazo, 2010)

Las relaciones dimensionales permiten encontrar unas distancias conocidas otras. El casquete toriesférico está formado por el sector abombado superior de altura H, (en la Figura A2.8), y una extensión cilíndrica, denominada faldilla, concebida para relajar las tensiones en la soldadura al casco. La empresa guipuzcoana FACME proporciona la siguiente expresión para el cálculo del volumen del sector abombado. El cilíndrico se calcula como en el caso anterior. Son de aplicación las siguientes expresiones:

$$(A2.40) \left\{ \begin{array}{l} V_{sect.bomb.}(in^3) = 0,054[D_{e,cab}^3(in) - D_i^3(in)] + 0,44[D_{e,cab}^2(in)r_e(in) - D_i^2(in)r_i(in)](1) \\ V_{sect.cil.}(in^3) = \frac{\pi}{4}[D_{e,cab}^2(in) - D_i^2(in)]h(in) = \frac{7\pi}{8}[D_{e,cab}^2(in) - D_i^2(in)]t_{cab,pi}(in)(2) \\ V_{cabezal}(in^3) = V_{sect.bomb.}(in^3) + V_{sect.cil.}(in^3)(3) \\ m_{cabezal}(lb) = \rho_{acero}(lb/in^3)V_{cabezal}(in^3)(4) \end{array} \right.$$

Donde el diámetro interno,  $D_i$  es el tomado de la Tabla A2.XXVIII, convertido convenientemente y  $t_{cab,pi}$  es el espesor, debidamente redondeado al valor comercial, de los cabezales sometidos a presión interna, dado en la sección A2.C1.3.3. En la expresión del volumen del sector cilíndrico se ha cambiado la altura de la faldilla,  $h$ , por su igual dado en la Figura A2.8: 3,5 veces el espesor  $t_{cab,pi}$ . El diámetro externo en este caso se calcula, conocido el espesor de los cabezales, según:

$$D_{e,cab} (in) = D_i (in) + 2t_{cab,pi} (in) \quad (A2.41)$$

Los radios  $r_e$  y  $r_i$  corresponden a los radios de curvatura de la circunferencia generadora del toroide, ligados respectivamente a los diámetros externo e interno según la relación dada en la Figura A2.8 y también presentada entre las expresiones (A2.27).

Finalmente, la densidad del acero es la misma que la empleada para el cálculo del peso del casco, se toma de la Tabla A2.XLII. Describa la procedencia de los datos, se aplican las ecuaciones (A2.40) y se obtiene, para cada cabezal:

Peso del separador						
$t_{cab,pi}$ (in)	0,281	5/16"	$D_i$ (in)	48,090	$D_{e,cab}$ (in)	48,715
L/r	10	$r_i$ (in)	4,809	$r_e$ (in)	4,872	
$m_{cabezal}$ (lb)				136,698		

Tabla. A2.XLIII. Primera estimación del peso de un cabezal

Obsérvese que la nomenclatura L y  $R = D$ , en la Figura A2.8, puede usarse indistintamente, como queda explicado.

El peso de cada plataforma y de la escalera se ha tomado directamente de Megyesy:

Peso del separador			
$m_{plataforma}$ (lb)	1160	$m_{escalera}$ (lb/ft)	28,571

Tabla. A2.XLIV. Peso de plataformas y escalera

Donde el peso de la escalera se ha expresado en términos unitarios respecto a la altura. A fin de obtener el peso real, se multiplicará el anterior por su altura. El peso de las plataformas se multiplicará por el número de éstas.

Sigue el cálculo del peso de aislamiento y chapa envolvente. Ambos son descritos geoméricamente por un cilindro hueco, por lo que el volumen se estima de forma análoga a como se ha practicado anteriormente. Es de utilidad la ecuación (A2.37) *mutatis mutandis* los subíndices para el volumen del casco y el diámetro interno, (véase más abajo); *ídem* aplica la ecuación (A2.39), en este caso cambiando subíndices de masa, volumen y densidad.

La densidad teórica del aluminio 1100 H14, se ha tomado de un catálogo comercial de la empresa *Ulbrinox*. La densidad del aislamiento, (lana de vidrio) se ha tomado de otro catálogo comercial, en este caso, de la empresa *Big Mat*. Los valores son los que siguen:  $\rho_{\text{aluminio}} = 0,098 \text{ lb/in}^3$  y  $\rho_{\text{lana de vidrio}} = 65 \text{ kg/m}^3$  ( $2,348 \cdot 10^{-3} \text{ lb/in}^3$ ).

Para la chapa envolvente, el diámetro interno es el que incluye los espesores de casco sometido a presión interna y carga por viento además del espesor del aislamiento; el diámetro externo añade al interno el espesor de la envolvente de aluminio:

$$(A2.42) \begin{cases} D_{i,env}(\text{in}) = D_i(\text{in}) + 2t_{c,pi+w}(\text{in}) + 2t_{ais}(\text{in}) & (1) \\ D_e(\text{in}) = D_{i,env}(\text{in}) + 2t_{env}(\text{in}) & (2) \end{cases}$$

Siendo  $D_{i,env}$  el diámetro interno del cilindro hueco que forma la envolvente,  $D_i$  el diámetro interno del recipiente, dado en A2.XXVIII,  $t_{c,pi+w}$  es el espesor del casco, redondeado a su valor comercial tal como aparece en la Tabla A2.XLII, sometido a carga combinada de presión interna y viento;  $D_e$  es el diámetro externo de la chapa envolvente, (y, al constituir ésta el último recubrimiento del recipiente, coincide con el nuevo diámetro externo del mismo) y  $t_{ais}$  y  $t_{env}$  son los espesores de aislamiento y de la chapa envolvente procurados en el apartado A2.C1.3.4.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Aplicando (A2.42), sobre los datos consignados en el párrafo anterior, se obtiene el peso de la envolvente por aplicación sucesiva de (A2.37) y (A2.39), debidamente modificadas, tomando la altura recalculada de la Tabla A2.XXVIII. Sea la siguiente tabla:

Peso del separador					
$t_{ais}$ (in)	0,984	$t_{env}$ (in)	0,024	$D_{i,env}$ (in)	50,558
$D_e$ (in)	50,606	$H$ (in)	148,004	$\rho_{Al}$ (lb/in <sup>3</sup> )	0,098
		$m_{envolvente}$ (lb)	<b>55,354</b>		

Tabla. A2.XLV. Primera estimación del peso de la envolvente de aluminio

Para el aislamiento, el diámetro interno,  $D_{i,ais}$  es el que incluye los espesores de casco sometido a presión interna y carga por viento, es decir  $D_{e,c}$  tabulado en A2.XLII; el diámetro externo añade al interno el espesor del aislamiento, ergo coincide con  $D_{i,env}$  tabulado en A2.XLV:

$$(A2.43) \begin{cases} D_{i,ais}(\text{in}) = D_{e,c}(\text{in}) (1) \\ D_{e,ais}(\text{in}) = D_{i,env}(\text{in}) (2) \end{cases}$$

Aplicando (A2.43), sobre los datos consignados en el párrafo anterior, se obtiene el peso del aislamiento por aplicación sucesiva de (A2.37) y (A2.39), debidamente modificadas, tomando la altura recalculada de la Tabla A2.XXVIII. Sea la siguiente tabla:

Peso del separador					
$D_{i,ais}$ (in)	48,590	$D_{e,ais}$ (in)	50,558	$H$ (in)	148,004
$\rho_{lana\ de\ vidrio}$ (lb/in <sup>3</sup> )	$2,348 \cdot 10^{-3}$	$m_{aislamiento}$ (lb)	<b>53,276</b>	$m_{armado}$ (lb)	<b>4776,820</b>

Tabla. A2.XLVI. Primera estimación del peso del aislamiento y el armado

Donde se ha incluido además el peso de armado inicial, es decir, la contribución de cada elemento estructural al peso del separador en vacío. Viene dado por la siguiente ecuación:

$$m_{armado}(\text{lb}) = m_{casco}(\text{lb}) + 2 \cdot m_{cabezal}(\text{lb}) + 2 \cdot m_{plataforma}(\text{lb}) + m_{escalera}(\text{lb/ft}) \cdot H_{esc}(\text{ft}) + m_{envolvente}(\text{lb}) + m_{aislamiento}(\text{lb}) (A2.44)$$

Seguidamente debe calcularse el peso del líquido en operación, lo que proporcionará, sumado al peso de armado, el denominado peso en operación. Como criterio de diseño, en lugar de estimar el peso del líquido, se efectuará lo propio con el que correspondería a un volumen de agua igual que el del recipiente. Esta consideración permite asegurar la resistencia mecánica de cada recipiente no sólo en operación, (ya que el nivel de líquido corresponde a un volumen inferior a la capacidad del recipiente lleno de agua más densa), sino en condiciones de prueba hidráulica. El cálculo requiere estimar la capacidad tanto del casco como de los cabezales que, sumada, resulta la total del recipiente.

Sea el volumen de cada cabezal:

$$(A2.45) \begin{cases} V_{l,sect.bomb.} = 0,054 \cdot D_i^3 + 0,44 \cdot D_i^2 r_i & (1) \\ V_{l,sect.cil.} = \frac{7\pi}{8} D_i^2 \cdot t_{cab,pi} & (2) \\ V_{l,cabecal} = V_{l,sect.bomb.} + V_{l,sect.cil.} & (3) \end{cases}$$

Las ecuaciones (A2.45) difieren de las aplicadas para encontrar la masa de cada cabezal, (A2.40), en el punto de que las primeras persiguen encontrar la capacidad o volumen de líquido contenible en éstos, (de ahí la dependencia exclusiva con el diámetro interno); mientras que las segundas calculaban el volumen de material que los formaba, (de ahí la dependencia con los diámetros externo e interno). Con el propósito de distinguir la notación se ha distinguido a los últimos volúmenes con el subíndice "l", que indica volumen de líquido.

En similar forma se obtiene la capacidad del casco cilíndrico:

$$V_{l,casco} = \frac{\pi}{4} \cdot D_i^2 \cdot H \quad (A2.46)$$

Las apreciaciones efectuadas líneas arriba son *mutatis mutandis* aplicables a esta sazón. La solución de (A2.45) y (A2.46) toma datos de diámetro interno y altura recalculada de la Tabla A2.XXVIII, debidamente convertidos a unidades SI. El peso de agua se calcula según:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

$$m_{\text{agua,rec}} = \rho_{\text{agua}} V_{\text{agua,rec}} = \rho_{\text{agua}} (V_{l,\text{casco}} + 2 \cdot V_{l,\text{cabezal}}) \quad (A2.47)$$

Donde  $m_{\text{agua,rec}}$  y  $V_{\text{agua,rec}}$  corresponden a la masa y volumen de agua que llenan el recipiente, respectivamente. La densidad del agua se procuró en la Tabla A2.XXIX, en unidades SI. La masa de agua convertida en libras se tabula seguidamente junto al peso total del recipiente:

Peso del separador			
$V_{l,\text{cabezal}} \text{ (m}^3\text{)}$	0,211	$V_{l,\text{casco}} \text{ (m}^3\text{)}$	4,405
$m_{\text{agua,rec}} \text{ (lb)}$	10643,041	$m_{\text{rec,op}} \text{ (lb)}$	15419,860

Tabla. A2.XLVII. Primera estimación del peso total del recipiente en operación

El peso total del recipiente es la suma de la masa de agua de la tabla anterior y la masa de armado de la Tabla A2.XLVI. Este peso final contempla el más severo de los requerimientos de la torre, (en prueba hidráulica) y concluye el propósito del presente apartado.

### A2.C1.3.7. Diseño mecánico (VI). Determinación del espesor del faldón

El peso calculado en el apartado previo no incluye el del faldón, puesto que aún no ha sido diseñado, precisamente, porque la ecuación para diseñar su espesor depende del peso arriba del mismo. Una vez conocidas las dimensiones del faldón, podrá estimarse su peso que deberá ser añadido al término  $m_{\text{rec,op}}$ , para determinar la masa del equipo completo, a expensas del peso de las bridas, anillo de la base y extractor de neblina.

El espesor del faldón,  $t_{\text{faldón}}$ , viene dado por la siguiente expresión tomada del libro de *Megyesy*:

$$t_{\text{faldón}} \text{ (in)} = \frac{12 \cdot M_T \text{ (lb-ft)}}{R^2 \text{ (in)} \cdot \pi \cdot S \text{ (psi)} \cdot E} + \frac{W \text{ (lb)}}{D \text{ (in)} \cdot \pi \cdot S \text{ (psi)} \cdot E} \quad (A2.48)$$

Donde  $M_T$  es el momento, a la altura del faldón, causado por la carga de viento o sísmica, la que sea mayor, (puesto que aún no se han efectuado los cálculos por carga sísmica, se tomará el momento debido al viento en la junta del faldón de la Tabla A2.XLI). El radio  $R$  es el correspondiente al diámetro externo del faldón,  $D$ , que, dada su soldadura a tope con el cabezal inferior de columna; coincide con el diámetro externo del recipiente, incluyendo casco, aislamiento y envolvente de aluminio. Con lo anterior,  $D$  se toma de la Tabla A2.XLV, donde el diámetro externo del cilindro de envolvente se indicó que constituía el externo del recipiente. El radio  $R$  es la mitad de la cantidad anterior. El esfuerzo permitido por el material del faldón, (acero al carbono según SA-85 grado C), es el mismo que el empleado para el cálculo del espesor del casco y cabezales,  $S = 13800$  psi. En este caso, la eficacia de la junta de soldadura se ha tomado como  $E = 0,6$  para soldadura a tope, según *Megyesy*. Finalmente, el peso  $W$  corresponde al total del recipiente arriba del faldón,  $m_{rec,op}$ , tomado de la Tabla A2.XLVII.

$$t_{faldón} = 0,017 \text{ in} \approx 3/16 \text{ de pulgada (4,8 mm)}$$

El espesor del faldón se ha obtenido, y redondeado al espesor comercial más próximo, por aplicación de (A2.48) a los datos anteriormente citados.

Procede seguidamente encontrar el peso del faldón que debe sumarse al peso del recipiente. Considerando el faldón un cilindro hueco de espesor  $t_{faldón}$ , son de aplicación las siguientes ecuaciones:

$$(A2.49) \begin{cases} D_{i,faldón} = D_e(\text{in}) - 2t_{faldón}(\text{in}) & (1) \\ V_{faldón}(\text{in}^3) = \frac{\pi}{4} [D_e^2(\text{in}) - D_{i,faldón}^2(\text{in})] \cdot h_T(\text{in}) & (2) \\ m_{faldón}(\text{lb}) = \rho_{acero}(\text{lb/in}^3) V_{faldón}(\text{in}^3) & (3) \end{cases}$$

El diámetro externo del faldón, como queda indicado, coincide con el del recipiente, luego restándole el espesor calculado se obtiene el diámetro interno del faldón. El diámetro externo se toma de la

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Tabla A2.XLV y la densidad del acero de la Tabla A2.XLII. Se obtiene:

Peso del separador						
$t_{faldón} \text{ (in)}$	0,017	3/16"	$D_e \text{ (in)}$	50,606	$D_{i,faldón} \text{ (in)}$	50,232
$h_T \text{ (in)}$	78,740	$\rho_{acero} \text{ (lb/in}^3\text{)}$		0,28333	$m_{faldón} \text{ (lb)}$	662,575
		$m_{sep, op} \text{ (lb)}$		16082,435		

Tabla. A2.XLVIII. Primera estimación del peso total del separador en operación

Donde se ha hecho:

$$m_{sep,op} \text{ (lb)} = m_{rec,op} \text{ (lb)} + m_{faldón} \text{ (lb)} \text{ (A2.50)}$$

Se ha obtenido la masa del separador en operación, sumando a la del recipiente en operación, tomada de la Tabla A2.XLVII, el peso del faldón.

### A2.C1.3.8. Diseño mecánico (VII). Determinación del espesor requerido para soportar la carga sísmica

Las cargas en una torre bajo fuerzas sísmicas son semejantes a las soportadas por una viga en voladizo cuando la carga se incrementa uniformemente hacia el extremo libre. El método de diseño se basa en este modelo y plantea las siguientes ecuaciones para el cálculo del esfuerzo cortante y el momento causado a cualquier altura:

$$(A2.51) \left\{ \begin{array}{l} V \text{ (lb)} = ZIKCSW \text{ (lb)} \text{ (1)} \\ M \text{ (lb}\cdot\text{ft)} = \left[ F_t \text{ (lb)} H_{tot} \text{ (ft)} + (V \text{ (lb)} - F_t \text{ (lb)}) \left( \frac{2 \cdot H_{tot} \text{ (ft)}}{3} \right) \right] \text{ (2)} \\ M_T \text{ (lb}\cdot\text{ft)} = M \text{ (lb}\cdot\text{ft)} \cdot \left( \frac{h_T \text{ (ft)}}{H_{tot} \text{ (ft)}} \right) \text{ (3)} \end{array} \right.$$

Donde Z es el factor sísmico elegido para la zona donde se ubica la planta de procesos, I es un coeficiente de importancia de ocupación, (tal como está descrito hace referencia a la ocupación de un edificio, por lo que, a la sazón podría denominarse coeficiente de importancia del contenido del recipiente. Disquisiciones semánticas

aparte tomará el valor de  $I = 1$ ),  $K$  es el factor de fuerza horizontal, (se sugiere usar  $K = 2$  para recipientes),  $C$  es un coeficiente numérico cuya expresión se presenta más abajo,  $S$  es otro coeficiente numérico ligado a la resonancia de la estructura en el lugar, se define junto a  $C$ . El peso  $W$  es el peso total de la torre, ( $m_{\text{sep,op}}$  de la Tabla A2.XLVIII) y  $F_t$  es la fuerza sísmica horizontal aplicada sobre el extremo superior de la torre, se define junto a  $C$  y  $S$ .

Las definiciones requeridas son las siguientes:

$$(A2.52) \left\{ \begin{array}{l} T(s) = 0,0000265 \left( \frac{H_{\text{tot}}(\text{ft})}{D_e(\text{ft})} \right)^2 \sqrt{\frac{w(\text{lb/ft}) \cdot D_e(\text{ft})}{t_{\text{faldón}}(\text{in})}} \quad (1) \\ C = \frac{1}{15\sqrt{T}}, \quad C \text{ no debe exceder } 0,12 \quad (2) \\ (3) \begin{cases} S = 1,5 & T \leq 2,5 \text{ s} \\ S = 1,2 + 0,24 \cdot T(s) - 0,48 \cdot T^2(s) & T > 2,5 \text{ s} \end{cases} \\ F_t(\text{lb}) = 0,07 \cdot T(s) \cdot V(\text{lb}), \quad F_t(\text{lb}) \text{ no debe exceder } 0,25V(\text{lb}) \quad (4) \end{array} \right.$$

Donde  $T$  es el período fundamental de vibración. Debido al viento, las torres altas vibran. Pese a que no es de esperar un período de vibración excesivo, (los recipientes para la operación "SIMPLE" no son excesivamente altos), se comprobará más adelante si el período fundamental calculado en esta sección, es mayor que el que permite las normas *ASME*, puesto que los períodos de vibración largos pueden conducir a la rotura por fatiga. La única variable nueva es  $w$ , el peso por unidad de altura de la torre, (se obtiene dividiendo  $m_{\text{sep,op}}$  por la altura  $H_{\text{tot}}$  tomada la primera de la Tabla A2.XLVIII y la segunda de A2.XL). El diámetro externo,  $D_e$  se toma de la tabla de cálculo del espesor de la envolvente, por los motivos ya razonados, Tabla A2.XLV. El espesor del faldón se toma del apartado anterior, A2.C1.3.7 y la altura  $h_T$  de la Tabla A2.XL.

Resta definir el valor de  $Z$ , coeficiente elegido según zona sísmica, para estar en disposición de sustituir en las ecuaciones (A2.51) y (A2.52). Obsérvese el sismograma de la Figura A2.9.

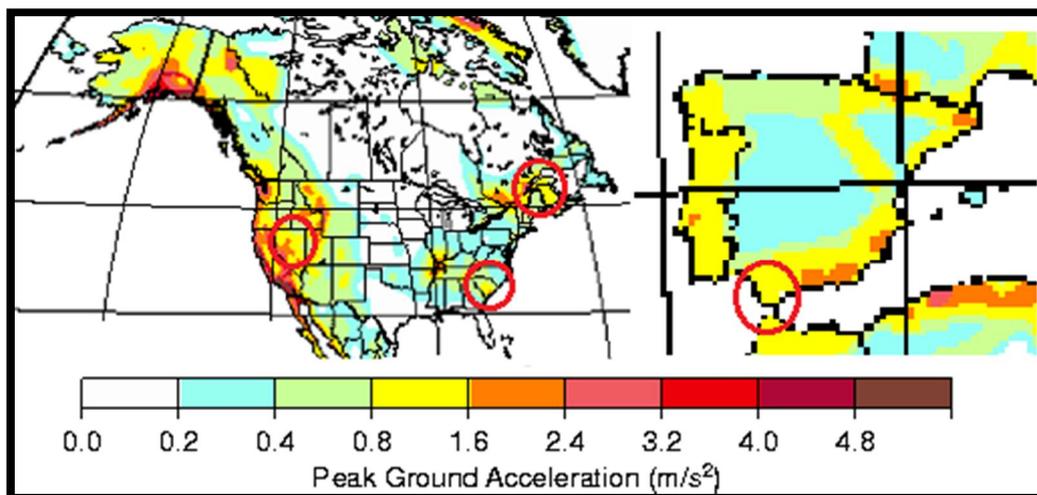


Figura. A2.9. Mapas sismográficos de América del Norte y España.  
(US Geological Service y Swiss Seismological Service)

Puesto que *Megyesy* sólo tabula valores de  $Z$  en función del riesgo sísmico en toda la geografía estadounidense, se ha hecho preciso establecer una comparativa de comportamiento sísmológico basada en un parámetro común, (la aceleración pico del suelo, *peak ground acceleration* como se muestra en la Figura A2.9).

Se observa que el Campo de Gibraltar, rodeado en la Figura A2.9 en el sur de España, se encuentra en una zona de aceleración sísmica comprendida entre los 0,8 y 1,6 m/s<sup>2</sup> (0,08g – 0,16g); la misma aceleración que, a título de ejemplo registran los Estados de Carolina del Sur, rodeada al sureste de Estados Unidos, Vermont y Massachusetts, rodeados al noreste y gran parte de Nevada, rodeada al oeste.

Confrontando la actividad sísmica de estas regiones y observando el mapa de la Figura A2.10, tomado de *Megyesy*, se decide equiparar la zona sísmica del Campo de Gibraltar a una “zona 2” de Estados Unidos. Se ha señalado mediante círculos la posición de los distintos Estados, establecidos previamente con un comportamiento sísmico similar al de la ubicación de la planta objeto del PFC.

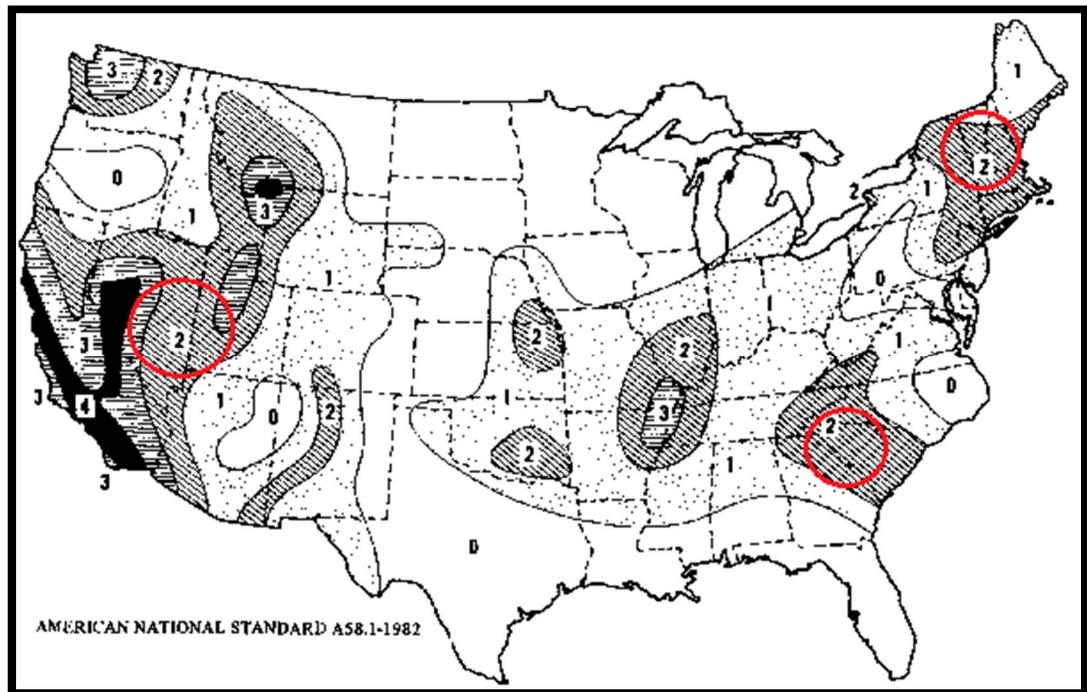


Figura. A2.10. Mapa de zonas sísmicas de Estados Unidos. (E. F. Megyesy, 1992)

Megyesy tabuló los valores de Z para las cuatro zonas sísmicas de Estados Unidos que se muestran en la tabla siguiente.

Factor sísmico, Z				
Zona	1	2	3	4
Z	0,1875	0,375	0,750	1,000

Tabla. A2.XLIX. Valores del factor sísmico según zonas

Por lo que se tomará, de la zona 2,  $Z = 0,375$  para la aplicación de (A2.51.1).

Por último, debe presentarse la siguiente ecuación para el cálculo del espesor,  $t_{c,s}$ , requerido de casco resistente a esfuerzo sísmico:

$$t_{c,s}(\text{in}) = \frac{12 \cdot M_T(\text{lb}\cdot\text{ft})}{R_m^2(\text{in}) \cdot \pi \cdot S(\text{psi}) \cdot E} \quad (\text{A2.53})$$

Expresión análoga a la aplicada para determinar el espesor requerido por la carga de viento, si bien, el momento  $M_T$  es el corres-

pondiente a al esfuerzo cortante sísmico en la línea de tangencia del recipiente con el faldón, esto es, a la altura sobre el suelo de la base del recipiente. Dicho momento se obtiene por aplicación de (A2.51.3). El radio medio es el mismo que el mostrado por la Tabla A2.XL, (puesto que la suma del espesor debido a la carga por viento no aumenta el espesor comercial del casco, como se puede corroborar observando las tablas A2.XXX y A2.XLII; y los espesores de aislamiento y chapa envolvente permanecen invariantes). De la misma tabla se obtienen  $S$ , el esfuerzo máximo permitido del material y  $E$  la eficacia de las juntas longitudinales del casco examinadas por zonas.

A lo largo del apartado se han presentado ecuaciones y datos para sustituirlas. Se procura seguidamente el procedimiento de cálculo:

- Fijados  $Z$ ,  $I$  y  $K$ , se aplica a los datos mencionados (A2.52.1) para obtener el período fundamental de vibración.
- Conocido  $T$ , se encuentran  $C$  y  $S$  empleando, respectivamente, las expresiones (A2.52.2) y (A2.52.3).
- Se obtiene el esfuerzo cortante sísmico  $V$ , por aplicación de (A2.51.1) sobre los datos dados y los consignados en los guiones anteriores. Sigue el uso de (A2.52.4) para la obtención de la fuerza sísmica horizontal,  $F_t$ .
- Se calculan los momentos total y sobre la línea de tangencia del recipiente y el faldón,  $M$  y  $M_T$  respectivamente, por aplicación sucesiva de (A2.51.2) y (A2.51.3) sobre datos conocidos.
- Se determina finalmente el espesor por aplicación de (A2.53).

Se obtiene:

Carga sísmica					
<b>Z</b>	0,375	<b>I</b>	1	<b>K</b>	2
<b>H<sub>tot</sub> (ft)</b>	18,895	<b>D<sub>e</sub> (ft)</b>	4,217	<b>t<sub>faldón</sub> (3/16 in)</b>	0,1875
<b>w (lb/ft)</b>	851,133	<b>T (s)</b>	0,074	<b>C (obtenido)</b>	0,25
<b>C (tomado)</b>	0,12	<b>S</b>	1,5	<b>W (lb)</b>	16082,435
<b>V (lb)</b>	2171,129	<b>0,25V (lb)</b>	542,782	<b>F<sub>t</sub> (lb)</b>	11,186
<b>M (lb-ft)</b>	27419,913	<b>M<sub>T</sub> (lb-ft)</b>	9521,968	<b>R<sub>m</sub> (in)</b>	24,674
<b>S (psi)</b>	13800	<b>E</b>	0,85	<b>t<sub>c,s</sub> (in)</b>	<b>0,015</b>

Tabla. A2.L. Primera estimación del espesor por carga sísmica

El valor de C tomado es acorde con lo obtenido por aplicación de (A2.52.2) y la restricción impuesta. De la misma forma, se comprueba que  $F_t$  no excede la cuarta parte del esfuerzo cortante. El espesor obtenido debe sumarse a los calculados por carga de viento y presión interna y reevaluar tanto el peso como, nuevamente, dichas cargas.

#### A2.C1.3.9. Diseño mecánico (VIII). Diseño del anillo de la base

Antes de reevaluar los espesores resistentes a la carga sísmica y eólica, se dimensionarán el resto de elementos estructurales del recipiente que, por su peso, contribuyen al peso total del mismo.

El primer elemento que se diseña es el anillo de la base. Este anillo permite el anclaje, por medio de pernos, del recipiente a la cimentación. Las normas de diseño mecánico preconizan el uso de un número de pernos múltiplo de cuatro y, en ningún caso inferior a tal cifra. Asimismo, puesto que la capacidad de anclaje de pernos próximos es limitada, se sugiere acomodarlos a distancias no menores de 18 pulgadas. El diámetro de los pernos está tabulado en función del área en la raíz, lo que se estimará aplicando el método que se propone seguidamente. Además debe aumentarse 1/8 de pulgada el diámetro calculado de los pernos como margen de corrosión. El método de cálculo seleccionado viene dado por las siguientes expresiones:

$$(A2.54) \left\{ \begin{array}{l} T \left( \frac{\text{lb}}{\text{in}} \right) = \frac{12 \cdot M (\text{lb} \cdot \text{ft})}{A_B (\text{in}^2)} - \frac{W (\text{lb})}{C_B (\text{in})} \quad (1) \\ B_A (\text{in}^2) = \frac{T \left( \frac{\text{lb}}{\text{in}} \right) \cdot C_B (\text{in})}{S_B (\text{psi}) \cdot N} \quad (2) \\ S_B (\text{psi}) = \frac{T \left( \frac{\text{lb}}{\text{in}} \right) \cdot C_B (\text{in})}{B_A (\text{in}^2) \cdot N} \quad (3) \end{array} \right.$$

Siendo  $T$  la tensión máxima sobre el círculo de pernos,  $M$  el momento en la base debido a viento o sismo, (el que sea mayor),  $A_B$  el área dentro del círculo de pernos,  $W$  el peso del recipiente durante la instalación,  $C_B$  el perímetro del círculo de pernos,  $B_A$  el área requerida por perno, o área en la raíz y  $N$ , el número de pernos.

El máximo esfuerzo,  $S_B$ , permisible por el material de los pernos, (acero al carbono según SA-325 cuya resistencia, según *Megyesy*, es de  $S_B = 15000$  psi), debe comprobarse no superior al nominal del material: se utiliza el valor máximo de 15000 psi en la ecuación (A2.54.2) y se comprueba mediante (A2.54.3).

Puesto que en primera instancia no son conocidas las dimensiones del anillo, debe suponerse que el diámetro coincide con el externo del recipiente,  $D_e$ , tomado de la Tabla A2.XLV. De esta forma,  $A_B$  y  $C_B$  se calculan según:

$$(A2.55) \left\{ \begin{array}{l} A_B (\text{in}^2) = \frac{\pi}{4} D_e^2 (\text{in}) \quad (1) \\ C_B (\text{in}) = \pi D_e (\text{in}) \quad (2) \end{array} \right.$$

El momento  $M$  se toma de la Tabla A2.L, por ser el mayor de los momentos en la base del separador, de los debidos a viento o sismo. El peso  $W$  es el del aparato durante su erección, esto es, la suma de los pesos de armado y de faldón tomados, respectivamente, de las tablas A2.XLVI y A2.XLVIII.

El número de pernos se decide considerando el espaciamiento mínimo, señalado anteriormente, de 18 pulgadas: Se divide el perímetro del círculo de pernos,  $C_B$ , por el número anterior y se redondea

al múltiplo de cuatro inferior, (más arriba se indicó asimismo la condición de que el número de pernos ha de ser múltiplo de cuatro).

Con lo anterior, se está en disposición de sustituir las ecuaciones de (A2.55), de donde se obtiene:

Diseño del anillo de la base							
D (in)	50,606	A <sub>B</sub> (in <sup>2</sup> )	2011,424	C <sub>B</sub> (in)	158,985	M (lb-ft)	27419,913
W (lb)	5439,394	T (lb/in)	129,372	N	8	S <sub>B</sub> (psi)	15000
B <sub>A</sub> (in <sup>2</sup> )	0,171	B <sub>A</sub> (in <sup>2</sup> )	0,202	S <sub>B</sub> (psi)	12727,856	l <sub>2</sub> (in)	1,125

Tabla. A2.LI. Primer cálculo de tamaño y número de pernos

El peso W se ha introducido directamente en la Tabla A2.LI, como suma de las cantidades establecidas *ut supra*. El número de pernos resulta aproximadamente 8,8 y se ha redondeado al múltiplo de cuatro, inferior, más próximo. El área B<sub>A</sub> requerida por el perno, o área en la raíz, se ha aproximado haciendo uso de la siguiente tabla tomada de Megyesy:

TABLA A			
Tamaño del perno	Área en la raíz del perno, pulg <sup>2</sup>	Dimensión, pulg	
		l <sub>2</sub>	l <sub>3</sub>
1/2	0.126	7/8	5/8
5/8	0.202	1	3/4
3/4	0.302	1-1/8	13/16
7/8	0.419	1-1/4	15/16
1	0.551	1-3/8	1-1/16
1 1/8	0.693	1-1/2	1-1/8
1 1/4	0.890	1-3/4	1-1/4
1 3/8	1.054	1-7/8	1-3/8
1 1/2	1.294	2	1-1/2
1 5/8	1.515	2-1/8	1-5/8
1 3/4	1.744	2-1/4	1-3/4
1 7/8	2.049	2-3/8	1-7/8
2	2.300	2-1/2	2
2 1/4	3.020	2-3/4	2-1/4
2 1/2	3.715	3-1/16	2-3/8
2 3/4	4.618	3-3/8	2-5/8
3	5.621	3-5/8	2-7/8

Figura. A2.11. Dimensiones del anillo de la base y pernos. (E. F. Megyesy, 1992)

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Para  $B_A$  calculada de  $0,165 \text{ in}^2$ , se redondea a  $0,202 \text{ in}^2$  de la Figura A2.11. Lo que proporciona un diámetro de perno de  $5/8$  de pulgada, que debe aumentarse en  $1/8$  como margen de corrosión, por lo que se utilizarán 8 pernos de  $3/4$  de pulgada. Se observa asimismo, de la Tabla A2.LI que el esfuerzo máximo permitido no supera al nominal para los pernos.

La dimensión  $l_2 = 1-1/8 \text{ in}$ , correspondiente al tamaño del perno incluida corrosión y tomada de la Figura A2.11, sumada dos veces al diámetro externo proporciona el diámetro real,  $D$ , del círculo de pernos.

Partiendo del nuevo diámetro, procede seguidamente rehacer los cálculos mostrados en la Tabla A2.LI y verificar la concordancia de la selección de pernos con las nuevas dimensiones. Se obtiene:

Diseño del anillo de la base (Segundo cálculo)							
<b>D (in)</b>	52,856	<b>A<sub>B</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	2194,258	<b>C<sub>B</sub> (in)</b>	166,054	<b>M (lb·ft)</b>	27419,913
<b>W (lb)</b>	5439,394	<b>T (lb/in)</b>	<b>117,198</b>	<b>N</b>	8	<b>S<sub>B</sub> (psi)</b>	15000
<b>B<sub>A</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	<b>0,162</b>	<b>B<sub>A</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	0,202	<b>S<sub>B</sub> (psi)</b>	<b>12042,774</b>	<b>l<sub>2</sub> (in)</b>	1,125

Tabla. A2.LII. Segundo cálculo de tamaño y número de pernos

Se observa que, tomando el diámetro real del número de pernos, se precisa el mismo número (9,2 redondeado a 8 pernos) y el mismo tamaño según  $B_A$  y la Figura A2.11:  $3/4$  de pulgada incluyendo margen de corrosión. Nuevamente el esfuerzo sobre los pernos es inferior al permitido, por lo que el cálculo es conforme.

Seguidamente se comprueba la resistencia mecánica del anillo de la base, que debe tanto distribuir la carga sobre un área suficiente como soportar los esfuerzos de flexión inducidos por viento o sismo, (el mayor de ellos). Lo que es tanto como calcular las dimensiones del anillo y corroborar que los esfuerzos sufridos son inferiores a los permitidos.

Se presenta seguidamente una figura acerca de las dimensiones del anillo de la base:

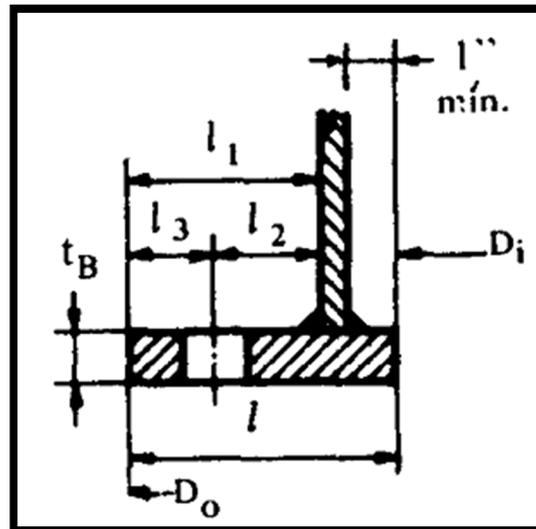


Figura. A2.12. Corte transversal del anillo de la base. (E. F. Megyesy, 1992)

Donde  $t_B$  es el espesor del anillo,  $D_o$  y  $D_i$ , sus diámetros externo e interno, respectivamente;  $l$  el ancho del anillo que incluye la suma de  $l_2$ , la distancia entre el límite externo del faldón y el círculo de pernos,  $l_3$  la distancia desde dicho círculo hasta el límite externo del anillo, el propio espesor del faldón,  $t_{faldón}$  tomado del apartado A2.C1.3.7 y una pulgada adicional que, como mínimo, debe quedar dentro del área comprendida por el faldón. La distancia  $l_1$  es la suma de  $l_2$  y  $l_3$ , esto es, el ancho del voladizo externo del anillo. Estas dimensiones se describen algebraicamente junto a las siguientes ecuaciones requeridas:

$$(A2.56) \left\{ \begin{array}{l} P_c \left( \frac{\text{lb}}{\text{in}} \right) = \frac{12 \cdot M (\text{lb} \cdot \text{ft})}{A_s (\text{in}^2)} + \frac{W (\text{lb})}{C_s (\text{in})} \quad (1) \\ \left\{ \begin{array}{l} l_1 (\text{in}) = l_2 (\text{in}) + l_3 (\text{in}) \quad (2) \\ l (\text{in}) = l_1 (\text{in}) + t_{faldón} (\text{in}) + 1 \quad (3) \\ t_B (\text{in}) = 0,32 \cdot l_1 (\text{in}) \quad (4) \end{array} \right. \\ S_1 (\text{psi}) = \frac{P_c \left( \frac{\text{lb}}{\text{in}} \right) \cdot C_s (\text{in})}{A_R (\text{in}^2)} \quad (5) \\ S_2 (\text{psi}) = \frac{3 \cdot S_1 (\text{psi}) \cdot l_1^2 (\text{in})}{t_B^2 (\text{in})} \quad (6) \end{array} \right.$$

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Donde  $P_c$  es la compresión máxima sobre el anillo de la base,  $M$  es el mismo momento usado en este apartado, causado por el cortante sísmico, (por ser aquél mayor que su homólogo causado por viento) y  $W$  es el peso usado en este apartado sumado al peso de agua para la prueba hidráulica, tomada ésta última de la Tabla A2.XLVII. Corresponde al peso total del separador,  $m_{sep,op}$ . De esta forma se asegura la resistencia frente al más severo de los requerimientos mecánicos del recipiente.

El área  $A_s$  y el perímetro  $C_s$  se refieren al círculo de diámetro igual al externo del faldón. Por tanto se toman iguales a  $A_B$  y  $C_B$  del primer cálculo del tamaño y número de pernos, (en este caso, la Tabla A2.LI); puesto que, en primera instancia se supuso el círculo del área de pernos igual al del citado diámetro externo.

Los esfuerzos  $S_1$  y  $S_2$  corresponden, respectivamente, al esfuerzo sobre el apoyo del anillo y el de flexión. La nueva variable es  $A_R$ , el área del anillo de la base descrita por las siguientes ecuaciones:

$$(A2.57) \begin{cases} D_o(\text{in}) = D_e(\text{in}) + 2 \cdot l_1(\text{in}) & (1) \\ D_i(\text{in}) = D_e(\text{in}) - 2 \cdot t_{faldón}(\text{in}) - 2 & (2) \\ A_R(\text{in}^2) = \frac{\pi}{4} (D_o^2(\text{in}) - D_i^2(\text{in})) & (3) \end{cases}$$

Tomando de la Figura A2.11  $l_3 = 13/16$  in, correspondiente a un tamaño de perno de  $3/4$  de pulgada, pueden aplicarse las ecuaciones (A2.57) y (A2.56):

Diseño del anillo de la base							
$A_s$ (in <sup>2</sup> )	2011,424	$C_s$ (in)	158,985	$W$ (lb)	16082,435	$M$ (lb-ft)	27419,913
$P_c$ (lb/in)	<b>264,742</b>	$t_{faldón}$ (3/16 in)	0,1875	$l_3$ (in)	0,8125	$I$ (in)	3,125
$l_1$ (in)	1,9375	$t_B$ (in)	<b>0,62</b>	$D_o$ (in)	54,482	$D_i$ (in)	48,232
$A_R$ (in <sup>2</sup> )	504,192	$S_1$ (psi)	<b>83,480</b>	$S_2$ (psi)	<b>2406,734</b>	$m_B$ (lb)	<b>89,283</b>

Tabla. A2.LIII. Dimensiones y comprobaciones del anillo de la base

El espesor del anillo de la base,  $t_B = 0,62$  se redondea a  $5/8$  de pulgada. Es tal valor el que se ha introducido en (A2.56.6) para obte-

ner el esfuerzo  $S_2$  de flexión y el que aplica en adelante, hasta un segundo cálculo.

El material de construcción del anillo de la base es el mismo que el empleado para el casco y los cabezales: acero al carbono según SA-285 grado C. Pese a que el esfuerzo máximo permitido por el material es de 13800 psi a la temperatura de operación, (véase apartados anteriores), *Megyesy* señala un valor de 18000 psi como esfuerzo máximo permisible para el anillo de la base. Así, los esfuerzos  $S_1$  y  $S_2$  cumplen con el requerimiento mecánico, por lo que la solución encontrada es conforme.

Se ha calculado finalmente el peso del anillo,  $m_B$ , según:

$$m_B(\text{lb}) = \rho_{\text{acero}}(\text{lb}/\text{in}^3) \cdot V_B(\text{in}^3) = \rho_{\text{acero}}(\text{lb}/\text{in}^3) \cdot A_R(\text{in}^2) \cdot t_B(\text{in}) \quad (\text{A2.58})$$

Donde  $V_B$  es el volumen de material calculado, según la geometría del anillo, multiplicando el área de la base por su espesor. Tanto  $A_R$  como  $t_B$ , convenientemente redondeado al espesor comercial, han sido calculados en la Tabla A2.LIII. La densidad teórica del acero se ha proporcionado en el apartado A2.C1.3.6.

Lo mostrado concluye el cálculo para el anillo de la base. Sigue el cálculo del peso del resto de elementos ligados al separador: tubuladuras y extractor de neblina.

#### A2.C1.3.10. Diseño mecánico (IX). Cálculo de las tubuladuras y peso del extractor de neblina

La estimación del peso de las bridas de admisión y descarga requiere el dimensionado de las tuberías de la alimentación, del líquido y del vapor. Lo que requiere la evaluación de las siguientes ecuaciones:

$$(A2.59) \left\{ \begin{array}{l} t(\text{in}) = 1,125 \cdot \frac{P(\text{psi}) \cdot R(\text{in})}{S(\text{psi}) \cdot E - 0,6 \cdot P(\text{psi})} + 0,1 \quad (1) \\ P(\text{psi}) = \frac{2 \cdot S(\text{psi}) \cdot E \cdot t(\text{in})}{D(\text{in}) + 1,2 \cdot t(\text{in})} \quad (2) \end{array} \right.$$

Donde  $t$  es el espesor mínimo requerido para la tubería y  $P$ , en la ecuación (A2.59.1) es la presión de diseño de la tubería y, en (A2.59.2), la presión admisible por la misma.

La expresión del espesor incluye sobreestimación del 12,5% como margen de tolerancia y margen de corrosión de 5 milésimas de pulgada por año proyectado. Para 20 años previstos, se suma a la expresión 0,1 pulgadas.

Como en anteriores expresiones,  $S$  es el esfuerzo permisible en para el material seleccionado. Las conducciones nuevas en servicios no corrosivos en la Refinería Gibraltar-San Roque, se construyen en acero al carbono según *ASTM A-106* grado B. Se prefiere frente al acero A-53, puesto que el primero incluye el tratamiento de *calmado*, esto es, eliminación del oxígeno de la colada de acero previa a su solidificación, lo que limita la formación de burbujas aumentando la vida útil y compensando la diferencia económica favorable al acero A-53.

Por lo anterior, se fabricarán las tuberías según especificación A-106 grado B, cuyo esfuerzo permisible es de  $S = 15000$  psi a la temperatura de operación, según indica *Megyesy*.

Las tuberías para servicio de responsabilidad, (todas aquéllas que transportan fluidos de proceso), se fabrican en tramos rectos de 6 m sin costura longitudinal, por lo que la eficacia global de junta,  $E$ , se toma igual a la unidad para todos los cálculos con tubería, donde no se indique lo contrario.

Las longitudes  $R$  y  $D$ , corresponden, respectivamente, al radio y al diámetro internos de la conducción, que, a su vez, están ligados al área transversal de la tubería. Sea:

$$(A2.60) \left\{ \begin{array}{l} Q_{Vol} = A_{i,tubo} \cdot v_f \Rightarrow A_{i,tubo}(\text{ft}^2) = \frac{Q_{Vol}(\text{ft}^3/\text{s})}{v_f(\text{ft}/\text{s})} \quad (1) \\ A_{i,tubo} = \pi \cdot R_{i,tubo}^2 \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} R_{i,tubo}(\text{in}) = \sqrt{\frac{A_{i,tubo}(\text{in}^2)}{\pi}} \quad (2) \\ D_{i,tubo} = 2 \cdot R_{i,tubo}(\text{in}) \quad (3) \end{array} \right. \end{array} \right.$$

Se puede determinar el área transversal de la tubería,  $A_{i,tubo}$ , conocido el caudal volumétrico de cada corriente, (se proporcionan en la Tabla A2.XXVI para líquido y vapor y debe calcularse para la alimentación), si se fija la velocidad de flujo de fluidos por la conducción,  $v_f$ . La estimación de la velocidad óptima de flujo se estima siguiendo las recomendaciones de *Simpson*, recogidas en el libro de *Towler*, donde se relaciona tal velocidad a la densidad del fluido.

Se precisan valores de la densidad de la alimentación, líquido y vapor en unidades SI: tomando las densidades molares dadas por las tablas A2.XVII y A2.XXIV, junto a los datos de peso molecular de la Tabla A2.III y las composiciones de la alimentación, Tabla A2.XI y del líquido y el vapor A2.XIII y A2.XIV; se aplican las siguientes ecuaciones:

$$(A2.61) \left\{ \begin{array}{l} PM_{corriente}(\text{g/mol}) = \sum_{i=1}^6 x_i \cdot PM_i(\text{g/mol}) \quad (1) \\ \rho_{corriente}(\text{kg/m}^3) = 1000 \cdot \rho_{corriente}(\text{mol/cm}^3) \cdot PM_{corriente}(\text{g/mol}) \quad (2) \end{array} \right.$$

La ecuación (A2.61.1) proporciona el peso molecular promedio de cada corriente, ponderando los pesos moleculares por componente,  $PM_i$  por las distintas composiciones de cada corriente, (genéricamente se ha notado  $x_i$ ). La ecuación (A2.61.2) procura la densidad en las unidades SI requeridas. La velocidad óptima se obtiene por interpolación lineal sobre los datos que se tabulan seguidamente:

Estimación de la velocidad óptima					
$PM_{alim}(\text{g/mol})$	55,313	$PM_{liq}(\text{g/mol})$	55,305	$PM_{vap}(\text{g/mol})$	55,318
$\rho_{alim}(\text{kg/m}^3)$	603,712	$\rho_{liq}(\text{kg/m}^3)$	604,552	$\rho_{vap}(\text{kg/m}^3)$	1,751

Tabla. A2.LIV. Velocidad óptima de flujo en tuberías. (Continúa en pág. siguiente)

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

$v_{alim}$ (m/s)	3,583	$v_{liq}$ (m/s)	3,580	$v_{vap}$ (m/s)	17,136
$v_{alim}$ (ft/s)	11,754	$v_{liq}$ (ft/s)	11,746	$v_{vap}$ (ft/s)	56,220
$\rho_{líquido}$ (kg/m <sup>3</sup> )	1600	800	160	16	0,16
$v_{opt}$ (m/s)	2,4	3	4,9	9,4	18

Tabla. A2.LIV. Velocidad óptima de flujo en tuberías. (Viene de pág. anterior)

$$L_0 \left( \frac{\text{ft}^3}{\text{s}} \right) = \frac{L_0 \left( \frac{\text{Mmol}}{\text{año}} \right)}{\rho_{L_0} \left( \frac{\text{mol}}{\text{cm}^3} \right)} \cdot \frac{10^6 \text{ mol}}{1 \text{ Mmol}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{10^6 \text{ cm}^3} \cdot \frac{1 \text{ año}}{31536000 \text{ s}} \cdot \left( \frac{1 \text{ ft}}{0,3048 \text{ m}} \right)^3 \quad (\text{A2.62})$$

El caudal volumétrico de la alimentación se obtiene por aplicación de una modificación de (A2.20), dada por (A2.62). El caudal molar de la alimentación se toma de A2.X. Aunque la densidad de la alimentación,  $\rho_{L_0}$ , se ha tabulado junto a la de líquido en A2.XVII, (por ser muy similares), se han efectuado los cálculos tomando su propio valor. Por ello, también se han generado en la Tabla A2.LIV velocidades para las distintas corrientes.

Las recomendaciones de *Simpson*, vienen tabuladas en A2.LIV en las dos últimas filas. Las velocidades óptimas se basan en la solución de compromiso, que brinda la experiencia industrial, al problema de minimizar el coste de bombeo y de adquisición e instalación de las tuberías, (lo que implica, respectivamente, dos acciones contradictorias: incrementar y reducir el diámetro de la conducción).

Conocidas las velocidades óptimas y los caudales volumétricos, puede encontrarse el radio interno para las conducciones de alimentación, líquido y vapor, por aplicación de (A2.60). Se requieren las siguientes tuberías:

- Conducción general de la alimentación: Su caudal volumétrico es el determinado por la ecuación (A2.62) y la presión es de 5 atm.
- Ramales de alimentación a los separadores: Cada uno transporta un cuarto del caudal de la alimentación, (esta corriente debe dividirse en cuatro como se mostró en el primer

apartado de esta sección). La presión previo ajuste es de 5 atm.

- Ramales de alimentación a los separadores tras el ajuste de presión: La presión de la alimentación a cada separador es la de operación: 2,5 atm.
- Conducciones de líquido: Cuatro conducciones por cada recipiente para descarga del líquido a presión de operación.
- Conducciones de vapor: Cuatro conducciones por cada recipiente para descarga del vapor a presión de operación.

A continuación se presenta el cálculo de la presión de diseño de cada tubería, y se tabulan los resultados que permitirán establecer las especificaciones del sistema de tuberías asociado a "SIMPLE".

Para el cálculo de la presión de diseño es de aplicación la ecuación (A2.23.1), desconsiderando la contribución de la presión del agua de prueba. Con las presiones indicadas en los guiones anteriores, la presión de diseño se obtiene, por mor de dicha ecuación, sumando el 10% de la presión de transporte en cada conducción o la presión de 30 psi, la que sea mayor. Con esto, pueden tabularse los resultados obtenidos por aplicación de las ecuaciones presentadas, hasta este punto, en el apartado actual. Se obtiene:

Cálculo de las conducciones					
<b>P (psi)</b>	73,480	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	103,480	<b>S (psi)</b>	15000
<b>L<sub>0</sub> (Mmol/año)</b>	21150,663	<b>ρ (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	0,011	<b>L<sub>0</sub> (ft<sup>3</sup>/s)</b>	2,170
<b>A<sub>i,tubo</sub> (ft<sup>2</sup>)</b>	0,185	<b>R<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	2,909	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,123	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	616,948	<b>D<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	<b>5,818</b>

Tabla. A2.LV. Estimación del tamaño de la conducción general de la alimentación

La Tabla A2.LV, proporciona el cálculo requerido para la conducción general: la que transporta la misma desde la planta precedente de pirólisis con vapor, que no es objeto del presente PFC, hasta la planta para purificación del 1,3-butadieno, objeto del mismo. La presión de transporte viene dada por P, (5 atm directamente convertida a psi). El 10% de P es claramente inferior a 30 psi, por lo que la

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

presión de diseño suma la anterior cantidad a la de transporte. El caudal de la alimentación,  $L_0$ , es el completo, (previa división de la corriente en los cuatro ramales correspondientes a la alimentación individual de cada separador). El área del tubo se ha calculado por aplicación de (A2.60.1) sobre la velocidad óptima de flujo de la alimentación,  $v_{alim}$ , dada por la Tabla A2.LIV. La aplicación (A2.60.2) y (A2.60.3) procura el radio interno del tubo y su correspondiente diámetro. El espesor mínimo requerido viene dado por (A2.59.1) y la presión máxima soportable, (que supera con creces la de diseño, por lo que el cálculo es conforme), es dada por (A2.59.2).

Procediendo igualmente para la alimentación dividida en cuatro, se tienen los siguientes requerimientos para cada ramal:

Cálculo de las conducciones					
<b>P (psi)</b>	73,480	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	103,480	<b>S (psi)</b>	15000
<b>L<sub>0</sub>/4 (Mmol/año)</b>	5287,666	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	0,011	<b>L<sub>0</sub>/4 (ft<sup>3</sup>/s)</b>	0,543
<b>A (ft<sup>2</sup>)</b>	0,046	<b>R<sub>i</sub> (in)</b>	1,454	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,111	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	1097,798	<b>D<sub>i</sub> (in)</b>	<b>2,909</b>

Tabla. A2.LVI. Estimación del tamaño de un ramal previa descompresión

Previo reducción de la presión, la línea debe resistir 5 atm, (pe-se a la pérdida de carga que supone dividir la corriente). La única variación, por tanto con la tabla anterior es el caudal, que se ha dividido por cuatro. Nuevamente la presión máxima admisible supera la de diseño holgadamente.

Tras la descompresión, la línea debe soportar la presión de operación de 2,5 atm. Cambiando sólo la presión respecto del cálculo previo se tiene:

Cálculo de las conducciones					
<b>P (psi)</b>	36,740	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	66,740	<b>S (psi)</b>	15000
<b>L<sub>0</sub>/4 (Mmol/año)</b>	5287,666	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	0,011	<b>L<sub>0</sub>/4 (ft<sup>3</sup>/s)</b>	0,543
<b>A (ft<sup>2</sup>)</b>	0,046	<b>R<sub>i</sub> (in)</b>	1,454	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,107	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	1059,697	<b>D<sub>i</sub> (in)</b>	<b>2,909</b>

Tabla. A2.LVII. Estimación del tamaño de un ramal tras descompresión

El 10% de la presión continúa siendo inferior a 30 psi, por lo que la presión de diseño suma a 2,5 atm, (debidamente convertida) dicha mayor contribución. La presión máxima admisible ratifica la conformidad del cálculo. Antes de continuar con el dimensionado del resto de conducciones, debe puntualizarse que la velocidad óptima de flujo es la que corresponde a  $v_{alim}$  en los tres cálculos previos, ya que la densidad es independiente de la presión, ergo la interpolación lineal en las recomendaciones de *Simpson* permanece inalterada.

Se sigue el cálculo para los ramales de salida de líquido de los separadores:

Cálculo de las conducciones					
<b>P (psi)</b>	36,740	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	66,740	<b>L (ft<sup>3</sup>/s)</b>	0,203
<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	0,011	<b>A (ft<sup>2</sup>)</b>	0,017	<b>R<sub>i</sub> (in)</b>	0,890
<b>t (in)</b>	0,104	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	1645,605	<b>D<sub>i</sub> (in)</b>	<b>1,779</b>

Tabla. A2.LVIII. Estimación del tamaño de los ramales de salida de líquido

Se ha tomado directamente el caudal de líquido en cada separador, como en el siguiente cálculo el caudal de vapor, de la Tabla A2.XXVI. La velocidad óptima de flujo se ha tomado de la Tabla A2.LIV para el líquido,  $v_{líq}$ . La presión máxima admisible confirma la validez de los cálculos. Finalmente, para las conducciones de descarga del vapor:

Cálculo de las conducciones					
<b>P (psi)</b>	36,740	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	66,740	<b>V (ft<sup>3</sup>/s)</b>	117,017
<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	$3,166 \cdot 10^{-5}$	<b>A (ft<sup>2</sup>)</b>	2,053	<b>R<sub>i</sub> (in)</b>	9,700
<b>t (in)</b>	0,149	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	227,819	<b>D<sub>i</sub> (in)</b>	<b>19,401</b>

Tabla. A2.LIX. Estimación del tamaño de los ramales de salida de vapor

La velocidad óptima de flujo se ha tomado de la Tabla A2.LIV para el vapor,  $v_{vap}$ , redondeada a la unidad superior, (57 ft/s), con la intención de encontrar una especificación comercial próxima. La presión máxima admisible confirma la validez de los cálculos. Donde se ha concluido el dimensionado de la red de tuberías para "SIMPLE".

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Pese a no ser el objetivo del presente capítulo, debe considerarse la necesidad de conocer el diámetro nominal de las conducciones, a fin de conocer el de las bridas y accesorios asociados. Para ello, debe seleccionarse, del catálogo de dimensiones de tuberías según normas *ASME*, el tamaño requerido para la red de distribución diseñada:

Cálculo de las conducciones					
Conducción	Identificación	Especificación <i>ASME</i>	$D_e$ (in)	$D_i$ (in)	$t$ (in)
General alimentación	1	6", Sch 40, SMLS-BW, SA-106 B	6,625	6,065	0,280
Ramal alimentación pre-descompresión	2-5	3", Sch 40, SMLS-BW, SA-106 B	3,500	3,068	0,216
Ramal alimentación pos-descompresión	6-9	3", Sch 40, SMLS-BW, SA-106 B	3,500	3,068	0,216
Ramal líquido	10-13	2", Sch 120, SMLS-BW, SA-106 B	2,375	1,875	0,250
Ramal vapor	14-17	20", Sch 10, SMLS-BW, SA-106 B	20,000	19,500	0,250

Tabla. A2.LX. Especificaciones comerciales para la red de tuberías de "SIMPLE"

A efectos de practicidad, se han identificado por números las distintas conducciones. Las especificaciones se han tomado de acuerdo con los diámetros internos dados por las tablas A2.LV a A2.LIX, de modo que ni el espesor real ni el diámetro interno sean inferiores a los calculados, garantizándose el flujo a una velocidad próxima a la óptima.

El formato de la especificación incluye cuatro informaciones separadas por comas:

- Diámetro nominal de la tubería: El primer número seguido de comillas indica el diámetro externo de toda la serie en pulgadas.
- Número de *Schedule*: El número precedido de la notación "Sch", distingue un espesor dentro de la serie de tubos de un diámetro nominal. En función del espesor se conoce el diámetro interno, restando el primero dos veces al espesor externo.

- Especificación de fabricación de la tubería: SMLS y BW proceden del inglés “*seamless*” y “*butt-weld*” respectivamente. Indican que cada tramo de tubería debe fabricarse sin costura y con los bordes rebajados para soldadura a tope.
- Especificación del material: Como ya se indicó, acero al carbono según SA-106 grado B.

Con las especificaciones conocidas, resta sumar el peso de las bridas de alimentación y descarga de líquido y vapor de cada separador:

Cada separador contará con una brida de alimentación de diámetro nominal de 3 in, (el mismo que el de los ramales de alimentación), una brida de descarga de líquido de 2 in y otra de descarga de vapor de 20 in. Todas las bridas se construirán en acero forjado según especificación SA-105.

Las bridas se clasifican por su clase de presión o, en inglés, “*rating*”, expresadas en psi. La clase inferior de bridas, para servicios a baja presión como los requeridos para el presente diseño es de 150 psi ó 150#, como se nota técnicamente.

Para la clase de presión seleccionada, *Megyesy* proporciona una tabla de pesos de bridas, según diámetro nominal de las conducciones embridadas y tipo de brida. De dicha tabla se toman los pesos mostrados en la Tabla A2.LXI, para bridas de la clase 150# de tipo cuello soldable, según los distintos diámetros nominales de tubo asociado. La mencionada tabla de pesos, tomada de *Megyesy* se presenta al final del capítulo.

Las bridas de cuello soldable son las más extensamente utilizadas en la industria petroquímica, para líneas de proceso. Esta aplicación se denomina de responsabilidad. Por ello, se seleccionan, para las tubuladuras de entrada y salida de corrientes, este tipo de bridas.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Las bridas se sueldan a un tubo de longitud determinada por normas, (según las dimensiones de las mismas) y, por forzar la pérdida de material al insertarse en el casco o cabezales del recipiente, pueden requerir refuerzo. No es el caso de las bridas de alimentación y descarga de líquido: aquéllas conducciones de 3 pulgadas, o menor espesor, introducidas en casco o cabezal de espesor de 3/8 de pulgada, o menos, no requieren refuerzo según normas *ASME*. Por ello se emplearán bridas de cuello soldable introducidas en el casco, (brida de alimentación) y cabezal de fondo, (brida de descarga de líquido) con la mínima extensión para soldar y sobresaliendo, del casco, 6 pulgadas según normas. Esto obliga a soldar un tramo de 3-1/2 y 3-1/4 de pulgada de tubo, ya que la longitud, según *Megyesy*, de las bridas de 2 y 3 pulgadas es de 2-1/2 y 2-3/4 de pulgada respectivamente. El peso de los tubos debe añadirse al nominal de la brida en la Tabla A2.LXI, multiplicando las longitudes correspondientes por el peso por pie de tubería, también proporcionado por *Megyesy*. De la misma forma, la brida de 20 pulgadas deberá sobresalir al menos 10 pulgadas según normas. Las dimensiones de las bridas, del tramo de tubo y su peso por unidad de longitud, se proporcionan en sendas figuras al final del capítulo.

Con lo antedicho y las dimensiones tomadas de las últimas figuras del capítulo, se recopila y calculan los siguientes pesos de las tubuladuras:

<b>Peso de las tubuladuras</b>					
<b><math>W_{\text{brida } 150\#, 3"} \text{ (lb)}</math></b>	11,5	<b><math>W_{\text{brida } 150\#, 2"} \text{ (lb)}</math></b>	6	<b><math>W_{\text{brida } 150\#, 20"} \text{ (lb)}</math></b>	170
<b>Tubo 3", Sch 40 (ft)</b>	0,271	<b>Tubo 2", Sch 120 (ft)</b>	0,292	<b>Tubo 20", Sch 10 (ft)</b>	0,359
<b><math>W_{\text{tubo } 3", \text{ Sch } 40} \text{ (lb/ft)}</math></b>	7,57	<b><math>W_{\text{tubo } 2", \text{ Sch } 120} \text{ (lb/ft)}</math></b>	5,673	<b><math>W_{\text{tubo } 20", \text{ Sch } 10} \text{ (lb/ft)}</math></b>	53
<b><math>W_{\text{tub } 3"} \text{ (lb)}</math></b>	13,550	<b><math>W_{\text{tub } 2"} \text{ (lb)}</math></b>	7,655	<b><math>W_{\text{tub } 20"} \text{ (lb)}</math></b>	189,047
		<b><math>m_{\text{bridas}} \text{ (lb)}</math></b>	<b>210,252</b>		

Tabla. A2.LXI. Peso de las tubuladuras

Donde los pesos  $W_{\text{brida } 150\#, \text{ DN}}$  son los pesos de brida de la categoría de 150 psi, correspondientes a los distintos diámetros nominales de las tuberías calculadas.

La segunda fila de la Tabla A2.LXI incluye las longitudes de los tramos de tubería soldados a las bridas, debidamente convertidas. A la sazón se soldará una tubería de longitud 3-1/2 pulgadas para la brida de 2 pulgadas, 3-1/4 para la de 3 pulgadas y 4-5/16 pulgadas para la brida de 20 pulgadas, cuya longitud de cuello es de 5-11/16 pulgadas, de modo que el saliente sume la longitud preconizada por las normas de 10 pulgadas.

La tercera fila de la Tabla A2.LXI recoge el peso por pie de las distintas tuberías según su número de *Schedule* y diámetro nominal. Este peso se multiplica por la longitud de la tubería, de la fila previa, y se suma al peso de las bridas obteniéndose los pesos  $W_{\text{tub DN}}$ , el peso de las tubuladuras de distintos diámetros nominales. Finalmente, el peso total,  $m_{\text{bridas}}$ , es la suma de los pesos individuales de las tubuladuras.

El refuerzo para la brida de descarga de vapor es un anillo que debe reponer la cantidad de metal eliminado por la abertura del cabezal al perforarlo. El anillo de refuerzo se construye del mismo material que el casco y cabezales, (acero al carbono según especificación SA-285 grado C).

La Figura A2.13, muestra el dibujo esquemático y dimensiones asociadas al anillo de refuerzo.

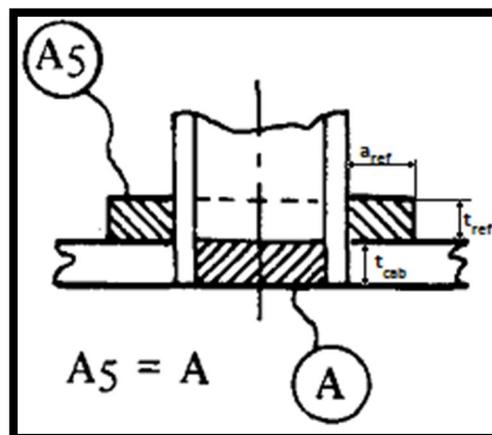


Figura. A2.13. Refuerzo en las perforaciones. (E. F. Megyesy, 1992)

El área transversal del anillo,  $A_{ref}$ , viene dada por:

$$A_{ref}(\text{in}^2) = d(\text{in}) \cdot t_r(\text{in}) \quad (\text{A2.63})$$

Siendo  $d$  el diámetro interno de la conducción, (19,500 in según la Tabla A2.LX) y  $t_r$ , genéricamente, el espesor del casco o cabezal. En este caso, dado que la descarga de vapor se halla inserta en el cabezal superior, se toma el espesor de cabezales: 3/8 de pulgada. Pese a que el apartado A2.C1.3.3, se indicó un espesor de cabezales sometidos a presión interna de 5/16, cuando se recalcule el espesor del casco, sumando los espesores requeridos por viento y sismo, habrá que aumentar de 1/4 de pulgada a 5/16, obligando a incrementar el espesor de los cabezales a 3/8. Lo que se ha considerado directamente a fin de cerrar el cálculo de las tubuladuras.

Según la Figura A2.13, el área transversal del anillo, determinada por (A2.63), corresponde al área rayada. Por lo que el ancho del refuerzo, ( $a_{ref}$ ) se calcula según:

$$A_{ref} = 2a_{ref}t_{ref} \Rightarrow a_{ref}(\text{in}) = \frac{A_{ref}(\text{in}^2)}{2 \cdot t_{ref}(\text{in})} \quad (\text{A2.64})$$

El espesor del refuerzo se tomará igual al del cabezal perforado, es decir,  $t_{ref} = 3/8$  de pulgada. Por consiguiente, el diámetro externo del anillo,  $d_o$ , sumará al externo de la brida dos veces el ancho del refuerzo. El diámetro interno del anillo,  $d_i$ , coincide con el externo del tubo soldado a la brida, que, según la Tabla A2.LX, adquiere el valor  $d_i = 20$  in.

El peso del anillo de refuerzo,  $m_{ref}$ , se calcula según:

$$(\text{A2.65}) \begin{cases} m_{ref}(\text{lb}) = \rho_{acero}(\text{lb/in}^3) \cdot V_{ref}(\text{in}^3) = \rho_{acero}(\text{lb/in}^3) \cdot \frac{\pi}{4} (d_o^2(\text{in}) - d_i^2(\text{in})) \cdot t_{ref}(\text{in}) & (1) \\ d_o(\text{in}) = d_i(\text{in}) + 2a_{ref}(\text{in}) & (2) \end{cases}$$

La densidad del acero se toma del apartado A2.C1.3.6. Aplicando las ecuaciones (A2.63) a (A2.65), se obtiene:

Cálculo del anillo de refuerzo					
<b>d (in)</b>	19,5	<b>t<sub>r</sub> (in)</b>	0,375	<b>A<sub>ref</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	7,3125
<b>t<sub>ref</sub> (in)</b>	0,375	<b>a<sub>ref</sub> (in)</b>	9,75	<b>d<sub>i</sub> (in)</b>	20
	<b>d<sub>o</sub> (in)</b>	39,5	<b>m<sub>ref</sub> (lb)</b>	<b>96,820</b>	

Tabla. A2.LXII. Dimensiones y peso del anillo de refuerzo

Concluye este apartado estimándose el peso del extractor de neblina,  $m_{en}$ . La descripción del dispositivo se ha proporcionado en apartados anteriores, por lo que se omite su reiteración. *Megyesy* señala un peso relativo al área,  $w = 7,4 \text{ lb/ft}^2$  incluyendo anillo de soporte, por lo que multiplicando tal cantidad por el área de flujo del recipiente, tabulada en A2.XXVI, se obtiene:

Peso del extractor de neblina			
<b>w (lb/ft<sup>2</sup>)</b>	7,4	<b>A (ft<sup>2</sup>)</b>	12,614
	<b>m<sub>en</sub> (lb)</b>	<b>93,340</b>	

Tabla. A2.LXIII. Peso del extractor de neblina

#### A2.C1.3.11. Diseño mecánico (X). Iteración de cálculos

Cuando se calculó el peso de los elementos estructurales del separador, se consideró el espesor del casco como la suma de las contribuciones demandadas por el esfuerzo a presión interna y carga de viento. Posteriormente se calculó la contribución al espesor requerida para soportar la carga sísmica por lo que debe sumarse ésta última al espesor del casco y recalcular el peso de cuantos elementos sea requerido.

Para el casco, las ecuaciones (A2.37) y (A2.39) siguen siendo de utilidad, incluyendo los datos involucrados a excepción de las magnitudes ligadas a la ecuación (A2.38), que se reescribe de la siguiente forma:

$$(A2.66) \begin{cases} t_{c,pi+w+s}(\text{in}) = t_{c,pi}(\text{in}) + t_{c,w}(\text{in}) + t_{c,s}(\text{in})(1) \\ D_{e,c}(\text{in}) = D_i(\text{in}) + 2t_{c,pi+w+s}(\text{in})(2) \end{cases}$$

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Es decir, el espesor total del casco,  $t_{c,pi+w+s}$ , es la suma de los espesores por presión interna,  $t_{c,pi}$ , carga de viento,  $t_{c,w}$  y carga sísmica,  $t_{c,s}$ . Los espesores se toman, respectivamente de las tablas, A2.XXX, A2.XLI y A2.L. Con esta modificación, se recalcula el peso del casco y se obtiene:

Peso del separador						
$t_{c,pi+w+s}$ (in)	0,257	5/16"	$D_i$ (in)	48,090	$D_{e,c}$ (in)	48,715
H (in)	148,004	$\rho_{acero}$ (lb/in <sup>3</sup> )		0,28333	$m_{casco}$ (lb)	1992,660

Tabla. A2.LXIV. Segunda estimación del peso del casco

Donde, por aumentar el espesor comercial, (de ¼ a 5/16 de pulgada), se tiene un aumento del diámetro externo del casco,  $D_{e,c}$  que obliga a recalcular el peso de los demás componentes.

Así, para el cálculo del peso de cada cabezal, son de aplicación las ecuaciones (A2.40) y (A2.41), con la salvedad indicada de forma indirecta en el apartado previo: dado que el espesor del casco ha aumentado 1/16 de pulgada, equiparándose al espesor de cabezal calculado en el apartado A2.C1.3.3, debe aumentarse éste último para, conforme normas, disponer de cabezales con espesor superior al casco. Así pues,  $t_{cab,pi}$  pasa de 5/16 a 3/8 de pulgada, la fracción comercial inmediatamente superior. El nuevo peso obtenido en consecuencia se tabula seguidamente:

Peso del separador						
$t_{cab,pi}$ (in)	0,281	3/8"	$D_i$ (in)	48,090	$D_{e,cab}$ (in)	48,840
L/r	10	$r_i$ (in)	4,809	$r_e$ (in)	4,884	
		$m_{cabezal}$ (lb)		167,979		

Tabla. A2.LXV. Segunda estimación del peso de un cabezal

El peso de cada plataforma y escalera se tomaron como dato, por lo que se está a lo tabulado en A2.XLIV. Los cálculos del peso de la chapa envolvente difieren sólo, del proceso descrito en el apartado A2.C1.3.6, en la reescritura de las expresiones (A2.42):

$$(A2.67) \begin{cases} D_{i,env}(\text{in}) = D_i(\text{in}) + 2 \cdot t_{c,pi+w+s}(\text{in}) + 2t_{ais}(\text{in}) & (1) \\ D_e(\text{in}) = D_{i,env}(\text{in}) + 2t_{env}(\text{in}) & (2) \end{cases}$$

Donde el único término distinto es el espesor combinado del casco,  $t_{c,pi+w+s}$ , tomado de la Tabla A2.LXIV. Así, se tiene para la chapa envolvente:

Peso del separador					
$t_{ais}(\text{in})$	0,984	$t_{env}(\text{in})$	0,024	$D_{i,env}(\text{in})$	50,683
$D_e(\text{in})$	50,732	$H(\text{in})$	148,004	$\rho_{Al}(\text{lb/in}^3)$	0,098
		$m_{envolvente}(\text{lb})$	<b>55,490</b>		

Tabla. A2.LXVI. Segunda estimación del peso de la envolvente de aluminio

Donde  $D_e$  es el nuevo diámetro externo del recipiente, considerando la sollicitación combinada de resistencia del casco a presión interna, viento y sismo.

Por su parte, el peso del aislamiento se calcula siguiendo el procedimiento mostrado en el apartado previo de estimación del peso tomando como  $D_{e,c}$  el recalculado en la Tabla A2.LXIV. El peso del aislamiento, considerando las nuevas dimensiones se tabula seguidamente:

Peso del separador					
$D_{i,ais}(\text{in})$	48,715	$D_{e,ais}(\text{in})$	50,683	$H(\text{in})$	148,004
$\rho_{\text{Plana de vidrio}}(\text{lb/in}^3)$	$2,348 \cdot 10^{-3}$	$m_{\text{aislamiento}}(\text{lb})$	<b>53,410</b>	$m_{\text{armado}}(\text{lb})$	<b>5240,242</b>

Tabla. A2.LXVII. Segunda estimación del peso del aislamiento y el armado

Donde se ha incluido el nuevo peso de armado, calculado por aplicación de (A2.44) a los nuevos datos de peso recalculados, (el resto de datos permanece inalterado respecto al primer cálculo).

En lo tocante al peso de líquido en operación, (se consideró el recipiente completamente lleno de agua, en condiciones de prueba hidráulica), se espera una leve modificación respecto a la primera estimación, por la variación del sector cilíndrico de los nuevos cabeza-

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

les, (recuérdese de la Figura A2.8 la relación existente entre la altura de la faldilla y el espesor que, a la sazón, ha variado). El volumen contenido por el casco es el mismo que en el primer cálculo, puesto que no ha variado el diámetro interno del recipiente. Así pues, aplicando (A2.45) al nuevo espesor de cabezales, recalculado en la Tabla A2.LXV; la ecuación (A2.46) y (A2.47), se obtiene:

Peso del separador			
$V_{l,cabezal} (m^3)$	0,218	$V_{l,casco} (m^3)$	4,405
$m_{agua,rec} (lb)$	10671,749	$m_{rec,op} (lb)$	15911,991

Tabla. A2.LXVIII. Segunda estimación del peso total del recipiente en operación

Donde se ha incluido la masa total del recipiente en operación, sumando el peso de armado, de la Tabla A2.LXVII, al nuevo peso del agua.

Procede recalcularse el espesor del faldón de acuerdo con la ecuación (A2.48) y los nuevos datos de diámetro externo, (Tabla A2.LXVI) y peso arriba del faldón,  $m_{rec,op}$ , (Tabla A2.LXVIII). El momento a la altura del faldón  $M_T$  debe tomarse de la Tabla A2.L por ser más severo que el homólogo debido a carga por viento, (véase Tabla A2.XLI). Se obtiene:

$$t_{faldón} = 0,019 \text{ in} \approx 3/16 \text{ de pulgada (4,8 mm)}$$

De donde, aplicando (A2.49) al nuevo diámetro externo en A2.LXVI, se obtiene el siguiente peso recalculado del faldón:

Peso del separador						
$t_{faldón} (in)$	0,019	3/16"	$D_e (in)$	50,732	$D_{i,faldón} (in)$	50,356
$h_T (in)$	78,740	$\rho_{acero} (lb/in^3)$		0,28333	$m_{faldón} (lb)$	664,217
		$m_{sep, op} (lb)$		17065,904		

Tabla. A2.LXIX. Primera estimación del peso total del separador en operación

Donde se ha hecho:

$$m_{sep,op}(\text{lb}) = m_{rec,op}(\text{lb}) + m_{faldón}(\text{lb}) + m_B(\text{lb}) + m_{bridas}(\text{lb}) + m_{ref}(\text{lb}) + m_{en}(\text{lb}) \quad (A2.68)$$

Se ha obtenido la masa del separador en operación, sumando a la del recipiente en operación, tomada de la Tabla A2.LXVIII; el peso del faldón recién calculado en A2.LXIX, el del anillo de la base en A2.LIII, el de las bridas, tomado de A2.LXI; el del anillo de refuerzo, tomado de A2.LXII y el del extractor de neblina tomado de A2.LXIII.

El peso del anillo de la base se ha recalculado rehaciendo los cálculos del apartado A2.C1.3.9, modificando, exclusivamente, los datos ligados al nuevo diámetro externo de la Tabla A2.LXVI, ecuaciones (A2.55), y el peso  $W$  de la ecuación (A2.54.1), suma del peso de armado, (Tabla A2.LXVII) y faldón, (Tabla A2.LXIX). Se obtiene, para el tamaño y número de pernos:

Diseño del anillo de la base							
<b>D (in)</b>	50,732	<b>A<sub>B</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	2021,373	<b>C<sub>B</sub> (in)</b>	159,378	<b>M (lb-ft)</b>	27419,913
<b>W (lb)</b>	5904,459	<b>T (lb/in)</b>	<b>125,733</b>	<b>N</b>	8	<b>S<sub>B</sub> (psi)</b>	15000
<b>B<sub>A</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	<b>0,167</b>	<b>B<sub>A</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	0,202	<b>S<sub>B</sub> (psi)</b>	<b>12400,414</b>	<b>l<sub>2</sub> (in)</b>	1,125

Tabla. A2.LXX. Primer cálculo de tamaño y número de pernos

Diseño del anillo de la base (Segundo cálculo)							
<b>D (in)</b>	52,982	<b>A<sub>B</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	2204,649	<b>C<sub>B</sub> (in)</b>	166,446	<b>M (lb-ft)</b>	27419,913
<b>W (lb)</b>	5904,459	<b>T (lb/in)</b>	<b>113,774</b>	<b>N</b>	8	<b>S<sub>B</sub> (psi)</b>	15000
<b>B<sub>A</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	<b>0,158</b>	<b>B<sub>A</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	0,202	<b>S<sub>B</sub> (psi)</b>	<b>11718,632</b>	<b>l<sub>2</sub> (in)</b>	1,125

Tabla. A2.LXXI. Segundo cálculo de tamaño y número de pernos

El número y tamaño de pernos son coincidentes con la estimación anterior, y la resistencia mecánica de los pernos es adecuada.

De la misma forma, el resto de dimensiones del anillo, junto a la comprobación de resistencia mecánica y peso se tabula seguidamente, como resultado de aplicar el procedimiento señalado en el último apartado mencionado a los datos actualizados, (diámetro externo y

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

W tomado como suma de los pesos de armado, faldón y agua de prueba tomados, respectivamente de A2.LXVII, A2.LXIX y A2.LXVIII).

Se tiene:

Diseño del anillo de la base							
$A_s$ (in <sup>2</sup> )	2021,373	$C_s$ (in)	159,378	$W$ (lb)	16576,209	$M$ (lb-ft)	27419,913
$P_c$ (lb/in)	<b>266,786</b>	$t_{\text{faldón}}$ (3/16 in)	0,1875	$I_3$ (in)	0,8125	$I$ (in)	3,125
$I_1$ (in)	1,9375	$t_B$ (in)	<b>0,62</b>	$D_0$ (in)	54,606	$D_i$ (in)	48,356
$A_R$ (in <sup>2</sup> )	505,419	$S_1$ (psi)	<b>84,128</b>	$S_2$ (psi)	<b>2425,401</b>	$m_B$ (lb)	<b>89,500</b>

Tabla. A2.LXXII. Dimensiones y comprobaciones del anillo de la base

Las dimensiones del anillo de la base son coincidentes con las encontradas en el primer cálculo, mientras que el peso se ve insignificamente modificado, al tiempo que los esfuerzos mecánicos, a que se somete el anillo, son coherentes con los criterios de resistencia mostrados.

Con el peso recalculado y las nuevas dimensiones, se hace preciso estimar nuevamente la sollicitación de espesor por carga de viento y sismo.

Para el primer caso, son de aplicación las ecuaciones (A2.30), desarrolladas por (A2.35) sobre los datos indicados en el apartado A2.C1.3.5, a excepción del diámetro externo que debe actualizarse al presentado en la Tabla A2.LXVI. Los datos previos recalculados son los que siguen:

Carga por viento (Recalculada)					
$P_w$ (lb/ft <sup>2</sup> )	14,04	$D_e$ (ft)	4,228	$E$	0,85
$h_T$ (ft)	6,562	$H_{\text{tot}}$ (ft)	18,895	$h_1$ (ft)	9,448
$H_{\text{esc}}$ (ft lin.)	16,895	$H_{\text{plat}}$ (ft lin.)	8	$N^\circ$ plataformas	2
		$S$ (psi)	13800		

Tabla. A2.LXXIII. Datos previos para la estimación de la carga por viento

Y el nuevo espesor es el que figura a continuación:

Carga por viento (Recalculada)					
<b>V (lb)</b>	1121,550	<b>M (lb-ft)</b>	10596,022	<b>Casco</b>	
<b>V (lb)</b>	237,210	<b>M (lb-ft)</b>	2003,873	<b>Escalera</b>	
<b>V (lb)</b>	112,320	<b>M (lb-ft)</b>	1503,720	<b>h<sub>plat,1</sub> (ft)</b>	13,388
<b>V (lb)</b>	112,320	<b>M (lb-ft)</b>	1897,683	<b>h<sub>plat,2</sub> (ft)</b>	16,895
<b>V (lb)</b>	1583,400	<b>M (lb-ft)</b>	16001,298	<b>Total</b>	
<b>M<sub>T</sub> (lb-ft)</b>	6889,338	<b>R<sub>m</sub> (in)</b>	24,705	<b>t<sub>c,w</sub> (in)</b>	<b>0,004</b>

Tabla. A2.LXXIV. Primera estimación del espesor por carga del viento

El nuevo espesor es coincidente con el primero. Debe comprobarse la posible variación del espesor por carga sísmica respecto al primer cálculo.

Son de aplicación las ecuaciones presentadas en el apartado A2.C1.3.8 modificando, entre los datos, el diámetro externo al más actual de la Tabla A2.LXVI y el peso total del separador al recalculado en la Tabla A2.LXIX. El radio medio se toma igual al de la Tabla A2.LXXIV, como se hizo previamente, ya que el espesor  $t_{c,w}$  recalculado coincide con el previo y no modifica el espesor combinado del casco ni, por ende, el diámetro externo del recipiente. Siguiendo el procedimiento de cálculo, presentado en el apartado señalado para la estimación del espesor por carga sísmica, se obtiene:

Carga sísmica					
<b>Z</b>	0,375	<b>I</b>	1	<b>K</b>	2
<b>H<sub>tot</sub> (ft)</b>	18,895	<b>D<sub>e</sub> (ft)</b>	4,228	<b>t<sub>faldón</sub> (3/16 in)</b>	0,1875
<b>w (lb/ft)</b>	903,181	<b>T (s)</b>	0,076	<b>C (obtenido)</b>	0,24
<b>C (tomado)</b>	0,12	<b>S</b>	1,5	<b>W (lb)</b>	17065,904
<b>V (lb)</b>	2303,897	<b>0,25V (lb)</b>	575,974	<b>F<sub>t</sub> (lb)</b>	12,138
<b>M (lb-ft)</b>	29098,655	<b>M<sub>T</sub> (lb-ft)</b>	10104,937	<b>R<sub>m</sub> (in)</b>	24,704
<b>S (psi)</b>	13800	<b>E</b>	0,85	<b>t<sub>c,s</sub> (in)</b>	<b>0,016</b>

Tabla. A2.LXXV. Segunda estimación del espesor por carga sísmica

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Espesor similar al anterior, por lo que el espesor final del casco coincide con el anterior, (las cantidades recalculadas de los espesores por viento y sismo no difieren de las del primer cálculo).

Puesto que se han obtenido nuevos momentos, (sigue rigiendo el que se debe a la carga sísmica según datos de las tablas A2.LXXIV y A2.LXXV), deben rehacerse por segunda vez los cálculos para el anillo de la base. Se obtiene:

Diseño del anillo de la base							
<b>D (in)</b>	50,732	<b>A<sub>B</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	2021,373	<b>C<sub>B</sub> (in)</b>	159,378	<b>M (lb-ft)</b>	29099,026
<b>W (lb)</b>	5904,459	<b>T (lb/in)</b>	<b>135,701</b>	<b>N</b>	8	<b>S<sub>B</sub> (psi)</b>	15000
<b>B<sub>A</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	<b>0,180</b>	<b>B<sub>A</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	0,202	<b>S<sub>B</sub> (psi)</b>	<b>13383,523</b>	<b>I<sub>2</sub> (in)</b>	1,125

Tabla. A2.LXXVI. Primer cálculo de tamaño y número de pernos

Diseño del anillo de la base (Segundo cálculo)							
<b>D (in)</b>	52,982	<b>A<sub>B</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	2204,649	<b>C<sub>B</sub> (in)</b>	166,446	<b>M (lb-ft)</b>	29099,026
<b>W (lb)</b>	5904,459	<b>T (lb/in)</b>	<b>122,914</b>	<b>N</b>	8	<b>S<sub>B</sub> (psi)</b>	15000
<b>B<sub>A</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	<b>0,170</b>	<b>B<sub>A</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	0,202	<b>S<sub>B</sub> (psi)</b>	<b>12659,991</b>	<b>I<sub>2</sub> (in)</b>	1,125

Tabla. A2.LXXVII. Segundo cálculo de tamaño y número de pernos

El número y tamaño de pernos son coincidentes con la estimación anterior, y la resistencia mecánica de los pernos es adecuada.

Diseño del anillo de la base							
<b>A<sub>s</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	2021,373	<b>C<sub>s</sub> (in)</b>	159,378	<b>W (lb)</b>	16576,209	<b>M (lb-ft)</b>	29099,026
<b>P<sub>c</sub> (lb/in)</b>	<b>276,754</b>	<b>t<sub>faldón</sub> (3/16 in)</b>	0,1875	<b>I<sub>3</sub> (in)</b>	0,8125	<b>I (in)</b>	3,125
<b>I<sub>1</sub> (in)</b>	1,9375	<b>t<sub>B</sub> (in)</b>	<b>0,62</b>	<b>D<sub>0</sub> (in)</b>	54,606	<b>D<sub>i</sub> (in)</b>	48,356
<b>A<sub>R</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	505,419	<b>S<sub>1</sub> (psi)</b>	<b>87,271</b>	<b>S<sub>2</sub> (psi)</b>	<b>2516,024</b>	<b>m<sub>B</sub> (lb)</b>	<b>89,500</b>

Tabla. A2.LXXVIII. Dimensiones y comprobaciones del anillo de la base

Las dimensiones del anillo de la base, así como el peso, son coincidentes con los encontrados en el primer cálculo, al tiempo que los esfuerzos mecánicos, a que se somete el anillo, son coherentes con los criterios de resistencia mostrados.

Procede, por último, recalcular el espesor del faldón de acuerdo con la ecuación (A2.48) y el nuevo dato de momento sísmico, de la Tabla A2.LXXV. Se obtiene:

$$t_{\text{faldón}} = 0,019 \text{ in} \approx 3/16 \text{ de pulgada (4,8 mm)}$$

Valor similar al obtenido en el segundo cálculo y, en todo caso, coincidente una vez redondeado al mínimo espesor comercial.

Con esto queda cerrado el cálculo, puesto que se ha encontrado convergencia en el espesor del casco. Resta efectuar una serie de comprobaciones mecánicas, lo que se efectuará en el siguiente apartado.

#### A2.C1.3.12. Diseño mecánico (XI). Comprobaciones

El diseño mecánico concluye, una vez dimensionados todos los elementos estructurales, con la constatación de que todos los esfuerzos, ocasionados por las distintas cargas, no superan el máximo tolerable por el material.

Además debe comprobarse si el período fundamental de vibración encontrado supera al permitido. Lo mismo se efectuará para la deflexión del recipiente.

Se considerarán los siguientes esfuerzos:

- Presión interna,  $S_i$ .
- Viento,  $S_w$ .
- Peso en montaje,  $S_{vac}$ .
- Peso en operación,  $S_{op}$ .
- Carga sísmica,  $S_s$ .

Las ecuaciones son las que siguen:

$$(A2.69) \left\{ \begin{array}{l} S_{pi}(\text{psi}) = \frac{P_{diseño}(\text{psi}) \cdot D_e(\text{in})}{4 \cdot t_e(\text{in})} \quad (1) \\ S_w(\text{psi}) = \frac{12 \cdot M_T(\text{lb}\cdot\text{ft})}{R_m(\text{in}) \cdot \pi \cdot t_e(\text{in})} \quad (2) \\ S_{vac}(\text{psi}) = \frac{m_{armado}(\text{lb})}{C_m(\text{in})t_e(\text{in})} \quad (3) \\ S_{op}(\text{psi}) = \frac{m_{rec,op}(\text{lb})}{C_m(\text{in})t_e(\text{in})} \quad (4) \\ S_s(\text{psi}) = \frac{12 \cdot M_T(\text{lb}\cdot\text{ft})}{R_m(\text{in}) \cdot \pi \cdot t_e(\text{in})} \quad (4) \end{array} \right.$$

La presión de diseño se toma de la Tabla A2.XXIX, el diámetro externo más actual, de A2.LXVI y  $t_e$  es el espesor total incluyendo el combinado del casco, aislamiento y chapa envolvente de las tablas A2.LXIV y A2.LXVI. Se toma el espesor comercial del casco, a la sazón 5/16 de pulgada, tal como se muestra en la tabla correspondiente.

Los momentos  $M_T$  se tomarán de las tablas A2.LXXIV y A2.LXXV según correspondan a esfuerzo por viento o sísmico, respectivamente. El radio medio más actual se toma de la Tabla A2.LXXIV y los pesos de armado y del recipiente en operación, respectivamente, de las tablas A2.LXVII y A2.LXVIII. Por último,  $C_m$  es la longitud de la circunferencia descrita por el casco, sobre su diámetro medio, esto es:

$$C_m(\text{in}) = \pi \cdot \frac{D_{e,c}(\text{in}) + D_i(\text{in})}{2} \quad (A2.70)$$

Se trata de la longitud de la circunferencia de diámetro medio entre el externo del casco,  $D_{e,c}$  y el interno  $D_i$ , ambos tomados de la Tabla A2.LXIV.

Con todos los datos presentados se presentan los siguientes esfuerzos en forma tabular:

Comprobaciones							
<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	67,174	<b>D<sub>e</sub> (in)</b>	50,732	<b>t<sub>e</sub> (in)</b>	1,321	<b>S<sub>pi</sub> (psi)</b>	<b>645,052</b>
<b>M<sub>T</sub> (lb-ft)</b>	6889,338	<b>R<sub>m</sub> (in)</b>	24,705	<b>t<sub>e</sub> (in)</b>	1,321	<b>S<sub>w</sub> (psi)</b>	<b>32,644</b>
<b>m<sub>armado</sub> (lb)</b>	5240,242	<b>C<sub>m</sub> (in)</b>	152,061	<b>t<sub>e</sub> (in)</b>	1,321	<b>S<sub>vac</sub> (psi)</b>	<b>26,092</b>
<b>m<sub>rec,op</sub> (lb)</b>	15911,991	<b>C<sub>m</sub> (in)</b>	152,061	<b>t<sub>e</sub> (in)</b>	1,321	<b>S<sub>op</sub> (psi)</b>	<b>79,228</b>
<b>M<sub>T</sub> (lb-ft)</b>	10105,066	<b>R<sub>m</sub> (in)</b>	24,705	<b>t<sub>e</sub> (in)</b>	1,321	<b>S<sub>s</sub> (psi)</b>	<b>47,881</b>

Tabla. A2.LXXIX. Comprobación de esfuerzos

Ninguna sollicitación supera el esfuerzo máximo admisible por el material, (S = 13800 psi para acero al carbono según SA-285 grado C).

Se verifica seguidamente si el período de vibración supera al permisible. El primero se obtuvo como parte del cálculo de espesor por carga sísmica, (véase Tabla A2.LXXV) y el permisible, T<sub>a</sub>, se calcula según:

$$T_a(s) = 0,80 \cdot \sqrt{\frac{m_{sep,op} (lb) + H_{tot} (ft)}{V (lb) \cdot g (ft/s^2)}} \quad (A2.71)$$

Donde el peso total del separador en operación, más actual, se toma de la Tabla A2.LXIX, la altura total de A2.XL, el cortante debiera ser el del viento, sin embargo se toma el del esfuerzo sísmico, Tabla A2.LXXV, como criterio conservador, (al ser mayor el segundo, el período de vibración permitido es más restrictivo) y g, la aceleración de la gravedad, se toma en unidades anglosajonas tal como se procuró en la Tabla A2.XXIX. Se tiene:

Comprobaciones							
<b>m<sub>sep,op</sub> (lb)</b>	17066,121	<b>H<sub>tot</sub> (ft)</b>	18,895	<b>V (lb)</b>	2303,926	<b>T<sub>a</sub> (s)</b>	<b>1,668</b>

Tabla. A2.LXXX. Comprobación de vibración

Por comparación con el último período de vibración calculado, (en la Tabla A2.LXXV), se comprueba que el problema de vibración excesiva no sucede en los separadores diseñados.

Por último, se verifica la deflexión del recipiente. Obsérvese la siguiente figura:

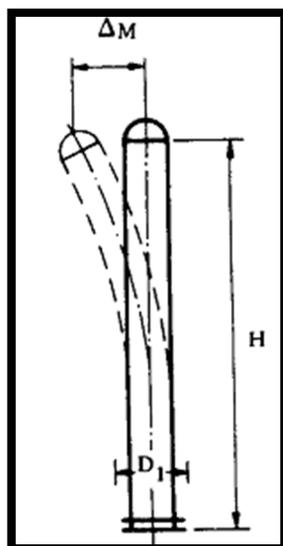


Figura. A2.14. Deflexión en columnas. (E. F. Megyesy, 1992)

Cuando actúa una carga de viento sobre un recipiente es de esperar una cierta deformación o deflexión,  $\Delta_m$ , tanto mayor cuanto más se eleve sobre el nivel del suelo y mayor sea la relación de longitud a diámetro. En este caso, puesto que dicha relación es justo la recomendada para recipientes verticales, y dado que la altura no es muy elevada, (apenas 4 m, como se calculó en el apartado A2.C1.3.1), no es de esperar una deflexión importante. No en vano, debe comprobarse que ésta no supera 6 pulgadas cada 100 pies de altura. Sea la siguiente ecuación:

$$\Delta_m(\text{in}) = \frac{P_w(\text{psi}) \cdot D_e(\text{ft}) \cdot H_{tot}(\text{ft}) \cdot (12 \cdot H_{tot}(\text{ft}))^3}{8 \cdot E(\text{psi}) \cdot I(\text{in}^4)} \quad (\text{A2.72})$$

Donde  $P_w$  es la presión del viento calculada en el apartado A2.C1.3.5,  $D_e$  es el diámetro externo, más actual, tomado de A2.LXVI y debidamente convertido,  $H_{tot}$  es la altura total tomada de A2.XL y  $E$  es el módulo de elasticidad, que para acero con un contenido en carbono inferior a 0,30%, adquiere, según Megyesy, el valor de  $E = 29,15 \cdot 10^6$  psi a una temperatura comprendida en la horquilla en-

tre 70 °F (21,1 °C) hasta 200 °F (93,3 °C). El término I, es el momento de inercia para casco cilíndrico delgado. Se calcula según:

$$I(\text{in}^4) = R_m^3(\text{in}) \cdot \pi \cdot t_{\text{faldón}}(\text{in}) \quad (\text{A2.73})$$

El radio medio más actual se toma de la Tabla A2.LXXIV y el último espesor del faldón mostrado en el apartado anterior. Aplicando (A2.73) y (A2.72) se encuentra:

Comprobaciones							
$P_w$ (lb/ft <sup>2</sup> )	14,04	$D_e$ (ft)	4,228	$H_{\text{tot}}$ (ft)	18,895	$R$ (in)	24,705
$t_{\text{faldón}}$ (in)	0,1875	$I$ (in <sup>4</sup> )	8882,327	$E$ (lb/in <sup>2</sup> )	$29,15 \cdot 10^6$	$\Delta_m$ (in)	0,006
			$\Delta_{m,\text{perm}}$ (in)	1,134			

Tabla. A2.LXXXI. Comprobación de deflexión

La deflexión máxima permitida,  $\Delta_{m,\text{perm}}$ , se calcula multiplicando la altura total por 6 pulgadas y dividiendo por 100 pies de altura. Como se puede comprobar, la deflexión de los recipientes es despreciable.

El dato de módulo de elasticidad se justifica en la composición de la aleación SA-285 grado C que, según especificaciones comerciales contiene un 0,28% en carbono.

Este apartado cierra el diseño mecánico, puesto que los espesores encontrados para cada elemento estructural, son coherentes con el peso y el esfuerzo a que se somete. El siguiente apartado incluye el cálculo de las orejas de izado de los recipientes vacíos, así como del volumen de pintura requerido.

### A2.C1.3.13. Cálculo de orejas de izado y pintado del casco y cabezales

Los recipientes debe construirse incluyendo al menos un par de orejas de izado: eslabones atornillados a una base, con forma de oreja, soldada al casco.

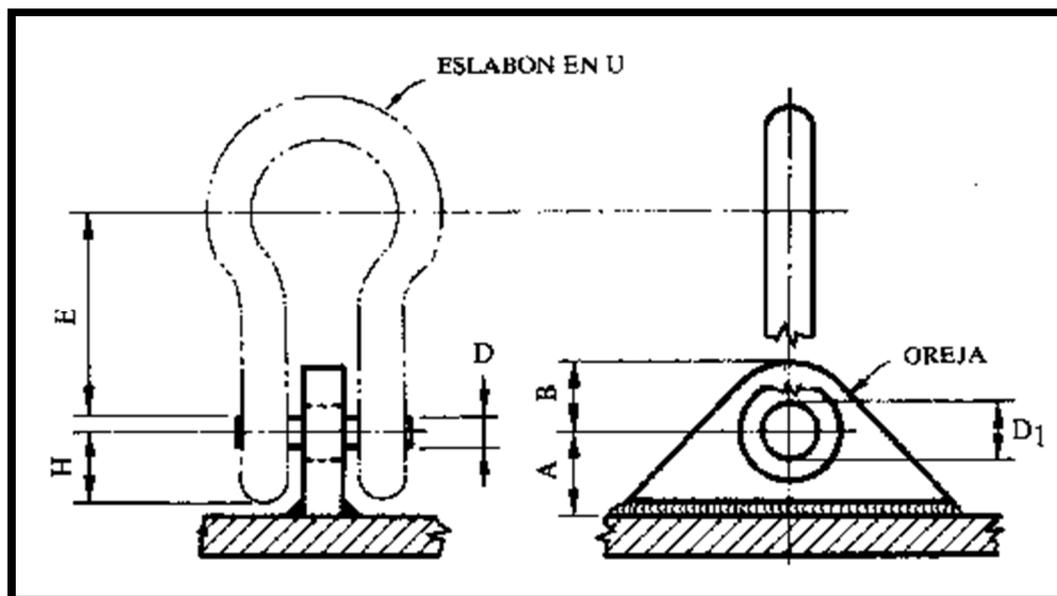


Figura. A2.15. Descripción de las orejas de izado. (E. F. Megyesy, 1992)

La Figura A2.15 detalla las dimensiones de las orejas que deben diseñarse para sostener, por sí propias, todo el peso del aparato. Para el cálculo del espesor de la oreja, Megyesy sugiere la siguiente ecuación:

$$t_{oreja}(\text{in}) = \frac{W(\text{lb})}{2 \cdot S(\text{psi}) \cdot \left( B(\text{in}) - \frac{D_1(\text{in})}{2} \right)} \quad (\text{A2.74})$$

Donde el peso  $W$  es el total del recipiente sustrayendo el de líquido:  $m_{sep,op} - m_{agua,rec}$ . Las masas se toman de las tablas A2.LXIX y A2.LXVIII.  $S$  es el esfuerzo permitido para el material de las orejas de izado. El material recomendado es acero al carbono según especificación SA-515-70, y su esfuerzo permitido, para una temperatura comprendida entre  $-20\text{ }^{\circ}\text{F}$  ( $-28,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) a  $650\text{ }^{\circ}\text{F}$  ( $343,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), adquiere el valor  $S = 17500\text{ psi}$ . Las dimensiones  $B$  y  $D_1$  están tabuladas en relación al peso del recipiente. Por tanto, aplicando (A2.74) se encuentra el siguiente espesor:

Cálculo de las orejas de izado					
<b>S (psi)</b>	17500	<b>W (lb)</b>	6394,372	<b>D (in)</b>	1
<b>D<sub>1</sub> (in)</b>	1,125	<b>H (in)</b>	1,31	<b>A (in)</b>	1,7
<b>B (in)</b>	2	<b>E (in)</b>	2,59	<b>t (in)</b>	<b>0,127</b>

Tabla. A2.LXXXII. Dimensiones de las orejas de izado

DIMENSIONES MINIMAS DE LAS OREJAS							
Carga, lb	Diám. del perno, D	Diám. del agujero de la oreja, D <sub>1</sub>	H	A	Borde cortado a cizalla	Corte a gas rolado	Brazo del momento, E
710	5/16	3/8	.50	.65			.84
1060	3/8	7/16	.56	.73			.97
1600	7/16	1/2	.63	.82	7/8	3/4	1.16
2170	1/2	5/8	.69	.90	1-1/8	7/8	1.44
2820	5/8	3/4	.94	1.22	1-1/4	1	1.75
4420	3/4	7/8	1.13	1.47	1-1/2	1-1/8	2.12
6375	7/8	1	1.19	1.55	1-3/4	1-1/4	2.25
8650	1	1-1/8	1.31	1.70	2	1-1/2	2.59

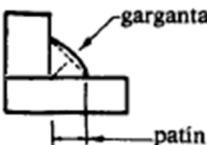
Figura. A2.16. Dimensiones de las orejas de izado. (E. F. Megyesy, 1992)

Se han tabulado, en A2.LXXXII, las dimensiones D, el diámetro del perno, D<sub>1</sub> el diámetro del agujero de la oreja, H, A, B, el tamaño del borde cortado a cizalla y el brazo del momento E, para una carga máxima, más próxima a la del separador, de 8650 lb. Se ha mostrado asimismo la tabla origen del libro de Megyesy en la Figura A2.16.

El espesor de las orejas se redondea a 3/16 in. La soldadura se practica directamente al casco, (que también debe incluir clips de sujeción para el aislamiento y la chapa envolvente). Para la dimensión de la soldadura se considera la siguiente tabla:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria



Espesor de la placa más gruesa, pulg.	1/2	3/4	1/2	2 1/4	6	Más de 6
Tamaño mínimo de la soldadura de filete, pulg.	3/16	1/4	3/16	3/8	1/2	3/8

Figura. A2.17. Tamaño mínimo para las soldaduras. (E. F. Megyesy, 1992)

Puesto que el espesor de la placa más gruesa, (a la sazón el casco cuyo espesor es de 5/16 de pulgada frente a la oreja de 3/16 de pulgada), el tamaño de la soldadura de filete, o angular, será de 3/16 de pulgada. Esta dimensión corresponde al cateto del triángulo rectángulo isósceles mayor que puede inscribirse en el cordón.

Según normas, la longitud de la unión debe estar comprendida entre 15 y 60 veces el tamaño de la garganta, (la hipotenusa correspondiente al triángulo anterior). Así, se tiene:

$$l_{sold}(\text{in}) = 30 \cdot a(\text{in}) = 30 \cdot \sqrt{(3/16)^2 + (3/16)^2} \cong 8 \text{ in}$$

Donde  $a$  es la dimensión de la garganta, calculada a partir del teorema de *Pitágoras*. La longitud de la oreja será de 8 pulgadas.

Por último, las orejas de izado se colocan, según recomendaciones de ubicación tomadas de *Megyesy*, a 0,207 veces la altura total del recipiente, (la oreja superior se coloca a una altura igual a la total menos la cantidad mencionada). A tenor de lo anterior, la oreja inferior se coloca a 3,911 ft y la superior a 14,984 ft, (ambas alturas tomando el suelo como origen).

En lo tocante a la pintura, es éste un elemento importante de protección frente a la corrosión bajo aislamiento. Este fenómeno de corrosión se observa en tuberías, recipientes y demás componentes estructurales, a resultas de la retención de agua por parte del aisla-

miento que entra en contacto con el material del casco. Las causas de tal retención, además de por fugas de los encamisados de vapor o agua de refrigeración, (lo que no procede en este caso); responden fundamentalmente a la agresión de agentes meteorológicos como la lluvia.

Este fenómeno provoca pérdidas de material en forma de corrosión localizada y sucede en un rango de temperaturas comprendidas entre  $-12$  y  $165$  °C, siendo mucho más severa entre  $49$  y  $93$  °C.

Uno de los principales inconvenientes de la corrosión bajo aislamiento es su actuación silente: en apariencia, el elemento estructural puede encontrarse en condiciones adecuadas, de modo que, el daño no se detecta hasta que, durante las tareas de mantenimiento o inspección, se descubre la deposición de múltiples láminas de óxido al retirar el aislamiento. La Figura A2.18 recoge una fotografía tomada a una tubería de la que se ha retirado el aislamiento. Los efectos de la corrosión son evidentes.



Figura. A2.18. Efectos de la corrosión bajo aislamiento. (CEPSA)

Puesto que los aceros al carbono y de baja aleación son particularmente susceptibles a este mecanismo de corrosión, y considerando que son precisamente aceros al carbono los empleados como

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

material, para los elementos estructurales de los distintos recipientes del presente PFC, debe plantearse una solución frente a las siguientes alternativas:

- Prescindir cuando sea posible de aislamiento.
- Emplear como aislamiento material *foam-glass*.
- Proteger el casco mediante pintura protectora.

En lo tocante a aspectos de diseño de la unidad “SIMPLE”, dado que el mantenimiento de la temperatura es fundamental para el correcto desenvolvimiento de la operación, no puede eliminarse el aislamiento. Tampoco es recomendable emplear otro aislamiento distinto de la lana de vidrio, por motivos económicos. Por consiguiente, se elige el pintado del casco como mejor opción protectora, tanto para esta operación como para el resto de las tratadas en el presente PFC, por idénticas razones. Adicionalmente, se controlará la eventual pérdida de espesor del casco mediante radiografías periódicas.

Debe calcularse tanto la superficie del casco como la de los cabezales. Son de utilidad las siguientes expresiones:

$$(A2.75) \begin{cases} S_{cab}(\text{in}^2) = \frac{\pi}{4} D_{e,cab}^2(\text{in}) + \pi \cdot D_{e,cab}(\text{in}) \cdot t_{cab,pi}(1) \\ S_{casco}(\text{in}^2) = \pi \cdot D_{e,c}(\text{in}) \cdot H_{tot}(\text{in})(2) \end{cases}$$

Pintura			
$D_{e,c}(\text{in})$	48,715	$D_{e,cab}(\text{in})$	48,840
$H_{tot}(\text{in})$	226,744	$t_{cab,pi}(\text{in})$	0,375
$S_{casco}(\text{in}^2)$	34701,517	$S_{cab}(\text{in}^2)$	1930,987
$e_{capa}(\text{in})$	0,001	$e_{capa}(\text{in})$	0,001
$V_{pint,casco}(\text{in}^3)$	34,702	$V_{pint,cabezales}(\text{in}^3)$	3,862
$V_{pint,casco}(\text{gal(US)})$	<b>0,150</b>	$V_{pint,cabezales}(\text{gal(US)})$	<b>0,017</b>
	<b><math>V_{pint,tot}(\text{gal(US)})</math></b>		<b>1,402</b>

Tabla. A2.LXXXIII. Cálculo de volumen de pintura

El diámetro externo y espesor de cada cabezal se ha tomado de la Tabla A2.LXV y el diámetro externo del casco, de A2.LXIV. Son

estas las dimensiones más actualizadas. La altura total se toma de la Tabla A2.XL y se transforma convenientemente. Aplicando (A2.75) sobre estos datos se obtienen los resultados consignados en A2.LXXXIII.

Se ha seleccionado un sistema de pinturas siguiendo especificaciones del *Steel Structures Painting Council, (SSPC)*. Dicho sistema de pinturas viene recomendado para ambientes secos, no corrosivos en interior de edificios o protegidos temporalmente contra intemperie. No se han considerado condiciones excesivamente severas, ya que la mayor parte del tiempo la estructura estará guarnecida por el aislamiento y chapa envolvente.

La identificación del sistema viene dada por SSPC-PS 7.01.No obliga al tratamiento previo, (sólo una limpieza de contaminantes superficiales del casco: grasa, tierra, entre otros componentes), y requiere un espesor de pintura seca de una milésima de pulgada, ( $e_{\text{capa}}$  en la Tabla A2.LXXXIII).

El volumen de pintura de cada componente, (casco y cabezales) se ha calculado multiplicando la superficie por el espesor de la capa de pintura. En el caso de los cabezales, debe multiplicarse por dos el anterior volumen, (a fin de obtener el volumen requerido por los dos cabezales). El volumen final es la suma de los volúmenes del casco y los dos cabezales, convertido a galones estadounidenses, la unidad de referencia de los sistemas SSPC:

$$V_{\text{pint,tot}}(\text{gal(US)}) = 4 \cdot 1,4 \cdot 1,5 \cdot [V_{\text{pint,casco}}(\text{gal(US)}) + V_{\text{pint,cabezales}}(\text{gal(US)})] \quad (\text{A2.76})$$

El sistema SSPC-PS 7.01 indica aplicar una mano de pintura de taller roja o café, cuyo contenido en sólidos es del 60%. Se exige una capa de pintura de espesor seco de una milésima de pulgada: cuando la pintura se seca, el espesor aplicado merma por la pérdida de volátiles, luego será necesario aumentar la cantidad de pintura aplicada el tanto por ciento correspondiente a los componentes volátiles: 40% para un contenido en sólidos del 60% como se muestra

más arriba. El incremento del 40% se aplica multiplicando la suma de los volúmenes de casco y cabezales por 1,4.

Debe incrementarse un 50% la cantidad de pintura requerida en concepto de pérdidas por aplicación, (se trata del factor 1,5 de la última ecuación). Finalmente, el volumen de pintura se multiplica por los cuatro separadores requeridos por la operación "SIMPLE".

Concluye el capítulo con el siguiente compendio de las dimensiones y magnitudes más significativas de cada separador.

La unidad "SIMPLE" se compone de **cuatro separadores gas-líquido**.

La tubería de alimentación se fabricará en acero al carbono según especificación SA-106 grado B. Constará de un ramal principal, número 1, de 6 in, (152,4 mm) de diámetro nominal, número de *Schedule* 40, constituido por tramos sin costura y con los bordes rebajados para soldadura a tope. La presión de operación es de 5 atm para este ramal.

Dicha tubería de alimentación se segrega en cuatro ramales que portan la alimentación a cada separador. Los ramales se identifican, cada uno, con los números del 2 al 5. El diámetro nominal es de 3 in, (76,2 mm), número de *Schedule* 40, constituido por tramos sin costura y con los bordes rebajados para soldadura a tope. La presión de operación es de 5 atm para cada ramal.

La presión de los ramales del 2 al 5 se reduce a 2,5 atm, la de operación de la unidad de operación diseñada en el presente capítulo. Los nuevos ramales se identifican, cada uno, con los números del 6 al 6. El diámetro nominal es de 3 in, (76,2 mm), su número de *Schedule* 40, constituido por tramos sin costura y con los bordes rebajados para soldadura a tope. La presión de operación es de 5 atm para cada ramal.

Cada separador descarga el líquido a través de tuberías identificadas con los números del 10 al 13. El diámetro nominal es de 2 in, (50,8 mm), número de *Schedule* 120, constituido por tramos sin costura y con los bordes rebajados para soldadura a tope. La presión de operación es de 2,5 atm para cada ramal. La descarga de vapor tiene lugar a través de tuberías identificadas con los números del 14 al 17. El diámetro nominal es de 20 in, (508 mm), número de *Schedule* 10, constituido por tramos sin costura y con los bordes rebajados para soldadura a tope. La presión de operación es de 2,5 atm para cada ramal.

Cada separador es un recipiente a presión vertical soportado por faldón. Las dimensiones son las que siguen:

- Altura de casco, (sin incluir cabezales ni faldón), de 12,334 ft (3,8 m).
- Diámetro interno de 4,008 ft (1,2 m).
- La tubuladura de alimentación de cada separador se localiza a 6,826 ft (2,1 m). Se trata de la suma de  $H_L$  y  $H_{L-E}$ .
- El extractor de neblina, trenzado de hilos de alambre de acero inoxidable tipo 304, posee un espesor de 6 pulgadas (152,4 mm) y se localiza a una altura de 10,834 ft (3,3 m). Se trata de la suma de la anterior y  $H_{E-N}$ . Su diseño se especifica en ulteriores apartados.
- El rompedor de vórtices es un molino de paletas situado en el fondo del recipiente, (véase Figura A2.3). El diámetro de las paletas es el doble de la conducción de descarga: 4 in (101,6 mm), la altura es un diámetro, 2 in (50,8 mm) y el espesor es  $\frac{1}{4}$  de pulgada (6,35 mm). El material es acero al carbono según SA-285 grado C.
- El espesor del casco es de  $\frac{5}{16}$  de pulgada (7,94 mm) y el de cada cabezal toriesférico tipo *Klopper*,  $\frac{3}{8}$  de pulgada (9,52 mm). El material común es acero al carbono según SA-285 grado C.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

---

- El aislamiento se asegura recubriendo el recipiente con placas de lana de vidrio de 25 mm de espesor.
- Se recubre el aislamiento mediante chapa envolvente de aluminio 1100, sometido a tratamiento H14, de 0,61 mm de espesor. El diámetro externo final incluyendo todos los espesores es de 50,732 in (1,3 m).

El nivel de líquido en el separador es de 4,822 ft (1,5 m) y el tiempo de residencia de 5 min (300 s).

El faldón se tiene una altura de 2 m y un espesor de 3/16 de pulgada, (4,76 mm). Se soporta sobre un anillo de diámetro externo 54,606 in (1,39 m) y diámetro interno 48,356 in (1,23 m). El espesor es de 5/8 de pulgada (15,9 mm). Se ancla al suelo de hormigón mediante 8 pernos de 3/4 de pulgada (19,0 mm) colocados equidistantes a una distancia del faldón de 1,125 in (28,6 mm). Tanto el faldón como el anillo de la base se construyen en el mismo material que casco y cabezales. Los pernos serán de acero al carbono según SA-325.

Las bridas de alimentación y descarga de líquido serán de cuello soldable y diámetro nominal coincidente con el de sus conducciones; no requieren refuerzo. La brida de descarga de vapor es asimismo de cuello soldable, del mismo diámetro nominal que la conducción asociada. Se requiere un anillo de refuerzo, (de acero al carbono según SA-285 grado C), de diámetros externo e interno 41,5 y 22 in (1,05 y 0,56 m) respectivamente. El espesor es de 3/8 de pulgada (9,52 mm). Todas las bridas se construyen en acero forjado según SA-105.

Ninguna perforación requerida por las sondas para instrumentación y control precisará refuerzo.

Todos los elementos estructurales presentados suman un peso de 6395 lb (2,90 t). En prueba hidráulica el peso aumenta a 17070 lb (7,74 t).

Las orejas de izado serán de 3/16 in (4,76 mm) de espesor y una longitud de 8 in (203,2 mm). Los pernos serán de una pulgada (25,4 mm) de diámetro, del mismo material que los de la base. Las orejas se construyen en acero al carbono según SA-515-70.

Atendiendo a la Figura A2.17 y todos los espesores mostrados, el tamaño de los cordones de soldadura será de 3/16 in (4,76 mm).

La pintura requerida para casco y cabezales de los cuatro separadores será de 1,402 gal (US) (5,3 L).

Se presentan seguidamente las tablas de dimensiones y pesos requeridas en algunos apartados, desde los que han sido previamente referenciadas.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

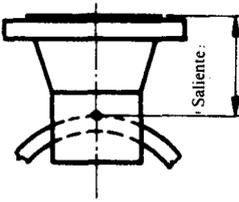
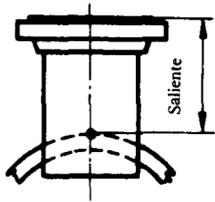
MINIMA EXTENSION SUGERIDA PARA LOS REGISTROS							
Las tablas dan el saliente mínimo aproximado de los registros. Cuando se use aislante o parche de refuerzo grueso puede ser necesario aumentar estas dimensiones.							
PARTE SALIENTE USANDO BRIDA DE CUELLO SOLDABLE							
	DIAM. NOMI- NAL DEL TUBO	PRESION NOMINAL DE LA BRIDA, lb					
		150	300	600	900	1500	2500
	2	6	6	6	8	8	8
	3	6	6	8	8	8	10
	4	6	8	8	8	8	12
	6	8	8	8	10	10	14
	8	8	8	10	10	12	16
	10	8	8	10	12	14	20
	12	8	8	10	12	16	22
	14	8	10	10	14	16	
16	8	10	10	14	16		
18	10	10	12	14	18		
20	10	10	12	14	18		
24	10	10	12	14	20		
SALIENTE USANDO BRIDA DESLIZABLE, EN PULGADAS							
	DIAM. NOMI- NAL DEL TUBO	PRESION NOMINAL DE LA BRIDA, lb					
		150	300	600	900	1500	2500
	2	6	6	6	8	8	8
	3	6	6	8	8	8	10
	4	6	8	8	8	10	10
	6	8	8	8	10	12	12
	8	8	8	10	10	12	12
	10	8	8	10	12	12	14
	12	8	10	10	12	12	16
	14	10	10	10	12		
16	10	10	12	12			
18	10	10	12	12			
20	10	10	12	12			
24	10	12	12	12			
<p>Extensión hacia el interior</p> <p>a  Tubo cortado a ras según la curvatura del recipiente</p> <p>b  Tubo cortado a ras sin seguir la curvatura del recipiente</p> <p>c  Extensión mínima para soldar</p> <p>d  Extensión para refuerzo u otro fin</p>							

Figura. A2.19. Extensión mínima de las tubuladuras. (E. F. Megyesy, 1992)

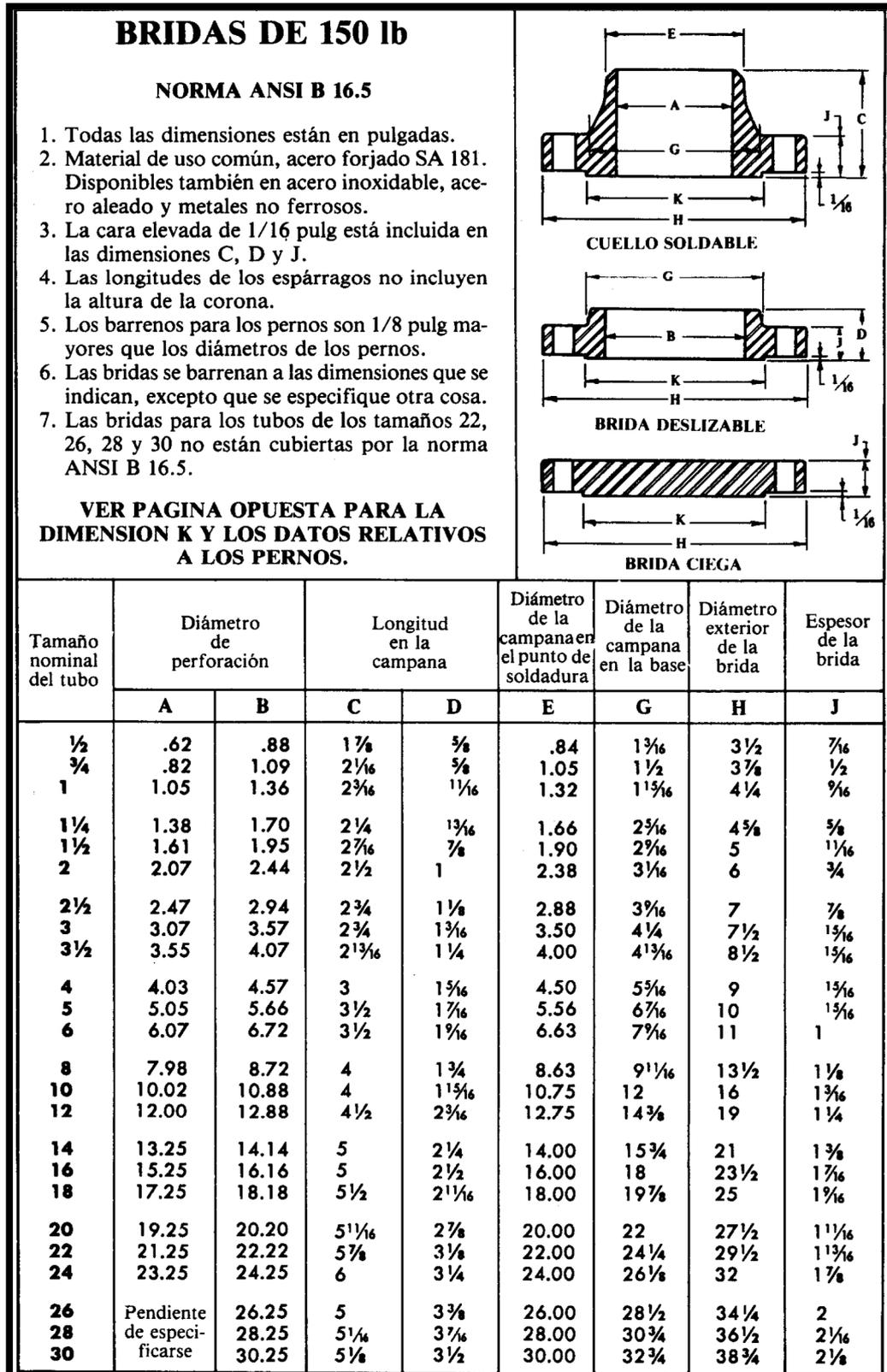


Figura. A2.20. Dimensiones de bridas de categoría 150#. (E. F. Megyesy, 1992)

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

PESO DE BRIDAS										
TAM. NOMINAL DEL TUBO	150 lb					300 lb				
	DESLIZABLE	DE CUELLO SOLDABLE	DE CUELLO SOLDABLE LARGO	CIEGA	DE ESPARRAGOS	DESLIZABLE	DE CUELLO SOLDABLE	DE CUELLO SOLDABLE LARGO	CIEGA	DE ESPARRAGOS
½	1.0	2.0		2.0	1.0	1.5	2.0		2.0	1.0
¾	1.5	2.0		2.0	1.0	2.5	3.0		3.0	2.0
1	2.0	2.5	8.0	2.0	1.0	3.0	4.0	10.0	4.0	2.0
1¼	2.5	2.5	10.0	3.0	1.0	4.5	5.0	14.0	6.0	2.0
1½	3.0	4.0	12.0	3.0	1.0	6.5	7.0	17.0	7.0	3.5
2	5.0	6.0	16.0	4.0	1.5	7.0	8.0	19.0	8.0	4.0
2½	8.0	10.0	21.0	7.0	1.5	10.0	12.0	28.0	12.0	7.0
3	9.0	11.5	24.0	9.0	1.5	13.0	16.0	36.0	16.0	7.5
3½	11.0	12.0	31.0	13.0	3.5	16.0	20.0	45.0	21.0	7.5
4	12.0	16.0	47.0	17.0	4.0	21.0	25.0	54.0	27.0	7.5
5	13.0	20.0	57.0	20.0	6.0	26.0	34.0	86.0	35.0	8.0
6	18.0	24.0	77.0	26.0	6.0	35.0	45.0	108.0	50.0	11.5
8	28.0	42.0	103	45.0	6.5	54.0	70.0	150	81.0	18.0
10	37.0	55.0	150	70.0	15.0	77.0	99.0	218	127	38.0
12	60.0	85.0	215	110	15.0	110	142	289	184	49.0
14	77.0	114	221	131	22.0	164	186	342	236	62.0
16	93.0	142	254	170	31.0	220	246	426	307	83.0
18	120	155	278	209	41.0	280	305	493	390	101
20	155	170	324	272	52.0	325	378	575	492	105
22	159	224		333	69.0	433	429		594	157
24	210	260	439	411	71.0	490	545	823	754	174
26	248	270	470	498	93.6	552	615	870	950	239
30	319	375	600	681	112.0	779	858	1130	1403	307

Figura. A2.21. Pesos de bridas. (E. F. Megyesy, 1992)

<b>PROPIEDADES DE LOS TUBOS</b>											
Los números de cédula y las designaciones de peso están de acuerdo con la Norma ANSI B36.10 para tubos de acero al carbono y aceros aleados, y la Norma ANSI B36.19 para tubos de acero inoxidable.											
Tam. nominal del tubo	No. de Cédula		Designación del peso	Diám. exterior, pulg	Diám. interior, pulg	Espesor de pared, pulg	Peso por pie, lb	Peso de agua por pie de tubo, lb	Superficie exterior por pie, pies <sup>2</sup>	Superficie interior por pie, pies <sup>2</sup>	Area transversal, pulg <sup>2</sup>
	Aceros al carbono y aleados	Aceros inoxidables									
1/8	...	10S	....	.405	.307	.049	.186	.0320	.106	.0804	.0740
	40	40S	Est.	.405	.269	.068	.244	.0246	.106	.0705	.0568
	80	80S	Ref.	.405	.215	.095	.314	.0157	.106	.0563	.0364
1/4	...	10S	....	.540	.410	.065	.330	.0570	.141	.1073	.1320
	40	40S	Est.	.540	.364	.088	.424	.0451	.141	.0955	.1041
	80	80S	Ref.	.540	.302	.119	.535	.0310	.141	.0794	.0716
3/8	...	10S	....	.675	.545	.065	.423	.1010	.177	.1427	.2333
	40	40S	Est.	.675	.493	.091	.567	.0827	.177	.1295	.1910
	80	80S	Ref.	.675	.423	.126	.738	.0609	.177	.1106	.1405
1/2	...	10S	....	.840	.670	.083	.671	.1550	.220	.1764	.3568
	40	40S	Est.	.840	.622	.109	.850	.1316	.220	.1637	.3040
	80	80S	Ref.	.840	.546	.147	1.087	.1013	.220	.1433	.2340
	160	...	...	.840	.466	.187	1.310	.0740	.220	.1220	.1706
	...	...	Doble Ref.	.840	.252	.294	1.714	.0216	.220	.0660	.0499
3/4	...	10S	....	1.050	.824	.083	.857	.2660	.275	.2314	.6138
	40	40S	Est.	1.050	.824	.113	1.130	.2301	.275	.2168	.5330
	80	80S	Ref.	1.050	.742	.154	1.473	.1875	.275	.1948	.4330
	...	...	...	1.050	.675	.188	1.727	.1514	.275	.1759	.3570
	160	...	Doble Ref.	1.050	.614	.218	1.940	.1280	.275	.1607	.2961
1	...	10S	....	1.315	1.097	.109	1.404	.4090	.344	.2872	.9448
	40	40S	Est.	1.315	1.049	.133	1.678	.3740	.344	.2740	.8640
	80	80S	Ref.	1.315	.957	.179	2.171	.3112	.344	.2520	.7190
	...	...	...	1.315	.877	.219	2.561	.2614	.344	.2290	.6040
	160	...	Doble Ref.	1.315	.815	.250	2.850	.2261	.344	.2134	.5217
1 1/4	...	10S	....	1.660	1.442	.109	1.806	.7080	.434	.3775	1.633
	40	40S	Est.	1.660	1.380	.140	2.272	.6471	.434	.3620	1.495
	80	80S	Ref.	1.660	1.278	.191	2.996	.5553	.434	.3356	1.283
	160	...	...	1.660	1.160	.250	3.764	.4575	.434	.3029	1.057
	...	...	Doble Ref.	1.660	.896	.382	5.214	.2732	.434	.2331	.6305
1 1/2	...	10S	....	1.900	1.682	.109	2.085	.9630	.497	.4403	2.221
	40	40S	Est.	1.900	1.610	.145	2.717	.8820	.497	.4213	2.036
	80	80S	Ref.	1.900	1.500	.200	3.631	.7648	.497	.3927	1.767
	160	...	...	1.900	1.337	.281	4.862	.6082	.497	.3519	1.405
	...	...	Doble Ref.	1.900	1.100	.400	6.408	.4117	.497	.2903	.950
2	...	10S	....	2.375	2.157	.109	2.638	1.583	.622	.5647	3.654
	40	40S	Est.	2.375	2.067	.154	3.652	1.452	.622	.5401	3.355
	...	...	...	2.375	2.041	.167	3.938	1.420	.622	.5360	3.280

Figura. A2.22. Propiedades de los tubos. (1). (E. F. Megyesy, 1992)

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

<b>PROPIEDADES DE LOS TUBOS (cont.)</b>											
Tam. nominal del tubo	No. de cédula		Designación del peso	Diám. ext., pulg	Diám. int., pulg	Espesor de pared, pulg	Peso por pie, lb	Peso de agua por pie de tubo, lb	Superficie exterior por pie, pies <sup>2</sup>	Superficie interior por pie, pies <sup>2</sup>	Area transversal, pulg <sup>2</sup>
	Aceros al carbono y aleados	Aceros inoxidables									
<b>2</b> (Cont.)	...	...	...	2.375	2.000	.188	4.380	1.363	.622	.5237	3.142
	80	80S	Ref.	2.375	1.939	.218	5.022	1.279	.622	.5074	2.953
	...	...	...	2.375	1.875	.250	5.673	1.196	.622	.4920	2.761
	...	...	...	2.375	1.750	.312	6.883	1.041	.622	.4581	2.405
	160	...	...	2.375	1.689	.343	7.450	.767	.622	.4422	2.240
	...	...	Doble Ref.	2.375	1.503	.436	9.029	.769	.622	.3929	1.774
<b>2½</b>	...	10S	...	2.875	2.635	.120	3.53	2.360	.753	.6900	5.453
	40	40S	Est.	2.875	2.469	.203	5.79	2.072	.753	.6462	4.788
	...	...	...	2.875	2.441	.217	6.16	2.026	.753	.6381	4.680
	80	80S	Ref.	2.875	2.323	.276	7.66	1.834	.753	.6095	4.238
	160	...	...	2.875	2.125	.375	10.01	1.535	.753	.5564	3.547
	...	...	Doble Ref.	2.875	1.771	.552	13.69	1.067	.753	.4627	2.464
<b>3</b>	...	10S	...	3.500	3.260	.120	4.33	3.62	.916	.853	8.346
	...	...	...	3.500	3.250	.125	4.52	3.60	.916	.851	8.300
	...	...	...	3.500	3.204	.148	5.30	3.52	.916	.840	8.100
	...	...	...	3.500	3.124	.188	6.65	3.34	.916	.819	7.700
	40	40S	Est.	3.500	3.068	.216	7.57	3.20	.916	.802	7.393
	...	...	...	3.500	3.018	.241	8.39	3.10	.916	.790	7.155
	...	...	...	3.500	2.992	.254	8.80	3.06	.916	.785	7.050
	...	...	...	3.500	2.922	.289	9.91	2.91	.916	.765	6.700
	80	80S	Ref.	3.500	2.900	.300	10.25	2.86	.916	.761	6.605
	...	...	...	3.500	2.875	.312	10.64	2.81	.916	.753	6.492
	...	...	...	3.500	2.687	.406	13.42	2.46	.916	.704	5.673
	160	...	...	3.500	2.624	.438	14.32	2.34	.916	.687	5.407
...	...	Doble Ref.	3.500	2.300	.600	18.58	1.80	.916	.601	4.155	
<b>3½</b>	...	10S	...	4.000	3.760	.120	4.97	4.81	1.047	.984	11.10
	...	...	...	4.000	3.744	.128	5.38	4.78	1.047	.981	11.01
	...	...	...	4.000	3.732	.134	5.58	4.75	1.047	.978	10.95
	...	...	...	4.000	3.704	.148	6.26	4.66	1.047	.971	10.75
	...	...	...	4.000	3.624	.188	7.71	4.48	1.047	.950	10.32
	40	40S	Est.	4.000	3.548	.226	9.11	4.28	1.047	.929	9.89
	...	...	...	4.000	3.438	.281	11.17	4.02	1.047	.900	9.28
	80	80S	Ref.	4.000	3.364	.318	12.51	3.85	1.047	.880	8.89
	...	...	...	4.000	3.312	.344	13.42	3.73	1.047	.867	8.62
	...	...	...	4.000	3.062	.469	17.68	3.19	1.047	.802	7.37
	...	...	Doble Ref.	4.000	2.728	.636	22.85	2.53	1.047	.716	5.84
	<b>4</b>	...	10S	...	4.500	4.260	.120	5.61	6.18	1.178	1.115
...		...	...	4.500	4.244	.128	5.99	6.14	1.178	1.111	14.15
...		...	...	4.500	4.232	.134	6.26	6.11	1.178	1.110	14.10
...		...	...	4.500	4.216	.142	6.61	6.06	1.178	1.105	13.98
...		...	...	4.500	4.170	.165	7.64	5.92	1.178	1.093	13.67
...		...	...	4.500	4.124	.188	8.56	5.80	1.178	1.082	13.39

Figura. A2.23. Propiedades de los tubos. (2). (E. F. Megyesy, 1992)

PROPIEDADES DE LOS TUBOS (cont.)											
Tam. nominal del tubo	No. de cédula		Designación del peso	Diám. ext., pulg	Diám. int., pulg	Espesor de pared pulg	Peso por pie, lb	Peso de agua por pie de tubo, lb	Superficie exterior por pie, pies <sup>2</sup>	Superficie interior por pie, pies <sup>2</sup>	Area transversal, pulg <sup>2</sup>
	Aceros al carbono y aleados	Aceros inoxidables									
<b>4</b> (Cont.)	...	...	...	4.500	4.090	.205	9.39	5.71	1.178	1.071	13.15
	40	40S	Est.	4.500	4.026	.237	10.79	5.51	1.178	1.055	12.73
	...	...	...	4.500	4.000	.250	11.35	5.45	1.178	1.049	12.57
	...	...	...	4.500	3.958	.271	12.24	5.35	1.178	1.038	12.31
	...	...	...	4.500	3.938	.281	12.67	5.27	1.178	1.031	12.17
	...	...	...	4.500	3.900	.300	13.42	5.19	1.178	1.023	11.96
	...	...	...	4.500	3.876	.312	14.00	5.12	1.178	1.013	11.80
	80	80S	Ref.	4.500	3.826	.337	14.98	4.98	1.178	1.002	11.50
	...	...	...	4.500	3.750	.375	16.52	4.78	1.178	.982	11.04
	120	...	...	4.500	3.624	.438	19.00	4.47	1.178	.949	10.32
	...	...	...	4.500	3.500	.500	21.36	4.16	1.178	.916	9.62
	160	...	...	4.500	3.438	.531	22.60	4.02	1.178	.900	9.28
...	...	Doble Ref.	4.500	3.152	.674	27.54	3.38	1.178	.826	7.80	
<b>5</b>	...	10S	...	5.563	5.295	.134	7.770	9.54	1.456	1.386	22.02
	40	40S	Est.	5.563	5.047	.258	14.62	8.66	1.456	1.321	20.01
	...	...	...	5.563	4.859	.352	19.59	8.06	1.456	1.272	18.60
	80	80S	Ref.	5.563	4.813	.375	20.78	7.87	1.456	1.260	18.19
	...	...	...	5.563	4.688	.437	23.95	7.47	1.456	1.227	17.26
	120	...	...	5.563	4.563	.500	27.10	7.08	1.456	1.195	16.35
	160	...	...	5.563	4.313	.625	32.96	6.32	1.456	1.129	14.61
	...	...	Doble Ref.	5.563	4.063	.750	38.55	5.62	1.456	1.064	12.97
<b>6</b>	...	10S	...	6.625	6.357	.134	9.29	13.70	1.735	1.660	31.75
	...	...	...	6.625	6.287	.169	11.56	13.45	1.735	1.650	31.00
	...	...	...	6.625	6.265	.180	12.50	13.38	1.735	1.640	30.81
	...	...	...	6.625	6.249	.188	12.93	13.31	1.735	1.639	30.70
	...	...	...	6.625	6.187	.219	15.02	13.05	1.735	1.620	30.10
	...	...	...	6.625	6.125	.250	17.02	12.80	1.735	1.606	29.50
	...	...	...	6.625	6.071	.277	18.86	12.55	1.735	1.591	28.95
	40	40S	Est.	6.625	6.065	.280	18.97	12.51	1.735	1.587	28.99
	...	...	...	6.625	5.875	.375	25.10	11.75	1.735	1.540	27.10
	80	80S	Ref.	6.625	5.761	.432	28.57	11.29	1.735	1.510	26.07
	...	...	...	6.625	5.625	.500	32.79	10.85	1.735	1.475	24.85
	120	...	...	6.625	5.501	.562	36.40	10.30	1.735	1.470	23.77
160	...	...	6.625	5.189	.718	45.30	9.16	1.735	1.359	21.15	
...	...	Doble Ref.	6.625	4.897	.864	53.16	8.14	1.735	1.280	18.83	
<b>8</b>	...	10S	...	8.625	8.329	.148	13.40	23.6	2.26	2.180	54.5
	...	...	...	8.625	8.309	.158	14.26	23.6	2.26	2.178	54.3
	...	...	...	8.625	8.295	.165	14.91	23.5	2.26	2.175	54.1
	...	...	...	8.625	8.249	.188	16.90	23.2	2.26	2.161	53.5
	...	...	...	8.625	8.219	.203	18.30	23.1	2.26	2.152	53.1
	...	...	...	8.625	8.187	.219	19.64	22.9	2.26	2.148	52.7

Figura. A2.24. Propiedades de los tubos. (3). (E. F. Megyesy, 1992)

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

<b>PROPIEDADES DE LOS TUBOS (cont.)</b>											
Tam. nominal del tubo	No. de cédula		Designación del peso	Diám. ext., pulg	Diám. int., pulg	Espesor de pared pulg	Peso por pie, lb	Peso de agua por pie de tubo, lb	Superficie exterior por pie, pies <sup>2</sup>	Superficie interior por pie, pies <sup>2</sup>	Area transversal, pulg <sup>2</sup>
	Aceros al carbono y aleados	Aceros inoxidables									
<b>8</b> (Cont.)	...	...	...	8.625	8.149	.238	21.43	22.7	2.26	2.136	52.2
	20	...	...	8.625	8.125	.250	22.40	22.5	2.26	2.127	51.8
	30	...	...	8.625	8.071	.277	24.70	22.2	2.26	2.115	51.2
	40	40S	Est.	8.625	7.981	.322	28.55	21.6	2.26	2.090	50.0
	...	...	...	8.625	7.937	.344	30.40	21.4	2.26	2.078	49.5
	...	...	...	8.625	7.921	.352	31.00	21.3	2.26	2.072	49.3
	...	...	...	8.625	7.875	.375	33.10	21.1	2.26	2.062	48.7
	60	...	...	8.625	7.813	.406	35.70	20.8	2.26	2.045	47.9
	...	...	...	8.625	7.687	.469	40.83	20.1	2.26	2.013	46.4
	80	80S	Ref.	8.625	7.625	.500	43.39	19.8	2.26	2.006	45.6
	100	...	...	8.625	7.439	.593	50.90	18.8	2.26	1.947	43.5
	...	...	...	8.625	7.375	.625	53.40	18.5	2.26	1.931	42.7
	120	...	...	8.625	7.189	.718	60.70	17.6	2.26	1.882	40.6
	140	...	...	8.625	7.001	.812	67.80	16.7	2.26	1.833	38.5
	...	...	Doble Ref.	8.625	6.875	.875	72.42	16.1	2.26	1.800	37.1
160	...	...	8.625	6.813	.906	74.70	15.8	2.26	1.784	36.4	
<b>10</b>	...	10S	...	10.750	10.420	.165	18.65	36.9	2.81	2.73	85.3
	...	...	...	10.750	10.374	.188	21.12	36.7	2.81	2.72	84.5
	...	...	...	10.750	10.344	.203	22.86	36.5	2.81	2.71	84.0
	...	...	...	10.750	10.310	.219	24.60	36.2	2.81	2.70	83.4
	20	...	...	10.750	10.250	.250	28.03	35.9	2.81	2.68	82.6
	...	...	...	10.750	10.192	.279	31.20	35.3	2.81	2.66	81.6
	30	...	...	10.750	10.136	.307	34.24	35.0	2.81	2.65	80.7
	...	...	...	10.750	10.054	.348	38.66	34.4	2.81	2.64	79.3
	40	40S	Est.	10.750	10.020	.365	40.48	34.1	2.81	2.62	78.9
	...	...	...	10.750	9.960	.395	43.68	33.7	2.81	2.61	77.9
	60	80S	Ref.	10.750	9.750	.500	54.74	32.3	2.81	2.55	74.7
	...	...	...	10.750	9.687	.531	57.98	31.9	2.81	2.54	73.7
	80	...	...	10.750	9.564	.593	64.40	31.1	2.81	2.50	71.8
	100	...	...	10.750	9.314	.718	77.00	29.5	2.81	2.44	68.1
	...	...	...	10.750	9.250	.750	80.10	29.1	2.81	2.42	67.2
120	...	...	10.750	9.064	.843	89.20	27.9	2.81	2.37	64.5	
140	...	...	10.750	8.750	1.000	104.20	26.1	2.81	2.29	60.1	
...	...	...	10.750	8.625	1.063	109.90	25.3	2.81	2.26	58.4	
160	...	...	10.750	8.500	1.125	116.00	24.6	2.81	2.22	56.7	
<b>12</b>	...	10S	...	12.750	12.390	.180	24.16	52.2	3.34	3.24	120.6
	...	...	...	12.750	12.344	.203	27.2	52.0	3.34	3.23	119.9
	...	...	...	12.750	12.312	.219	29.3	51.7	3.34	3.22	119.1
	...	...	...	12.750	12.274	.238	31.8	51.5	3.34	3.22	118.5
	20	...	...	12.750	12.250	.250	33.4	51.3	3.34	3.12	118.0

Figura. A2.25. Propiedades de los tubos. (4). (E. F. Megyesy, 1992)

PROPIEDADES DE LOS TUBOS (cont.)											
Tam. nominal del tubo	No. de cédula		Designación del peso	Diám. ext., pulg	Diám. int., pulg	Espesor de pared pulg	Peso por pie, lb	Peso de agua por pie de tubo, lb	Superficie exterior por pie, pies <sup>2</sup>	Superficie interior por pie, pies <sup>2</sup>	Area transversal, pulg <sup>2</sup>
	Aceros al carbono y aleados	Aceros inoxidables									
<b>12</b> (Cont.)	...	...	...	12.750	12.192	.279	37.2	50.7	3.34	3.19	116.9
	...	...	...	12.750	12.150	.300	40.0	50.5	3.34	3.18	116.1
	30	...	...	12.750	12.090	.330	43.8	49.7	3.34	3.16	114.8
	...	...	...	12.750	12.062	.344	45.5	49.7	3.34	3.16	114.5
	...	40S	Est.	12.750	12.000	.375	49.6	48.9	3.34	3.14	113.1
	40	...	...	12.750	11.938	.406	53.6	48.5	3.34	3.13	111.9
	...	...	...	12.750	11.874	.438	57.5	48.2	3.34	3.11	111.0
	...	80S	Ref.	12.750	11.750	.500	65.4	46.9	3.34	3.08	108.4
	60	...	...	12.750	11.626	.562	73.2	46.0	3.34	3.04	106.2
	...	...	...	12.750	11.500	.625	80.9	44.9	3.34	3.01	103.8
	80	...	...	12.750	11.376	.687	88.6	44.0	3.34	2.98	101.6
	100	...	...	12.750	11.064	.843	108.0	41.6	3.34	2.90	96.1
	...	...	...	12.750	11.000	.875	110.9	41.1	3.34	2.88	95.0
	120	...	...	12.750	10.750	1.000	125.5	39.3	3.34	2.81	90.8
	140	...	...	12.750	10.500	1.125	140.0	37.5	3.34	2.75	86.6
	...	...	...	12.750	10.313	1.219	150.1	36.3	3.34	2.70	83.8
160	...	...	12.750	10.126	1.312	161.0	34.9	3.34	2.65	80.5	
<b>14</b>	...	...	...	14.000	13.624	.188	28	63.4	3.67	3.57	146.0
	...	...	...	14.000	13.560	.220	32	63.0	3.67	3.55	145.0
	...	...	...	14.000	13.524	.238	35	62.5	3.67	3.54	144.0
	10	...	...	14.000	13.500	.250	37	62.1	3.67	3.54	143.0
	20	...	...	14.000	13.375	.312	46	60.8	3.67	3.50	140.5
	30	...	Est.	14.000	13.250	.375	55	59.7	3.67	3.47	137.9
	...	...	...	14.000	13.188	.406	58	59.5	3.67	3.45	137.0
	...	...	...	14.000	13.124	.438	63	58.5	3.67	3.44	135.3
	...	...	...	14.000	13.062	.469	68	58.1	3.67	3.42	134.0
	...	...	Ref.	14.000	13.000	.500	72	57.4	3.67	3.40	132.7
	60	...	...	14.000	12.814	.593	85	55.9	3.67	3.35	129.0
	...	...	...	14.000	12.750	.625	89	55.3	3.67	3.34	127.7
	...	...	...	14.000	12.688	.656	94	54.7	3.67	3.32	126.4
	80	...	...	14.000	12.500	.750	107	51.2	3.67	3.27	122.7
	100	...	...	14.000	12.125	.937	131	50.0	3.67	3.17	115.5
	120	...	...	14.000	11.814	1.093	151	47.5	3.67	3.09	109.6
140	...	...	14.000	11.500	1.250	171	45.0	3.67	3.01	103.9	
...	...	...	14.000	11.313	1.344	182	43.5	3.67	2.96	100.5	
160	...	...	14.000	11.188	1.406	190	42.6	3.67	2.93	98.3	

Figura. A2.26. Propiedades de los tubos. (5). (E. F. Megyesy, 1992)

# Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

PROPIEDADES DE LOS TUBOS (cont.)											
Tam. nominal del tubo	No. de cédula		Designación del peso	Diám. ext., pulg	Diám. int., pulg	Espesor de pared, pulg	Peso por pie, lb	Peso de agua por pie de tubo, lb	Superficie exterior por pie, pies <sup>2</sup>	Superficie interior por pie, pies <sup>2</sup>	Area transversal, pulg <sup>2</sup>
	Aceros al carbono y aleados	Aceros inoxidables									
<b>16</b>	...	...	....	16.000	15.624	.188	32	83.3	4.20	4.09	192.0
	...	...	....	16.000	15.524	.238	40	82.5	4.20	4.06	190.0
	10	...	....	16.000	15.500	.250	42	82.1	4.20	4.06	189.0
	...	...	....	16.000	15.438	.281	47	81.2	4.20	4.04	187.0
	20	...	....	16.000	15.375	.312	52	80.1	4.20	4.03	185.6
	...	...	....	16.000	15.312	.344	57	80.0	4.20	4.01	184.1
	30	...	Est.	16.000	15.250	.375	63	79.1	4.20	4.00	182.6
	...	...	....	16.000	15.188	.406	68	78.6	4.20	3.98	181.0
	...	...	....	16.000	15.124	.438	73	78.2	4.20	3.96	180.0
	...	...	....	16.000	15.062	.469	78	77.5	4.20	3.94	178.5
	40	...	Ref.	16.000	15.000	.500	83	76.5	4.20	3.93	176.7
	...	...	....	16.000	14.938	.531	88	75.8	4.20	3.91	175.2
	60	...	....	16.000	14.688	.656	108	73.4	4.20	3.85	169.4
	...	...	....	16.000	14.625	.687	112	72.7	4.20	3.83	168.0
	...	...	....	16.000	14.500	.750	122	71.5	4.20	3.80	165.1
	80	...	....	16.000	14.314	.843	137	69.7	4.20	3.75	160.9
100	...	....	16.000	13.938	1.031	165	66.0	4.20	3.65	152.6	
120	...	....	16.000	13.564	1.218	193	62.6	4.20	3.55	144.5	
140	...	....	16.000	13.124	1.438	224	58.6	4.20	3.44	135.3	
...	...	....	16.000	13.000	1.500	232	57.4	4.20	3.40	132.7	
160	...	....	16.000	12.814	1.593	245	55.9	4.20	3.35	129.0	
<b>18</b>	10	...	....	18.000	17.500	.250	47	104.6	4.71	4.58	241.0
	20	...	....	18.000	17.375	.312	59	102.5	4.71	4.55	237.1
	...	...	Est.	18.000	17.250	.375	71	101.2	4.71	4.51	233.7
	30	...	....	18.000	17.124	.438	82	99.5	4.71	4.48	229.5
	...	...	Ref.	18.000	17.000	.500	93	98.2	4.71	4.45	227.0
	40	...	....	18.000	16.876	.562	105	97.2	4.71	4.42	224.0
	...	...	....	18.000	16.813	.594	110	96.1	4.71	4.40	222.0
	...	...	....	18.000	16.750	.625	116	95.8	4.71	4.39	220.5
	60	...	....	18.000	16.500	.750	138	92.5	4.71	4.32	213.8
	...	...	....	18.000	16.375	.812	149	91.2	4.71	4.29	210.6
	80	...	....	18.000	16.126	.937	171	88.5	4.71	4.22	204.2
	100	...	....	18.000	15.688	1.156	208	83.7	4.71	4.11	193.3
	120	...	....	18.000	15.250	1.375	244	79.2	4.71	3.99	182.7
	140	...	....	18.000	14.876	1.562	275	75.3	4.71	3.89	173.8
	...	...	....	18.000	14.625	1.687	294	72.7	4.71	3.83	168.0
	160	...	....	18.000	14.438	1.781	309	71.0	4.71	3.78	163.7

Figura. A2.27. Propiedades de los tubos. (6). (E. F. Megyesy, 1992)

PROPIEDADES DE LOS TUBOS (cont.)											
Tam. nominal del tubo	No. de cédula		Designación del peso	Diám. ext., pulg	Diám. int., pulg	Espesor de pared pulg	Peso por pie, lb	Peso de agua por pie de tubo, lb	Superficie exterior por pie, pies <sup>2</sup>	Superficie interior por pie, pies <sup>2</sup>	Area transversal, pulg <sup>2</sup>
	Aceros al carbono y aleados	Aceros inoxidables									
<b>20</b>	10	...	....	20.000	19.500	.250	53	130.0	5.24	5.11	299.0
	...	...	....	20.000	19.374	.313	66	128.1	5.24	5.08	295.0
	20	...	Est.	20.000	19.250	.375	79	126.0	5.24	5.04	291.1
	...	...	....	20.000	19.124	.438	92	125.1	5.24	5.01	288.0
	30	...	Ref.	20.000	19.000	.500	105	122.8	5.24	4.97	283.5
	...	...	....	20.000	18.875	.562	117	121.1	5.24	4.94	279.8
	40	...	....	20.000	18.814	.593	123	120.4	5.24	4.93	278.0
	...	...	....	20.000	18.750	.625	129	119.5	5.24	4.91	276.1
	60	...	....	20.000	18.376	.812	167	114.9	5.24	4.81	265.2
	...	...	....	20.000	18.250	.875	179	113.2	5.24	4.78	261.6
	...	...	....	20.000	18.188	.906	185	112.7	5.24	4.76	259.8
	80	...	....	20.000	17.938	1.031	209	109.4	5.24	4.80	252.7
	100	...	....	20.000	17.438	1.281	256	103.4	5.24	4.56	238.8
	120	...	....	20.000	17.000	1.500	297	98.3	5.24	4.45	227.0
140	...	....	20.000	16.500	1.750	342	92.6	5.24	4.32	213.8	
...	...	....	20.000	16.313	1.844	357	90.5	5.24	4.27	209.0	
160	...	....	20.000	16.064	1.968	379	87.9	5.24	4.21	202.7	
<b>22</b>	...	....	....	22.000	21.500	.250	58	157.4	5.76	5.63	363.1
	...	....	....	22.000	21.376	.312	72	155.6	5.76	5.60	358.9
	...	....	....	22.000	21.250	.375	87	153.7	5.76	5.56	354.7
	...	....	....	22.000	21.126	.437	103	152.0	5.76	5.53	350.5
	...	....	....	22.000	21.000	.500	115	150.2	5.76	5.50	346.4
	...	....	....	22.000	20.876	.562	129	148.4	5.76	5.47	342.3
	...	....	....	22.000	20.750	.625	143	146.6	5.76	5.43	338.2
	...	....	....	22.000	20.624	.688	157	144.8	5.76	5.40	334.1
	...	....	....	22.000	20.500	.750	170	143.1	5.76	5.37	330.1
	<b>24</b>	10	....	....	24.000	23.500	.250	63	189.0	6.28	6.15
...		....	....	24.000	23.376	.312	79	186.9	6.28	6.12	430.0
20		....	Est.	24.000	23.250	.375	95	183.8	6.28	6.09	424.6
...		....	....	24.000	23.125	.437	110	181.8	6.28	6.05	420.0
...		....	Ref.	24.000	23.000	.500	125	181.0	6.28	6.02	416.0
30		....	....	24.000	22.876	.562	141	178.5	6.28	5.99	411.0
...		....	....	24.000	22.750	.625	156	175.9	6.28	5.96	406.5
40		....	....	24.000	22.626	.687	171	174.2	6.28	5.92	402.1
...		....	....	24.000	22.500	.750	186	172.1	6.28	5.89	397.6
60		....	....	24.000	22.064	.968	238	165.8	6.28	5.78	382.3
...		....	....	24.000	21.938	1.031	253	163.6	6.28	5.74	378.0
80	....	....	24.000	21.564	1.218	297	158.2	6.28	5.65	365.2	
100	....	....	24.000	20.938	1.531	367	149.3	6.28	5.48	344.3	

Figura. A2.28. Propiedades de los tubos. (7). (E. F. Megyesy, 1992)

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

PROPIEDADES DE LOS TUBOS (cont.)											
Tam. nominal del tubo	No. de cédula		Designación del peso	Diám. ext., pulg	Diám. int., pulg	Espesor de pared pulg	Peso por pie, lb	Peso de agua por pie de tubo, lb	Superficie exterior por pie, pies <sup>2</sup>	Superficie interior por pie, pies <sup>2</sup>	Area transversal, pulg <sup>2</sup>
	Aceros al carbono y aleados	Aceros inoxidables									
<b>24</b> (Cont.)	120	.....	.....	24.000	20.376	1.812	429	141.4	6.28	5.33	326.1
	140	.....	.....	24.000	19.876	2.062	484	134.4	6.28	5.20	310.3
	.....	.....	.....	24.000	19.625	2.187	510	130.9	6.28	5.14	302.0
	160	.....	.....	24.000	19.314	2.343	542	127.0	6.28	5.06	293.1
<b>26</b>	.....	.....	.....	26.000	25.500	.250	67	221.4	6.81	6.68	510.7
	.....	.....	.....	26.000	25.376	.312	84	219.2	6.81	6.64	505.8
	.....	.....	.....	26.000	25.250	.375	103	217.1	6.81	6.61	500.7
	.....	.....	.....	26.000	25.126	.437	119	215.0	6.81	6.58	495.8
	.....	.....	.....	26.000	25.000	.500	136	212.8	6.81	6.54	490.9
	.....	.....	.....	26.000	24.876	.562	153	210.7	6.81	6.51	486.0
	.....	.....	.....	26.000	24.750	.625	169	208.6	6.81	6.48	481.1
	.....	.....	.....	26.000	24.624	.688	186	206.4	6.81	6.45	476.2
<b>30</b>	10	.....	.....	30.000	29.376	.312	99	293.7	7.85	7.69	677.8
	.....	.....	.....	30.000	29.250	.375	119	291.2	7.85	7.66	672.0
	.....	.....	.....	30.000	29.125	.437	138	288.7	7.85	7.62	666.2
	20	.....	.....	30.000	29.000	.500	158	286.2	7.85	7.59	660.5
	.....	.....	.....	30.000	28.875	.562	177	283.7	7.85	7.56	654.8
	30	.....	.....	30.000	28.750	.625	196	281.3	7.85	7.53	649.2

Figura. A2.29. Propiedades de los tubos. (8). (E. F. Megyesy, 1992)

---

## **Capítulo A2.C2. Resolución de “EXTRACTIVA 1”**

### **A2.C2.1. Introducción**

La unidad “EXTRACTIVA 1”, constituye la primera operación masiva de separación, (la unidad “SIMPLE” precedente permitió eliminar un primer componente minoritario), conducente a la purificación del componente de interés.

Se trata de una operación de destilación en columna de platos donde la alimentación, constituida por compuestos de similares propiedades químicas, se introduce mezclada con un agente extractante, que permite la escisión de los compuestos más pesados y solubles en el extractante, (entre los que se encuentra el componente de interés), de aquellos otros componentes que no solubilizan en el mencionado agente y vaporizan mayoritariamente recogiéndose como destilado de la operación. El extractante y los componentes solubilizados se recogen como residuo y se cargan a una nueva unidad de separación, denominada “EXTRACTIVA 2”, cuyo objeto se describe en el capítulo siguiente.

La Figura A2.30 muestra un esquema de la unidad descrita, donde las líneas en negrita identifican las corrientes portadoras del componente de interés. Se adelanta en el diagrama la disposición final de la torre, que, por los cálculos que se presentarán en el presente capítulo, requiere un número de platos elevado en tal cuantía que se requiere la segregación de la columna en tres unidades. La alimentación U, cuya información de composición y caudales por componentes y global se procura en el primer capítulo del anexo tercero; es una combinación de parte del vapor procedente de la operación “SIMPLE”, (corriente V, véase capítulo anterior), con una corriente de extractante. En operación estacionaria, se mezcla sólo parte de dicho vapor con otras corrientes excedentes del proceso, incluida la corriente de recuperación del extractante, en un proceso de recirculación, garante de la estabilidad en el tiempo de la composición de la alimentación de esta primera unidad de destilación.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

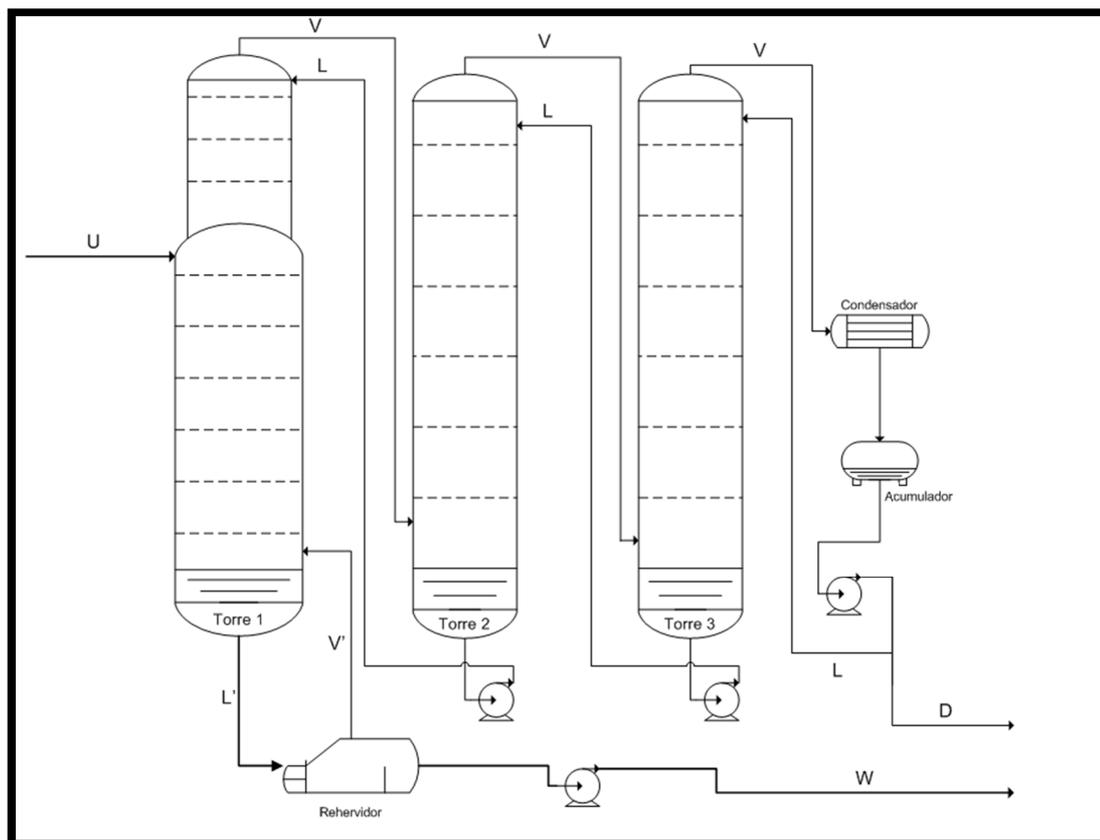


Figura. A2.30. Esquema de la unidad "EXTRACTIVA 1". (Elaboración propia)

Suponiendo despreciable la variación de los caudales del líquido y el vapor a su paso por platos, en el trasiego por las columnas, se definen los siguientes:  $L$ ,  $V$ ,  $L'$  y  $V'$ , esto es, caudal de líquido en columna, vapor en columna, combinado de líquido y alimentación y combinado de vapor y alimentación respectivamente.

Se empleará la misma nomenclatura en todas las columnas, por lo que cuando se mencione una corriente de las anteriores dentro de un capítulo, salvo indicación expresa en contrario, se hará referencia a las correspondientes a la unidad descrita por el capítulo en cuestión.

Puesto que las torres están interconectadas como si de una sola se tratase, puede observarse en la Figura A2.30, cómo los líquidos de fondo de las columnas 2 y 3 se introducen en el primer plato de

sus respectivas columnas precedentes, (se comienza la numeración de los platos desde el superior de columna) y, de la misma forma, los vapores de cabeza de las columnas 1 y 2 se introducen en el último plato de sus respectivas columnas subsecuentes. Esta interconexión es equivalente a una sola torre que contuviera todos los platos, que, por razones de construcción, resulta inviable.

Por su parte, el vapor de la última columna es la suma de la corriente de reflujo y la que se toma como destilado. Este vapor se condensa totalmente y previa separación, en base a los cálculos que se presentarán en el presente capítulo, se acumula en el depósito dispuesto al efecto que permite estabilizar el control de las variables de cabeza de columna, por actuación sobre el reflujo, manteniendo en todo caso el destilado estable. Disponer de un volumen de reserva en el acumulador asegura una operación estable ante excursiones de las variables respecto de sus puntos de consigna.

Asimismo, el líquido de fondo de la primera columna debe someterse a un último equilibrio externo a la columna, en el rehervidor, un cambiador de calor de carcasa y tubos debidamente concebido para permitir la vaporización de una corriente líquida. El vapor de equilibrio,  $V'$ , se retorna a columna en su último plato y el líquido se retira como residuo o cola de la operación.

Introducida la operación, el capítulo se invertirá en la resolución de la columna por el método de FUG, que permitirá justificar la decisión sobre el extractante empleado.

### **A2.C2.2. Resolución de columna**

Previamente a la aplicación del método FUG para la resolución de la columna, es preciso caracterizar las corrientes involucradas en la operación. De la operación "SIMPLE" se obtiene un vapor con las características indicadas en la siguiente tabla, reproducción de A2.XIV del capítulo primero del anexo presente:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Composición V					
$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_6$
0,440	0,262	0,158	0,091	0,039	0,009
$Q_{V,1}$	$Q_{V,2}$	$Q_{V,3}$	$Q_{V,4}$	$Q_{V,5}$	$Q_{V,6}$
5823,637	3467,477	2097,738	1206,451	515,288	123,151
<b>V (Mmol/año)</b>				<b>13233,7411</b>	

Tabla. A2.LXXXIV. Composición de la corriente de vapor de “SIMPLE”

Los componentes son los indicados en la Tabla A2.I del capítulo anterior, donde asimismo se indicaron las unidades de los caudales individuales por componente, coincidentes con las de la corriente global.

Dado que la composición en n-butano, (componente 6) es de un orden de magnitud inferior a la siguiente composición más baja, (del compuesto 5, iso-butano), se decide despreciar su contribución al resto del proceso. A este respecto, se divide el caudal molar de n-butano entre cuatro y se suma a cada uno de los componentes del 2 al 5, de modo que el caudal global permanezca inalterado. Puesto que el componente de interés es el número 1, (1,3-butadieno), se decide mantener la rigurosidad, en cuanto al caudal obtenido en la operación previa, y no se le suma parte del componente minoritario. Considerado esto y la introducción de un caudal de extractante en proporción aproximada de una a cuatro partes, (13/50), respecto el caudal global de la corriente de vapor, se obtiene la nueva corriente de carga a “EXTRACTIVA 1”:

Composición U					
$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_6$
0,349	0,210	0,128	0,074	0,033	0,206
$Q_{V,1}$	$Q_{V,2}$	$Q_{V,3}$	$Q_{V,4}$	$Q_{V,5}$	$Q_{V,6}$
5823,637	3498,264	2128,526	1237,238	546,075	3440,773
<b>U (Mmol/año)</b>				<b>16674,514</b>	

Tabla. A2.LXXXV. Composición de la alimentación de “EXTRACTIVA 1”

En este caso se sustituye el subíndice 6 por el extractante que deberá decidirse. Las composiciones se han recalculado dividiendo

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

los caudales molares individuales, (observadas las consideraciones mencionadas) por el caudal global de la corriente U, que resulta de sumar V de la Tabla A2.LXXXIV y 0,26 veces este valor, es decir, el caudal de extractante seleccionado. De nuevo, los caudales molares individuales se expresan en Mmol/año.

Puesto que las corrientes de destilado y residuo se balancearán en el anexo siguiente, (capítulo primero), se omite la reiteración del cálculo y se presenta el siguiente diagrama, a modo de resumen, de las tres principales corrientes de “EXTRACTIVA 1”:

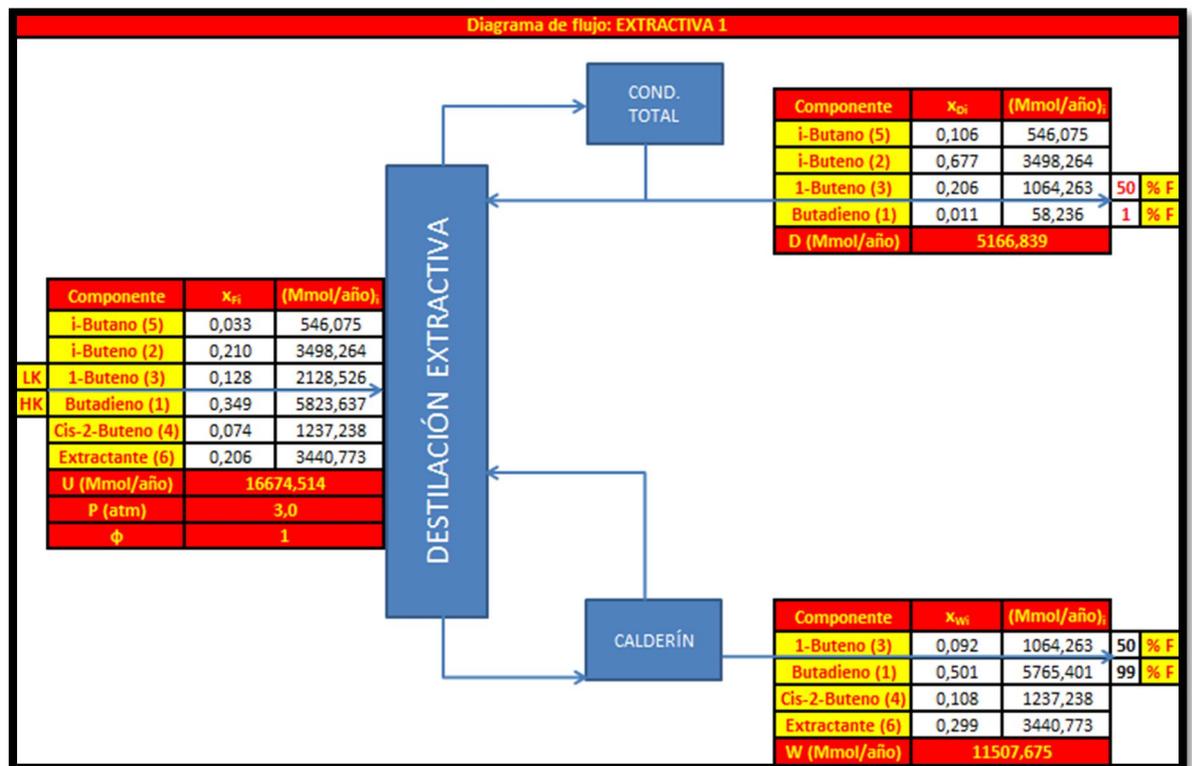


Figura. A2.31. Resumen de corrientes. (Elaboración propia)

Se incluye en la figura la descripción de las corrientes de alimentación, destilado y residuo, (U, D y W, respectivamente), en lo tocante a composición y caudales molares globales y por componente. También se participan otras informaciones como la presión de la operación, y la condición de alimentación, ( $\Phi = 1$ ), que indica alimentación líquida a su temperatura de ebullición. En cada corriente se ha

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

respetado la numeración proveniente de la operación "SIMPLE", no así la prelación de los componentes que, a la sazón, se ha reordenado en base a la volatilidad decreciente. Las flechas cortan las corrientes en función de los componentes clave, (LK y HK) y proporcionan una idea de la separación lograda en las corrientes de destilado y residuo. El tanto por ciento indicado junto a los componentes clave corresponde al caudal molar, de tales componentes en la alimentación, que pasa a cada corriente donde se indican.

Con lo anterior y los datos de equilibrio determinados en el anexo precedente se está en disposición de resolver el número de equilibrios requerido para la separación pretendida. Es de aplicación el método FUG de resolución rápida de columnas de platos en destilaciones multicomponente. Este método se basa en la solución de la ecuación de *Fenske*<sup>\*</sup>, para la obtención del número de platos en operación a reflujo total, esto es, el número mínimo de platos requerido para la separación perseguida; la ecuación de *Underwood*<sup>†</sup> para la estimación del reflujo mínimo consecuente y la correlación gráfica de *Gilliland*<sup>‡</sup> ajustada por *Molokanov*<sup>§</sup> que permite estimar el número de etapas ideales en función de los términos dilucidados por las dos primeras ecuaciones.

Las etapas ideales suponen que las corrientes de líquido y vapor experimentan la mayor separación posible, que corresponde a aquella situación en que tales corrientes abandonan la etapa en cuestión en estado de equilibrio termodinámico. Finalmente, dilucidado el número de etapas ideales, se puede estimar la posición del plato ideal de alimentación por aplicación de la ecuación de *Kirkbride*<sup>\*\*</sup>

\* Fractionation of straight-run Pennsylvania gasoline. *M. R. Fenske*. Ind. Eng. Chem. 24 (1932) 482.

† Fractional distillation of multicomponent mixtures-calculation of minimum reflux ratio. *A. J. V. Underwood*. J. Inst. Petroleum 32 (1946) 614.

‡ Multicomponent rectification. Estimation of the number of theoretical plates as a function of the reflux ratio. *E. R. Gilliland*. Ind. Eng. Chem. 32 (1940) 1220.

§ *Y. K. Molokanov, T. P. Korablina, N. I. Mazurina, G. A. Nikiforov*. Int. Chem. Eng. 12 (2), 209-212 (1972).

\*\* *C. G. Kirkbride*. Petroleum Refiner 23 (9), 87-102 (1944).

que, en función de datos termodinámicos y los caudales de destilado y residuo, permite determinar el número de platos ideales de rectificación y agotamiento, localizando indirectamente el plato de alimentación siendo éste el plato frontera entre ambas secciones de columna.

El método FUG es una aplicación abreviada para el cálculo de columnas de rectificación, extensamente recomendada por la bibliografía\*, en el dimensionado de torres nuevas, (no así para el estudio y optimización de torres existentes). Lo anterior sumado a la perspectiva de ingeniería básica que pretende cubrir el presente PFC, justifica convenientemente la elección del método FUG para la resolución de columnas multicomponente.

Se procede al cálculo del número de etapas a reflujo total, esto es, el número mínimo de etapas requerido para la operación de destilación objeto del capítulo en curso. Sea la ecuación de *Fenske*:

$$(A2.77) \left\{ \begin{array}{l} N_{\min} = \frac{\log^{\dagger} \left( \frac{x_D}{x_W} \right) \Big|_{LK} + \log \left( \frac{x_W}{x_D} \right) \Big|_{HK}}{\log \alpha_m} \text{ Ec. de Fenske (1)} \\ \alpha_m = \sqrt{(\alpha_{LK, HK}) \Big|_D \cdot (\alpha_{LK, HK}) \Big|_W} = \sqrt{\left( \frac{K_{LK}}{K_{HK}} \right) \Big|_D \cdot \left( \frac{K_{LK}}{K_{HK}} \right) \Big|_W} \text{ (2)} \\ (3) \left\{ \begin{array}{l} K_{LK} \Big|_D = (y^D/x_D) \Big|_{LK}; K_{LK} \Big|_W = (y^W/x_W) \Big|_{LK} \text{ (1)} \\ K_{HK} \Big|_D = (y^D/x_D) \Big|_{HK}; K_{HK} \Big|_W = (y^W/x_W) \Big|_{HK} \text{ (2)} \end{array} \right. \end{array} \right.$$

Donde  $N_{\min}$  es el número mínimo de platos,  $x_D$  y  $x_W$  son las composiciones del componente clave ligero (LK) o clave pesado (HK), según se indique, en el destilado y el residuo respectivamente;  $\alpha_m$  es la volatilidad relativa, promediada geométricamente, de las volatilidades relativas del componente clave ligero respecto al clave pesado en el destilado y el residuo (D y W respectivamente), según se

\* Consúltese la obra de autores como E. J. Henley y J. D. Seader, R. E. Treybal, G. Towler y R. Sinnott o H. Z. Kister entre otros.

† Entiéndase el logaritmo expresado como "log" en base 10. Los logaritmos neperianos se notan "ln" y cualquier logaritmo en base distinta a las anteriores vendrá debidamente indicada como subíndice.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

indique. Finalmente los coeficientes K se denominan de reparto y corresponden al cociente entre las composiciones de vapor y líquido en equilibrio de los componentes indicados (LK o HK) en las corrientes especificadas (D o W).

La elección de los componentes clave se efectúa en base al interés de separación. A la sazón, los compuestos más ligeros que el 1,3-butadieno son más parejos en cuanto a volatilidad que los que suceden a éste. Por esta razón, se fija el componente de interés en este caso como clave pesado, lo que fija el componente 1-buteno como clave ligero, por ser el siguiente componente más volátil.

Los coeficientes de reparto son directamente dependientes de los datos de equilibrio generados en el anexo anterior, mientras que las composiciones de los componentes clave en el destilado y el residuo han sido impuestas con arreglo a la separación precisada.

Las siguientes tablas recogen los datos requeridos para el cálculo del número mínimo de platos, así como la aplicación de la ecuación de *Fenske* a tal objeto:

<b>Ecuación de Fenske</b>					
<b>Extractante: NMP</b>					
$x_{D1}$	$x_{D2}$	$x_{D3}$	$x_{D4}$	$x_{D5}$	$x_{D6}$
0,011	0,677	0,206	0,000	0,106	0,000
$y_{D1}$	$y_{D2}$	$y_{D3}$	$y_{D4}$	$y_{D5}$	$y_{D6}$
0,012	0,668	0,201	0,000	0,120	0,000
$x_{W1}$	$x_{W2}$	$x_{W3}$	$x_{W4}$	$x_{W5}$	$x_{W6}$
0,501	0,000	0,092	0,108	0,000	0,299
$y_{W1}$	$y_{W2}$	$y_{W3}$	$y_{W4}$	$y_{W5}$	$y_{W6}$
0,715	0,000	0,153	0,133	0,000	0,000
	$K_{3D}$	0,974	$K_{1D}$	1,044	
	$K_{3W}$	1,650	$K_{1W}$	1,426	
	$\alpha_m$		1,039		
	$N_{\min}$		<b>121,055</b>		

Tabla. A2.LXXXVI. Ecuación de *Fenske* para el sistema con extractante NMP

Donde las composiciones de líquido del destilado y del residuo se han tomado de la Figura A2.31, (las referidas a los distintos componentes en las correspondientes corrientes de la operación “EXTRACTIVA 1”) y las composiciones de vapor son las obtenidas en equilibrio a la misma temperatura y presión de la operación, que se notaron en las tablas del anexo anterior A1.CXIII, para el sistema con extractante NMP, y A1.CXII, para el sistema con extractante furfural cuyos datos se tabulan en a continuación:

Ecuación de <i>Fenske</i>					
Extractante: Furfural					
$x_{D1}$	$x_{D2}$	$x_{D3}$	$x_{D4}$	$x_{D5}$	$x_{D6}$
0,011	0,677	0,206	0,000	0,106	0,000
$y_{D1}$	$y_{D2}$	$y_{D3}$	$y_{D4}$	$y_{D5}$	$y_{D6}$
0,012	0,668	0,201	0,000	0,120	0,000
$x_{W1}$	$x_{W2}$	$x_{W3}$	$x_{W4}$	$x_{W5}$	$x_{W6}$
0,501	0,000	0,092	0,108	0,000	0,299
$y_{W1}$	$y_{W2}$	$y_{W3}$	$y_{W4}$	$y_{W5}$	$y_{W6}$
0,711	0,000	0,154	0,134	0,000	0,001
	$K_3 _D$	0,974	$K_1 _D$	1,044	
	$K_3 _W$	1,667	$K_1 _W$	1,420	
		$\alpha_m$	1,047		
		$N_{min}$	100,917		

Tabla. A2.LXXXVII. Ecuación de *Fenske* para el sistema con extractante furfural

Puesto que el clave ligero es el componente 1-buteno, (subíndice 3) y el componente pesado es el 1,3-butadieno, (subíndice 1), los coeficientes de reparto se han calculado aplicando (A2.77.3) como sigue:

$$\begin{cases} K_{LK}|_D = K_3|_D = y_{D3}/x_{D3}; & K_{LK}|_W = K_3|_W = y_{W3}/x_{W3} \\ K_{HK}|_D = K_1|_D = y_{D1}/x_{D1}; & K_{HK}|_W = K_1|_W = y_{W1}/x_{W1} \end{cases}$$

Por su parte, el coeficiente de volatilidad promedio geométrico se calcula según (A2.77.2) particularizada a la sazón de la siguiente forma:

$$\alpha_m = \sqrt{\left(\frac{K_{LK}}{K_{HK}}\right)\bigg|_D \cdot \left(\frac{K_{LK}}{K_{HK}}\right)\bigg|_W} = \sqrt{\frac{K_3|_D}{K_1|_D} \cdot \frac{K_3|_W}{K_1|_W}}$$

La aplicación de la ecuación de *Fenske* proporciona el número mínimo de platos en base a los datos mostrados en las tablas A2.LXXXV y A2.LXXXVI. Su particularización al caso se expresa seguidamente:

$$N_{\min} = \frac{\log \frac{x_{D3}}{x_{W3}} + \log \frac{x_{W1}}{x_{D1}}}{\log \alpha_m}$$

Conocido el número mínimo de platos, es preciso dilucidar el reflujo mínimo a fin de determinar el número ideal de etapas requeridas para la separación planteada. Sea la ecuación de *Underwood*:

$$(A2.78) \left\{ \begin{array}{l} \sum_i \frac{(\alpha_{i,HK})|_F x_{Fi}}{(\alpha_{i,HK})|_F - \theta} = 1 - \phi \quad (1) \\ R_{D\min} = \sum_i \frac{(\alpha_{i,HK})|_F x_{Di}}{(\alpha_{i,HK})|_F - \theta} - 1 \quad (2) \end{array} \right\} \text{Ec. de Underwood}$$

Esta pareja de ecuaciones permite obtener, por resolución iterativa, el valor del reflujo externo mínimo, es decir, la relación de líquido retornado a columna, una vez condensado totalmente el vapor, frente al líquido tomado como destilado, esto es, L/D. *Underwood* propuso esta solución algebraica al problema del reflujo externo, para sistemas de múltiples componentes cuya destilación provoca escisión de componentes en destilado o residuo, como es el caso, donde los componentes no clave ligeros sólo aparecen en el destilado y los no clave pesados, sólo en el residuo. Este tipo de sistemas se denomina de tipo 2, confrontando con aquellos, denominados de tipo 1, en los que los múltiples componentes alimentados pasan, en mayor o menor proporción, a las corrientes de destilado y residuo.

La ecuación de *Underwood* parte de un balance de materia a las regiones de rectificación y agotamiento de columna, y procura una solución común a tales zonas: la raíz  $\theta$ . El procedimiento algebraico desarrollado por *Underwood* se basa en distintas hipótesis cuya demostración se omitirá por razones de brevedad. De este modo, será preciso hallar las volatilidades relativas de los distintos componentes involucrados en el proceso, respecto de un componente referencia que suele tomarse como el clave pesado. Estas volatilidades se notan en la expresión (A2.78) como  $\alpha_{i,HK}$ . El desarrollo de (A2.78.1), para el caso que atañe al capítulo presente, produce:

$$\frac{(\alpha_{1,1})|_F x_{F1}}{(\alpha_{1,1})|_F - \theta} + \frac{(\alpha_{2,1})|_F x_{F2}}{(\alpha_{2,1})|_F - \theta} + \frac{(\alpha_{3,1})|_F x_{F3}}{(\alpha_{3,1})|_F - \theta} + \frac{(\alpha_{4,1})|_F x_{F4}}{(\alpha_{4,1})|_F - \theta} + \frac{(\alpha_{5,1})|_F x_{F5}}{(\alpha_{5,1})|_F - \theta} + \frac{(\alpha_{6,1})|_F x_{F6}}{(\alpha_{6,1})|_F - \theta} = 0 \quad (A2.79)$$

Donde las volatilidades relativas se refieren a cada componente respecto del clave pesado, a la sazón, el 1,3-butadieno (subíndice 1). Las composiciones  $x_{Fi}$  corresponden a las de cada componente en la alimentación y se toman de la Tabla A2.LXXXV para cualquiera de los sistemas con extractante NMP o furfural. Por su parte, la condición de alimentación,  $\Phi$ , se ha sustituido por la unidad como corresponde a la alimentación introducida a su temperatura de ebullición.

Las volatilidades relativas se calculan según:

$$(\alpha_{i,HK})|_F \xrightarrow{HK \equiv 1} (\alpha_{i,1})|_F = \frac{(K_i)|_F}{(K_1)|_F} = \frac{y_{Fi}/x_{Fi}}{y_{F1}/x_{F1}}$$

Lo que requiere tomar las composiciones del vapor en equilibrio con el líquido de alimentación, tabuladas en A1.CXII y A1.CXIII para los sistemas furfural y NMP respectivamente. Con esto puede resolverse por tanteo la expresión (A2.79) y procurarse un valor de la raíz  $\theta$ , que deberá estar comprendido, por indicación de *Underwood* entre las volatilidades relativas más alta y más baja. Dado que existen dis-

tintas raíces conducentes a soluciones sin sentido físico del reflujo mínimo, (valores negativos o tendentes a infinito positivo o negativo), se emplea la herramienta de la hoja de cálculo *Excel* denominada *Solver*. Esta aplicación permite encontrar rápidamente un valor solución a una ecuación por resolución numérica. El procedimiento se detalla a continuación:

- Se introduce el miembro izquierdo de (A2.79) en una celda.
- Se activa la herramienta *Solver* y se define como celda objetivo la anterior, para un valor de 0, (es decir, el segundo miembro de la ecuación).
- La raíz se mostrará en aquella celda que se introduzca, dentro de la aplicación, en el apartado “Cambiando las celdas de variables”.
- Se deben introducir restricciones a la solución, a fin de obtener una raíz que procure una solución coherente. Para ello se agregan las condiciones de que la raíz, (la celda del guión anterior), no debe ser mayor que la más alta volatilidad relativa ni menor que la más baja, aún dentro de *Solver*.
- Finalmente, se pulsa “Resolver” y se obtiene la raíz.

Caso de no procurar una solución satisfactoria del reflujo mínimo, se fija el extremo menor en la siguiente volatilidad relativa y así sucesivamente.

El reflujo mínimo, una vez determinada la raíz de la primera ecuación de *Underwood*, debe obtenerse por desarrollo de la segunda:

$$R_{Dmin} = \frac{(\alpha_{1,1})|_F x_{D1}}{(\alpha_{1,1})|_F - \theta} + \frac{(\alpha_{2,1})|_F x_{D2}}{(\alpha_{2,1})|_F - \theta} + \frac{(\alpha_{3,1})|_F x_{D3}}{(\alpha_{3,1})|_F - \theta} + \frac{(\alpha_{4,1})|_F x_{D4}}{(\alpha_{4,1})|_F - \theta} + \frac{(\alpha_{5,1})|_F x_{D5}}{(\alpha_{5,1})|_F - \theta} + \frac{(\alpha_{6,1})|_F x_{D6}}{(\alpha_{6,1})|_F - \theta} - 1 \quad (A2.80)$$

Donde las volatilidades relativas son las ya aplicadas en la ecuación anterior, las composiciones  $x_{Di}$  corresponden a las de los componentes en el destilado y se toman de la Tabla A2.LXXXVI, (son indistintamente válidas para los sistemas con extractante NMP o furfural); y la raíz  $\theta$  es la recién obtenida mediante *Solver*.

Los resultados de aplicar el procedimiento descrito, para la obtención del reflujo mínimo, se tabulan seguidamente para el sistema con extractante NMP:

Ecuación de <i>Underwood</i>					
Extractante: NMP					
$x_{F1}$	$x_{F2}$	$x_{F3}$	$x_{F4}$	$x_{F5}$	$x_{F6}$
0,349	0,210	0,128	0,074	0,033	0,206
$y_{F1}$	$y_{F2}$	$y_{F3}$	$y_{F4}$	$y_{F5}$	$y_{F6}$
0,425	0,283	0,165	0,071	0,056	0,000
$K_{1F}$	$K_{2F}$	$K_{3F}$	$K_{4F}$	$K_{5F}$	$K_{6F}$
1,215	1,350	1,292	0,961	1,702	0,001
$\alpha_{11F}$	$\alpha_{21F}$	$\alpha_{31F}$	$\alpha_{41F}$	$\alpha_{51F}$	$\alpha_{61F}$
1,000	1,111	1,063	0,791	1,400	0,001
	$\sum_i$	$2,389 \cdot 10^{-7}$	$1 - \phi = 1 - 1 = 0$		
	$\theta$	0,809			
	$R_{Dmin}$	<b>2,663</b>			

Tabla. A2.LXXXVIII. Ec. de *Underwood* para el sistema con extractante NMP

Donde se han consignado las distintas variables requeridas: composición del líquido y el vapor en equilibrio de la alimentación, coeficientes de reparto y volatilidades relativas de cada componente respecto al clave pesado. La celda  $\sum_i$  presenta el valor del miembro izquierdo de (A2.79) cuando se le sustituye la raíz  $\theta$  encontrada por la herramienta *Solver*. Se le solicitó a la aplicación afinar la raíz para que el citado miembro se anulase y la respuesta del programa es una aproximación aceptable, ya que el residuo de  $\sum_i$  es suficientemente próximo a cero como para aceptar la raíz encontrada.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Operando con dicha raíz y el resto de datos de la Tabla A2.LXXXVIII en (A2.80) se ha obtenido  $R_{D\text{mín}}$ . Análogamente, para el sistema con extractante furfural, se obtiene:

Ecuación de <i>Underwood</i>					
Extractante: Furfural					
$x_{F1}$	$x_{F2}$	$x_{F3}$	$x_{F4}$	$x_{F5}$	$x_{F6}$
0,349	0,210	0,128	0,074	0,033	0,206
$y_{F1}$	$y_{F2}$	$y_{F3}$	$y_{F4}$	$y_{F5}$	$y_{F6}$
0,422	0,285	0,165	0,071	0,056	0,001
$K_{1F}$	$K_{2F}$	$K_{3F}$	$K_{4F}$	$K_{5F}$	$K_{6F}$
1,209	1,357	1,293	0,960	1,715	0,003
$\alpha_{11F}$	$\alpha_{21F}$	$\alpha_{31F}$	$\alpha_{41F}$	$\alpha_{51F}$	$\alpha_{61F}$
1,000	1,122	1,070	0,794	1,418	0,003
	$\Sigma_i$	$4,642 \cdot 10^{-7}$	$1 - \phi = 1 - 1 = 0$		
	$\theta$	0,813			
	$R_{D\text{mín}}$	2,619			

Tabla. A2.LXXXIX. Ec. de *Underwood* para el sistema con extractante furfural

De nuevo el residuo del ajuste,  $\Sigma_i$  es razonablemente similar a cero, por lo que la solución para el reflujo mínimo es aceptable.

El reflujo operativo suele oscilar 1,1 y 1,5 veces la relación mínima, según recomendaciones de los autores consultados y referenciados en el presente capítulo. Típicamente suele seleccionarse el valor intermedio de 1,3, si bien, en operaciones con número reducido de etapas, suele primarse el efecto beneficioso para la separación que supone aumentar el reflujo hasta el máximo de la recomendación. Análogamente suele seleccionarse el mínimo recomendado de la relación de reflujo cuando el número de etapas es elevado, primando en este caso el factor económico.

En el caso presente se evaluarán como alternativas de diseño el reflujo que excede 1,1 veces la relación mínima y aquél que la excede 1,3 veces. En el primer capítulo del siguiente anexo se efectuarán cálculos en base a estas dos alternativas y en el actual se indicará el número ideal de etapas para cada escenario de relación de re-

flujo. Sea la ecuación de *Molokanov*, ajuste de la correlación gráfica de *Gilliland*:

$$(A2.81) \begin{cases} \frac{N - N_{\min}}{N + 1} = 1 - e^{\left[\left(\frac{1+54,4X}{11+117,2X}\right)\left(\frac{X-1}{X^{0,5}}\right)\right]} & \text{Ec. de Molokanov (1)} \\ X = \frac{R_D - R_{D\min}}{R_D + 1} & (2) \end{cases}$$

Donde N es el número de platos teóricos reales y  $R_D$  la relación de reflujo externo elegida: 1,1 ó 1,3 veces la relación mínima. Despejando N de (A2.81) se obtiene:

$$N = \frac{N_{\min} + 1 - e^{\left[\left(\frac{1+54,4X}{11+117,2X}\right)\left(\frac{X-1}{X^{0,5}}\right)\right]}}{e^{\left[\left(\frac{1+54,4X}{11+117,2X}\right)\left(\frac{X-1}{X^{0,5}}\right)\right]}} \quad (A2.82)$$

Lo que produce, para los distintos sistemas con extractante NMP y furfural:

Ecuación de <i>Gilliland</i> : Ajuste de <i>Molokanov</i>					
Extractante: NMP					
$R_D (1,3R_{D\min})$	3,462	X	0,179	N	233,147

Tabla. A2.XC. Número de platos teóricos para el sistema con extractante NMP

Ecuación de <i>Gilliland</i> : Ajuste de <i>Molokanov</i>					
Extractante: Furfural					
$R_D (1,3R_{D\min})$	3,405	X	0,178	N	194,739

Tabla. A2.XCI. Número de platos teóricos para el sistema con extractante furfural

Donde se ha aplicado (A2.82) sobre el número mínimo de platos para cada sistema de extractantes, de las tablas A2.LXXXVI y A2.LXXXVII y las relaciones mínimas de reflujo para cada sistema de extractantes, tomadas de las tablas A2.LXXXVIII y A2.LXXXIX y las relaciones que las exceden 1,3 veces, tabuladas, para cada sistema de extractantes, en las tablas A2.XC y A2.XCI.

Este primer cálculo permite tomar una decisión en lo tocante a la decisión del extractante. Como puede comprobarse, el número de

platos teóricos para el sistema con extractante furfural es sensiblemente inferior al del sistema con NMP, lo que unido a una relación de reflujo mayor para éste último, (lo que conlleva unas dimensiones de columna más elevadas), permite decidir la operación con extractante furfural a igualdad de caudal requerido, que es independiente del agente seleccionado.

Por consiguiente, en adelante **sólo se practicarán cálculos en el supuesto de operación con agente furfural.**

Resta localizar el punto óptimo de inserción de la alimentación, lo que delimitará las zonas de rectificación y agotamiento de la columna. Sea la ecuación de *Kirkbride*:

$$\frac{N_R}{N_A} = \left[ \left( \frac{x_{F|HK}}{x_{F|LK}} \right) \left( \frac{x_{W|LK}}{x_{D|HK}} \right)^2 \left( \frac{W}{D} \right) \right]^{0,206} \quad \text{Ec. de Kirkbride (A2.83)}$$

Siendo  $N_R$  y  $N_A$  el número de platos teóricos para las zonas de rectificación y agotamiento respectivamente. Las composiciones se refieren al componente clave pesado o ligero, (subíndices HK y LK respectivamente), en el líquido correspondiente a la alimentación, residuo y destilado, (subíndices F, W y D respectivamente). Las corrientes W y D son, respectivamente, el destilado y el residuo, que deberán introducirse en las mismas unidades.

Considerando el número de platos teóricos N como la suma de platos de agotamiento  $N_A$  y de rectificación  $N_R$ , puede despejarse este último número, operando en (A2.83), como sigue y corresponde al sistema en estudio:

$$(A2.84) \left\{ \begin{array}{l} N = N_A + N_R \Rightarrow N_A = N - N_R \quad (1) \\ \frac{N_R}{N_A} = \frac{N_R}{N - N_R} = \left[ \left( \frac{x_{F1}}{x_{F3}} \right) \left( \frac{x_{W3}}{x_{D1}} \right)^2 \left( \frac{W}{D} \right) \right]^{0,206} \Rightarrow N_R = \frac{N \cdot \left[ \left( \frac{x_{F1}}{x_{F3}} \right) \left( \frac{x_{W3}}{x_{D1}} \right)^2 \left( \frac{W}{D} \right) \right]^{0,206}}{1 + \left[ \left( \frac{x_{F1}}{x_{F3}} \right) \left( \frac{x_{W3}}{x_{D1}} \right)^2 \left( \frac{W}{D} \right) \right]^{0,206}} \quad (2) \end{array} \right.$$

Por aplicación de (A2.84.2) sobre las composiciones consignadas en las tablas A2.LXXXVII y A2.LXXXIX, (pertenecientes al sistema con extractante furfural), las corrientes W y D tomadas de la Figura A2.31 y el número de platos teóricos de la Tabla A2.XCI; se obtiene el número teórico de platos de rectificación. Conocido éste, por diferencia se conoce el número de platos teóricos de agotamiento, según (A2.84.1). Se obtiene:

Ecuación de <i>Kirkbride</i> . ( $R_D=1,3R_{Dmin}$ )					
$N_R/N_A$	3,454	$N_R$	151,014	$N_A$	43,725

Tabla. A2.XCII. Número de platos teóricos por zona de columna

Para el caso de una relación de reflujo 1,1 veces superior a la mínima, debe recalcularse el número total de etapas teóricas, así como el reparto por zonas de rectificación y agotamiento, a fin de nutrir de datos al siguiente anexo de diseño hidráulico de columnas.

Aplicando nuevamente la ecuación de *Molokanov* sobre la relación de reflujo mínima y el número mínimo de platos, (para el sistema con extractante furfural, el agente escogido), datos consignados en las tablas A2.LXXXIX y A2.LXXXVII respectivamente, se obtiene:

Ecuación de <i>Gilliland</i> : Ajuste de <i>Molokanov</i>					
$R_D (1,1R_{Dmin})$	2,811	X	0,067	N	246,377

Tabla. A2.XCIII. Número de platos teóricos para  $R_D = 1,1R_{Dmin}$

Análogamente, la aplicación de la ecuación de *Kirkbride*, modificando únicamente el número de etapas teóricas al proporcionado por la tabla anterior, produce:

Ecuación de <i>Kirkbride</i> . ( $R_D=1,1R_{Dmin}$ )					
$N_R/N_A$	3,454	$N_R$	191,058	$N_A$	55,319

Tabla. A2.XCIV. Número de platos teóricos por zona de columna

Consecuentemente a la reducción de reflujo, la eficacia de separación global disminuye, lo que debe compensarse con un mayor número de etapas respecto al caso anterior, como se desprende del

último par de tablas. El estudio de las alternativas se evaluará cualitativamente en el anexo siguiente y se procurará una decisión en cuanto a la relación de reflujo final seleccionada.

Se cierra el capítulo haciendo referencia a las variables de diseño empleadas, sobre las que ha girado el cálculo y dimensionamiento de columna referido en el capítulo presente. Tales variables son la presión de operación, el contenido en agente extractante y los porcentajes de componentes clave ligero y pesado en destilado.

La presión de operación fija los datos de equilibrio, ya que, como se ha demostrado en el anexo previo, tal variable es introducida junto a las composiciones de líquido para obtener composiciones de vapor en equilibrio y la temperatura de los mismos. Una vez programada la hoja de cálculo, se vincularon todas las celdas referidas a la presión a una sola, que permitía comprobar la repercusión de los cambios sobre ésta en el dimensionado de columna.

Al modificar la presión, varían los datos de equilibrio y éstos fuerzan la reiteración del cálculo del número de etapas teóricas. Tras diversas pruebas se constata que la subida de presión eleva tanto la temperatura de operación de la columna como el número de etapas teóricas requeridas. El primer cambio halla explicación en la mecánica estadística de partículas. La temperatura es proporcional al promedio de la energía cinética de una distribución de partículas por la constante de *Boltzmann*, por lo que si un aumento de presión supone aumentar la probabilidad de colisiones por la reducción de volumen implícita; debe aumentar al tiempo tanto la energía cinética promedio como, por ende, la temperatura. El segundo cambio también se basa en la cinética de colisiones: el aumento de presión supone, como queda expresado, el alza de la probabilidad de colisión y de formación de enlaces estables en fase líquida. Por consiguiente, el sistema es menos volátil y la separación tanto más dificultosa.

La presión de 3 atm elegida es una solución de compromiso entre una temperatura no demasiado baja, por disminución de la presión y un número de platos no excesivo por aumento de ésta.

La proporción de agente extractante se escoge también como solución de compromiso. Se tiene que un caudal mayor de extractante solubiliza mayor cantidad de componentes alimentados, entre ellos el de interés y la separación es tanto más eficaz. Sin embargo, una operación con excesivo agente solvente encarece el gasto en materia prima, por lo que se logra la solución de mejor separación con mínimo gasto de solvente en una proporción de 13 partes de éste por cada 50 de la alimentación procedente de la operación "SIMPLE".

Los porcentajes de los componentes clave en el destilado fijan la participación de éstos en el residuo. Puesto que el componente de interés es el clave pesado, interesa optimizar la salida por colas de dicho componente. Por tal razón, su porcentaje en el destilado se minimiza hasta el 1%, a fin de desperdiciar la menor cantidad marcando una tónica para el resto de operaciones, puesto que cuanto mayor cantidad de componente de interés no puede ser purificada, tanto mayor es el gasto en alimentación bruta al proceso.

De la misma forma, interesa que el clave ligero aparezca en la menor cantidad posible en la corriente de residuo, particularmente en el caso de estudio, ya que, por coincidir el componente de interés con el clave pesado, la separación requerirá condiciones más severas y antieconómicas cuanto mayor composición en clave ligero contenga la corriente portadora del componente de interés, (ya que las volatilidades de los componentes clave son muy similares). En este caso, sólo puede garantizarse una separación que implique un número de etapas razonable cuando la mitad del clave ligero aparezca en el destilado.

La justificación de los valores de diseño fijados para el cálculo y resolución de "EXTRACTIVA 1" cierra el capítulo actual, en el que se

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

---

han proporcionado datos suficientes para el dimensionado de la columna requerida para la operación.

---

## **Capítulo A2.C3. Resolución de “EXTRACTIVA 2”**

### **A2.C3.1. Introducción**

La unidad “EXTRACTIVA 2”, constituye la segunda operación masiva de separación, (la unidad “SIMPLE” previa permitió eliminar un primer componente minoritario), conducente a la purificación del componente de interés.

Se trata de una operación de destilación en columna de platos donde la alimentación, constituida por compuestos de similares propiedades químicas, se introduce mezclada con un agente extractante, que permite la escisión de los compuestos más pesados y solubles en el extractante, de aquellos otros componentes que no solubilizan en el mencionado agente y vaporizan mayoritariamente reuniéndose como destilado de la operación. El extractante y los componentes solubilizados se recogen como residuo y se cargan a una unidad de separación, denominada “RECUPERACIÓN”, cuyo objeto se describe en el último capítulo del presente anexo. El destilado contiene en este caso el componente de interés, mezclado con dos componentes de similar naturaleza, que forzarán dos operaciones más de separación y purificación descritas en el siguiente y posterior capítulos: “MÚLTIPLE” y “BINARIA”. El destilado de “EXTRACTIVA 2”, la operación descrita en el presente capítulo, se carga íntegramente en la operación “MÚLTIPLE”.

La Figura A2.32 muestra un esquema de la unidad descrita, donde las líneas en negrita identifican las corrientes portadoras del componente de interés. Se adelanta en el diagrama la disposición final de la torre, que, por los cálculos que se presentarán en el presente capítulo, requiere un número de platos elevado en tal cuantía que se requiere la segregación de la columna en dos unidades. La alimentación W, procedente de la operación “EXTRACTIVA 1”, (resuelta en el capítulo previo), cuya composición y caudales por componentes y global se procura en el segundo capítulo del anexo tercero; es el residuo íntegro de la operación antedicha.

# Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

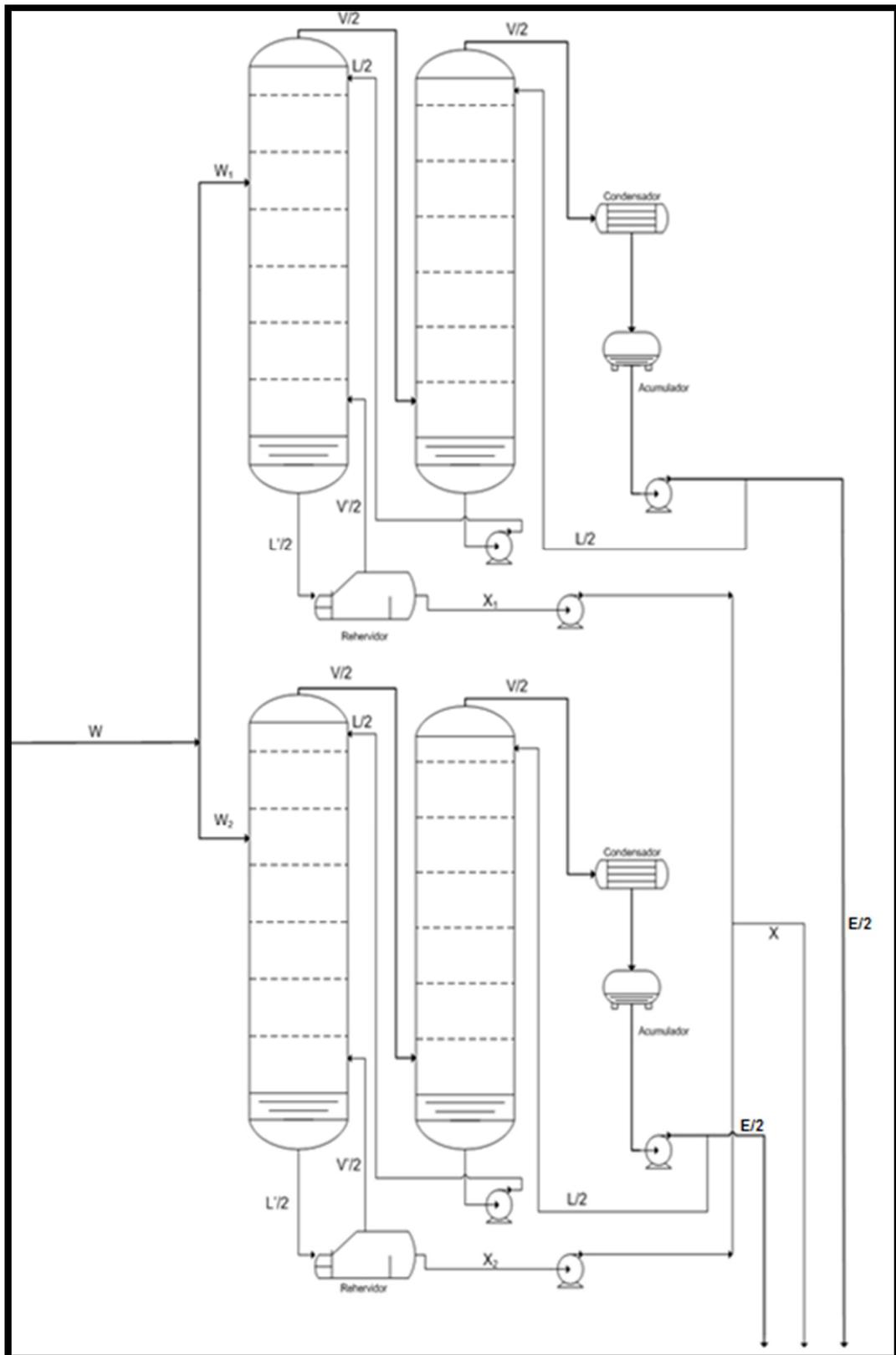


Figura. A2.32. Esquema de la unidad "EXTRACTIVA 2". (Elaboración propia)

El residuo,  $W$ , de “EXTRACTIVA 1” se ramifica en dos tramos que alimentan sendos trenes gemelos de dos columnas cada uno. La razón de tal disposición se justifica plenamente en el capítulo segundo del anexo tercero, que presenta el diseño hidráulico de “EXTRACTIVA 2”. La magnitud del caudal de la alimentación, a esta última operación, obliga a la segregación del flujo para su separación en dos trenes, a fin de reducir las dimensiones de la eventual columna diseñada en un solo tren.

Las corrientes de residuo,  $X_1$  y  $X_2$ , de cada tren se recogen en un solo ramal, corriente  $X$ , y se carga a la operación de “RECUPERACIÓN”, como se indicó anteriormente. Por su parte, las corrientes de destilado de cada tren se dirigen a la siguiente operación de separación denominada “MÚLTIPLE”. En este caso se prescinde del ramal colector, ya que dicha operación subsecuente presenta una disposición análoga en dos trenes de dos columnas, por lo que cada ramal de destilado se constituye en la alimentación de cada uno de tales trenes.

Suponiendo despreciable la variación de los caudales del líquido y el vapor a su paso por platos, en el trasiego por las columnas, se definen los siguientes:  $L/2$ ,  $V/2$ ,  $L'/2$  y  $V'/2$ , esto es, caudal de líquido en columna, vapor en columna, combinado de líquido y alimentación y combinado de vapor y alimentación respectivamente. Las corrientes se presentan en cada tren divididas por dos, puesto que la suma de tales corrientes correspondería a las corrientes de líquido y vapor circulantes por una columna alimentada íntegramente por  $W$ .

Puesto que las torres de cada tren están interconectadas como si de una sola se tratase, puede observarse en la Figura A2.32, cómo el líquido de fondo de la segunda columna se introduce en el primer plato de su columna precedente, (se comienza la numeración de los platos desde el superior de columna) y, de la misma forma, el vapor de cabeza de la primera columna se introduce en el último plato de su columna subsecuente. Esta interconexión es equivalente a una

sola torre que contuviera todos los platos, que, por razones de construcción, resulta inviable.

Por su parte, el vapor de la segunda columna es la suma de la corriente de reflujo y la que se toma como destilado. Este vapor se condensa totalmente y previa separación, en base a los cálculos que se presentarán en el presente capítulo, se acumula en el depósito dispuesto al efecto que permite estabilizar el control de las variables de cabeza de columna, por actuación sobre el reflujo, manteniendo en todo caso el destilado estable. Disponer de un volumen de reserva en el acumulador asegura una operación estable ante excursiones de las variables respecto de sus puntos de consigna. El destilado total de la operación es la suma de los caudales circulantes por cada uno de los ramales de destilado de cada uno de los trenes.

Asimismo, el líquido de fondo de la primera columna debe someterse a un último equilibrio externo a la columna, en el rehervidor, un cambiador de calor de carcasa y tubos debidamente concebido para permitir la vaporización de una corriente líquida. El vapor de equilibrio,  $V'/2$ , se retorna a columna en su último plato y el líquido,  $L'/2$ , se retira como residuo o cola de la operación. La suma de las dos corrientes de residuo de cada tren supone el residuo global de "EXTRACTIVA 2" y la alimentación a la operación "RECUPERACIÓN".

Introducida la operación, el capítulo se invertirá en la resolución de la columna por el método de FUG.

### **A2.C3.2. Resolución de columna**

Previamente a la aplicación del método FUG para la resolución de la columna, es preciso caracterizar, como en el capítulo anterior, las corrientes involucradas en la operación.

Puesto que las diversas corrientes de "EXTRACTIVA 2" se balancearán en el anexo siguiente, (capítulo segundo), se omite la reite-

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

ración del cálculo y se presenta el siguiente diagrama, a modo de resumen, de las tres principales corrientes de la operación:

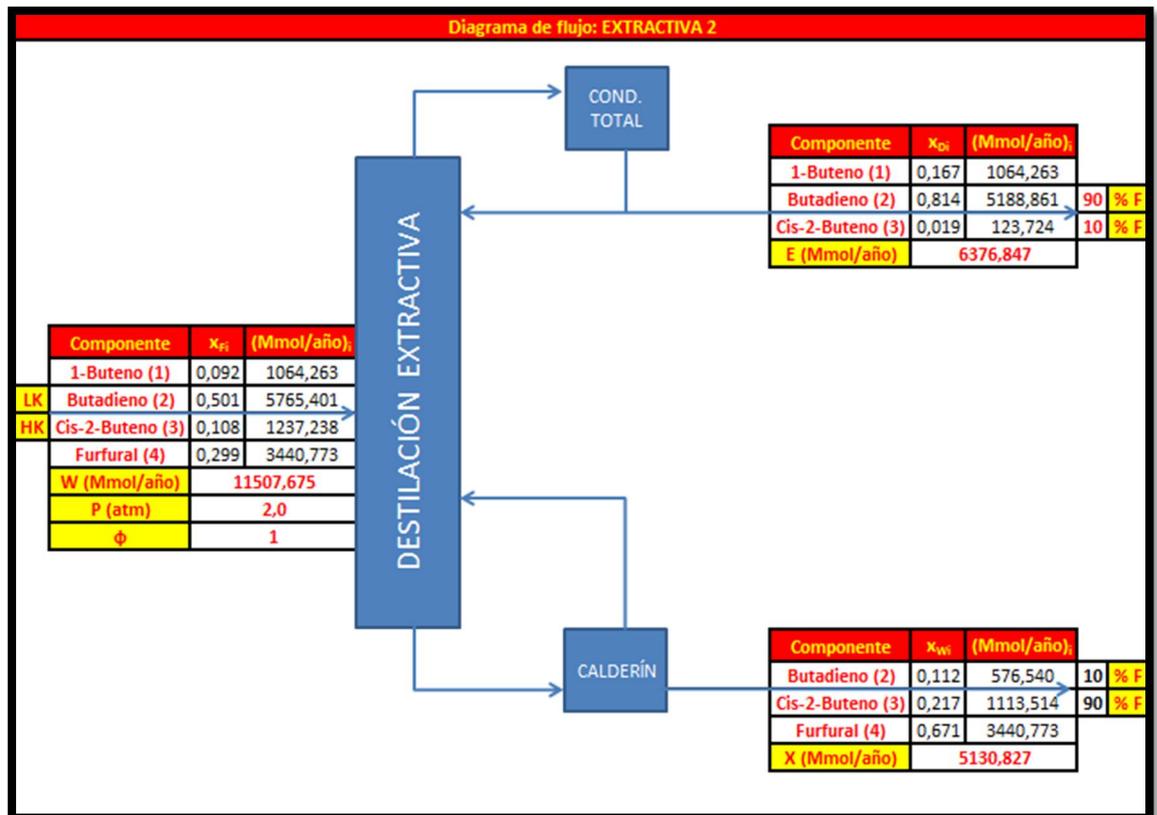


Figura. A2.33. Resumen de corrientes. (Elaboración propia)

Se incluye en la figura la descripción de las corrientes de alimentación, destilado y residuo, (W, E y X, respectivamente), en lo tocante a composición y caudales molares globales y por componente. También se participan otras informaciones como la presión de la operación, y la condición de alimentación, ( $\Phi = 1$ ), que indica alimentación líquida a su temperatura de ebullición. En cada corriente se ha modificado la numeración de los componentes proveniente de las operaciones previas "SIMPLE" y "EXTRACTIVA 1": se ha reordenado en base a la volatilidad decreciente. Las flechas cortan las corrientes en función de los componentes clave, (LK y HK) y proporcionan una idea de la separación lograda en las corrientes de destilado y residuo. El tanto por ciento indicado junto a los componentes clave co-

rresponde al caudal molar, de tales componentes en la alimentación, que pasa a cada corriente donde se indican.

En este caso, el componente clave pesado de la operación anterior pasa a ser clave ligero de la actual. Se trata del componente de interés, 1-3 butadieno, cuyo subíndice se ha modificado al número 2. El componente clave pesado es el cis-2-buteno, cuyo nuevo subíndice corresponde al 3. El objeto de la operación es separar el agente extractante de la corriente rica en componente de interés, procurando obtener la mejor escisión posible en tal corriente del clave pesado.

Con lo anterior y los datos de equilibrio determinados en el anexo precedente se está en disposición de resolver el número de equilibrios requerido para la separación pretendida. Es de aplicación el método FUG de resolución rápida de columnas de platos en destilaciones multicomponente. Este método se basa en la solución de la ecuación de *Fenske*<sup>\*</sup>, para la obtención del número de platos en operación a reflujo total, esto es, el número mínimo de platos requerido para la separación perseguida; la ecuación de *Underwood*<sup>†</sup> para la estimación del reflujo mínimo consecuente y la correlación gráfica de *Gilliland*<sup>‡</sup> ajustada por *Molokanov*<sup>§</sup> que permite estimar el número de etapas ideales en función de los términos dilucidados por las dos primeras ecuaciones.

Las etapas ideales suponen que las corrientes de líquido y vapor experimentan la mayor separación posible, que corresponde a aquella situación en que tales corrientes abandonan la etapa en cuestión en estado de equilibrio termodinámico. Finalmente, dilucidado el número de etapas ideales, se puede estimar la posición del pla-

\* Fractionation of straight-run Pennsylvania gasoline. *M. R. Fenske*. Ind. Eng. Chem. 24 (1932) 482.

† Fractional distillation of multicomponent mixtures-calculation of minimum reflux ratio. *A. J. V. Underwood*. J. Inst. Petroleum 32 (1946) 614.

‡ Multicomponent rectification. Estimation of the number of theoretical plates as a function of the reflux ratio. *E. R. Gilliland*. Ind. Eng. Chem. 32 (1940) 1220.

§ *Y. K. Molokanov, T. P. Korablina, N. I. Mazurina, G. A. Nikiforov*. Int. Chem. Eng. 12 (2), 209-212 (1972).

to ideal de alimentación por aplicación de la ecuación de *Kirkbride*<sup>\*</sup> que, en función de datos termodinámicos y los caudales de destilado y residuo, permite determinar el número de platos ideales de rectificación y agotamiento, localizando indirectamente el plato de alimentación siendo éste el plato frontera entre ambas secciones de columna.

El método FUG es una aplicación abreviada para el cálculo de columnas de rectificación, extensamente recomendada por la bibliografía<sup>†</sup>, en el dimensionado de torres nuevas, (no así para el estudio y optimización de torres existentes). Lo anterior sumado a la perspectiva de ingeniería básica que pretende cubrir el presente PFC, justifica convenientemente la elección del método FUG para la resolución de columnas multicomponente.

Se procede al cálculo del número de etapas a reflujo total, esto es, el número mínimo de etapas requerido para la operación de destilación objeto del capítulo en curso. Es de aplicación la ecuación de *Fenske* dada en el capítulo segundo del presente anexo, ecuación (A2.77). La siguiente tabla recoge los datos requeridos para el cálculo del número mínimo de platos, así como la aplicación de la ecuación de *Fenske* a tal objeto:

Ecuación de Fenske					
$x_{D1}$	$x_{D2}$	$x_{D3}$	$x_{D4}$		
0,167	0,814	0,019	0,000	$K_2 I_D$	0,983
$y_{D1}$	$y_{D2}$	$y_{D3}$	$y_{D4}$	$K_3 I_D$	0,793
0,184	0,800	0,015	0,000	$K_2 I_W$	3,087
$x_{W1}$	$x_{W2}$	$x_{W3}$	$x_{W4}$	$K_3 I_W$	3,002
0,000	0,112	0,217	0,671	$\alpha_m$	1,129
$y_{W1}$	$y_{W2}$	$y_{W3}$	$y_{W4}$	$N_{min}$	<b>36,234</b>
0,000	0,347	0,652	0,001		

Tabla. A2.XCV. Resolución de la ecuación de *Fenske*

<sup>\*</sup> C. G. Kirkbride. *Petroleum Refiner* 23 (9), 87-102 (1944).

<sup>†</sup> Consúltese la obra de autores como E. J. Henley y J. D. Seader, R. E. Treybal, G. Towler y R. Sinnott o H. Z. Kister entre otros.

Donde las composiciones de líquido del destilado y del residuo se han tomado de la Figura A2.33, (las referidas a los distintos componentes en las correspondientes corrientes de la operación “EXTRACTIVA 2”) y las composiciones de vapor son las obtenidas en equilibrio a la misma temperatura y presión de la operación, que se notaron en las tablas del anexo anterior A1.CLVI.

Puesto que el clave ligero es el componente 1,3-butadieno, (subíndice 2) y el componente pesado es el cis-2-buteno, (subíndice 3), los coeficientes de reparto se han calculado aplicando (A2.77.3) como sigue:

$$\begin{cases} K_{LK}|_D = K_2|_D = y_{D2}/x_{D2}; & K_{LK}|_W = K_2|_W = y_{W2}/x_{W2} \\ K_{HK}|_D = K_3|_D = y_{D3}/x_{D3}; & K_{HK}|_W = K_3|_W = y_{W3}/x_{W3} \end{cases}$$

Por su parte, el coeficiente de volatilidad promedio geométrico se calcula según (A2.77.2) particularizada a la sazón de la siguiente forma:

$$\alpha_m = \sqrt{\left(\frac{K_{LK}}{K_{HK}}\right)\Big|_D \cdot \left(\frac{K_{LK}}{K_{HK}}\right)\Big|_W} = \sqrt{\frac{K_2|_D}{K_3|_D} \cdot \frac{K_2|_W}{K_3|_W}}$$

La aplicación de la ecuación de *Fenske* proporciona el número mínimo de platos en base a los datos mostrados en la Tabla A2.XCV. Su particularización al caso se expresa seguidamente:

$$N_{\text{mín}} = \frac{\log \frac{x_{D2}}{x_{W2}} + \log \frac{x_{W3}}{x_{D3}}}{\log \alpha_m}$$

Conocido el número mínimo de platos, es preciso dilucidar el reflujo mínimo a fin de determinar el número ideal de etapas requeridas para la separación planteada. Es de aplicación la ecuación de *Underwood* dada en el capítulo segundo del presente anexo, ecuación (A2.78).

Esta pareja de ecuaciones permite obtener, por resolución iterativa, el valor del reflujo externo mínimo, es decir, la relación de líquido retornado a columna, una vez condensado totalmente el vapor, frente al líquido tomado como destilado, esto es,  $L/D$ . *Underwood* propuso esta solución algebraica al problema del reflujo externo, para sistemas de múltiples componentes cuya destilación provoca escisión de componentes en destilado o residuo, como es el caso, donde los componentes no clave ligeros sólo aparecen en el destilado y los no clave pesados, sólo en el residuo. Este tipo de sistemas se denomina de tipo 2, confrontando con aquellos, denominados de tipo 1, en los que los múltiples componentes alimentados pasan, en mayor o menor proporción, a las corrientes de destilado y residuo.

La ecuación de *Underwood* parte de un balance de materia a las regiones de rectificación y agotamiento de columna, y procura una solución común a tales zonas: la raíz  $\theta$ . El procedimiento algebraico desarrollado por *Underwood* se basa en distintas hipótesis cuya demostración se omitirá por razones de brevedad. De este modo, será preciso hallar las volatilidades relativas de los distintos componentes involucrados en el proceso, respecto de un componente referencia que suele tomarse como el clave pesado. Estas volatilidades se notan en la expresión (A2.78) como  $\alpha_{i,HK}$ . El desarrollo de (A2.78.1), para el caso que atañe al capítulo presente, produce:

$$\frac{(\alpha_{1,3})|_F x_{F1}}{(\alpha_{1,3})|_F - \theta} + \frac{(\alpha_{2,3})|_F x_{F2}}{(\alpha_{2,3})|_F - \theta} + \frac{(\alpha_{3,3})|_F x_{F3}}{(\alpha_{3,3})|_F - \theta} + \frac{(\alpha_{4,3})|_F x_{F4}}{(\alpha_{4,3})|_F - \theta} = 0 \quad (A2.85)$$

Donde las volatilidades relativas se refieren a cada componente respecto del clave pesado, a la sazón, el cis-2-buteno (subíndice 3). Las composiciones  $x_{Fi}$  corresponden a las de cada componente en la alimentación y se toman de la Figura A2.33. Por su parte, la condición de alimentación,  $\Phi$ , se ha sustituido por la unidad como corresponde a la alimentación introducida a su temperatura de ebullición.

Las volatilidades relativas se calculan según:

$$(\alpha_{i,HK})|_F \xrightarrow{HK \equiv 3} (\alpha_{i,3})|_F = \frac{(K_i)|_F}{(K_3)|_F} = \frac{y_{Fi}/x_{Fi}}{y_{F3}/x_{F3}}$$

Lo que requiere tomar las composiciones del vapor en equilibrio con el líquido de alimentación, tabuladas en A1.CLVI. Con esto puede resolverse por tanteo la expresión (A2.85) y procurarse un valor de la raíz  $\theta$ , que deberá estar comprendido, por indicación de *Underwood* entre las volatilidades relativas más alta y más baja. Dado que existen distintas raíces conducentes a soluciones sin sentido físico del reflujo mínimo, (valores negativos o tendentes a infinito positivo o negativo), se emplea la herramienta de la hoja de cálculo *Excel* denominada *Solver*. Esta aplicación permite encontrar rápidamente un valor solución a una ecuación por resolución numérica. El procedimiento se detalla a continuación:

- Se introduce el miembro izquierdo de (A2.85) en una celda.
- Se activa la herramienta *Solver* y se define como celda objetivo la anterior, para un valor de 0, (es decir, el segundo miembro de la ecuación).
- La raíz se mostrará en aquella celda que se introduzca, dentro de la aplicación, en el apartado "Cambiando las celdas de variables".
- Se deben introducir restricciones a la solución, a fin de obtener una raíz que procure una solución coherente. Para ello se agregan las condiciones de que la raíz, (la celda del guión anterior), no debe ser mayor que la más alta volatilidad relativa ni menor que la más baja, aún dentro de *Solver*.
- Finalmente, se pulsa "Resolver" y se obtiene la raíz.

Caso de no procurar una solución satisfactoria del reflujo mínimo, se fija el extremo menor en la siguiente volatilidad relativa y así sucesivamente.

El reflujo mínimo, una vez determinada la raíz de la primera ecuación de *Underwood*, debe obtenerse por desarrollo de la segunda:

$$R_{Dmin} = \frac{(\alpha_{1,3})|_F x_{D1}}{(\alpha_{1,3})|_F - \theta} + \frac{(\alpha_{2,3})|_F x_{D2}}{(\alpha_{2,3})|_F - \theta} + \frac{(\alpha_{3,3})|_F x_{D3}}{(\alpha_{3,3})|_F - \theta} + \frac{(\alpha_{4,3})|_F x_{D4}}{(\alpha_{4,3})|_F - \theta} - 1 \quad (A2.86)$$

Donde las volatilidades relativas son las ya aplicadas en la ecuación anterior, las composiciones  $x_{Di}$  corresponden a las de los componentes en el destilado y se toman de la Tabla A2.XCV y la raíz  $\theta$  es la recién obtenida mediante *Solver*.

Los resultados de aplicar el procedimiento descrito, para la obtención del reflujo mínimo, se tabulan seguidamente:

Ecuación de <i>Underwood</i>					
$x_{F1}$	$x_{F2}$	$x_{F3}$	$x_{F4}$		
0,092	0,501	0,108	0,299		
$y_{F1}$	$y_{F2}$	$y_{F3}$	$y_{F4}$	$\Sigma_i$	$1,853 \cdot 10^{-7}$
0,156	0,712	0,131	0,000	$1 - \phi = 1 - 1 = 0$	
$K_{1F}$	$K_{2F}$	$K_{3F}$	$K_{4F}$	$\theta$	1,024
1,687	1,421	1,221	0,001	$R_{Dmin}$	<b>5,567</b>
$\alpha_{13} _F$	$\alpha_{23} _F$	$\alpha_{33} _F$	$\alpha_{43} _F$		
1,382	1,164	1	0,001		

Tabla. A2.XCVI. Resolución de la ecuación de *Underwood*

Donde se han consignado las distintas variables requeridas: composición del líquido y el vapor en equilibrio de la alimentación, coeficientes de reparto y volatilidades relativas de cada componente respecto al clave pesado. La celda  $\Sigma_i$  presenta el valor del miembro izquierdo de (A2.85) cuando se le sustituye la raíz  $\theta$  encontrada por la herramienta *Solver*. Se le solicitó a la aplicación afinar la raíz para que el citado miembro se anulase y la respuesta del programa es una aproximación aceptable, ya que el residuo de  $\Sigma_i$  es suficientemente próximo a cero como para aceptar la raíz encontrada.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Operando con dicha raíz y el resto de datos de la Tabla A2.XCVI en (A2.86) se ha obtenido  $R_{D_{\min}}$ .

El reflujo operativo suele oscilar 1,1 y 1,5 veces la relación mínima, según recomendaciones de los autores consultados y referenciados en el presente capítulo. Típicamente suele seleccionarse el valor intermedio de 1,3, si bien, en operaciones con número reducido de etapas, suele primarse el efecto beneficioso para la separación que supone aumentar el reflujo hasta el máximo de la recomendación. Análogamente suele seleccionarse el mínimo recomendado de la relación de reflujo cuando el número de etapas es elevado, primando en este caso el factor económico.

En el caso presente y a diferencia del anterior, se evaluará únicamente como alternativa de diseño el reflujo que excede 1,1 veces la relación mínima, puesto que el valor de reflujo obtenido en este caso es bastante elevado, en comparación con el de la operación previa, y la reducción de dimensiones de la columna se practicará segregando la corriente de alimentación en dos trenes de separación. En el segundo capítulo del siguiente anexo se efectuarán los cálculos concernientes al diseño hidráulico y en el actual se indicará el número ideal de etapas. Sea la ecuación de *Molokanov*, ajuste de la correlación gráfica de *Gilliland*, dada en el capítulo segundo del anexo presente, ecuación (A2.81), que, despejada para el número de etapas teóricas proporciona la ecuación (A2.82) del mismo capítulo.

La aplicación de (A2.81.2) sobre la relación mínima de reflujo, tomada de la Tabla A2.XCVI y la relación que la excede 1,1 veces, tabulada en A2.XCVII; seguida de (A2.82) ejecutada sobre el número mínimo de platos, tomado de la Tabla A2.XCV, proporciona el siguiente número de platos teóricos.

Ecuación de <i>Gilliland</i> : Ajuste de <i>Molokanov</i>					
$R_D (1,1R_{D_{\min}})$	6,124	X	0,078	N	86,90

Tabla. A2.XCVII. Número de platos teóricos

Resta localizar el punto óptimo de inserción de la alimentación, lo que delimitará las zonas de rectificación y agotamiento de la columna. Es de aplicación la ecuación de *Kirkbride*, dada en el capítulo segundo del presente anexo, ecuación (A2.83).

Considerando el número de platos teóricos  $N$  como la suma de platos de agotamiento  $N_A$  y de rectificación  $N_R$ , puede despejarse este último número, operando en (A2.83), como sigue y corresponde al sistema en estudio:

$$(A2.87) \begin{cases} N = N_A + N_R \Rightarrow N_A = N - N_R \quad (1) \\ \frac{N_R}{N_A} = \frac{N_R}{N - N_R} = \left[ \frac{(x_{F3}) (x_{W2})^2 (X)}{(x_{F2}) (x_{D3})^2 (E)} \right]^{0,206} \Rightarrow N_R = \frac{N \cdot \left[ \frac{(x_{F3}) (x_{W2})^2 (X)}{(x_{F2}) (x_{D3})^2 (E)} \right]^{0,206}}{1 + \left[ \frac{(x_{F3}) (x_{W2})^2 (X)}{(x_{F2}) (x_{D3})^2 (E)} \right]^{0,206}} \quad (2) \end{cases}$$

Por aplicación de (A2.87.2) sobre las composiciones consignadas en las tablas A2.XCV y A2.XCVI, las corrientes  $X$  y  $E$  tomadas de la Figura A2.33 y el número de platos teóricos de la Tabla A2.XCVII; se obtiene el número teórico de platos de rectificación. Conocido éste, por diferencia se conoce el número de platos teóricos de agotamiento, según (A2.87.1). Se obtiene:

Ecuación de Kirkbride. ( $R_D=1,1R_{Dmin}$ )					
$N_R/N_A$	1,436	$N_R$	51,227	$N_A$	35,675

Tabla. A2.XCVIII. Número de platos teóricos por zona de columna

Se cierra el capítulo haciendo referencia a las variables de diseño empleadas, sobre las que ha girado el cálculo y dimensionamiento de columna referido en el capítulo presente. Tales variables son la presión de operación y los porcentajes de componentes clave ligero y pesado en destilado.

La presión de operación fija los datos de equilibrio, ya que, como se ha demostrado en el anexo previo, tal variable es introducida junto a las composiciones de líquido para obtener composiciones de vapor en equilibrio y la temperatura de los mismos. Una vez progra-

mada la hoja de cálculo, se vincularon todas las celdas referidas a la presión a una sola, que permitía comprobar la repercusión de los cambios sobre ésta en el dimensionado de columna.

Al modificar la presión, varían los datos de equilibrio y éstos fuerzan la reiteración del cálculo del número de etapas teóricas. Tras diversas pruebas se constata que la subida de presión eleva tanto la temperatura de operación de la columna como el número de etapas teóricas requeridas. El primer cambio halla explicación en la mecánica estadística de partículas. La temperatura es proporcional al promedio de la energía cinética de una distribución de partículas por la constante de *Boltzmann*, por lo que si un aumento de presión supone aumentar la probabilidad de colisiones por la reducción de volumen implícita; debe aumentar al tiempo tanto la energía cinética promedio como, por ende, la temperatura. El segundo cambio también se basa en la cinética de colisiones: el aumento de presión supone, como queda expresado, el alza de la probabilidad de colisión y de formación de enlaces estables en fase líquida. Por consiguiente, el sistema es menos volátil y la separación tanto más dificultosa.

La presión de 2 atm elegida es una solución de compromiso entre una temperatura no demasiado baja, por disminución de la presión y un número de platos no excesivo por aumento de ésta.

Los porcentajes de los componentes clave en el destilado fijan la participación de éstos en el residuo. Puesto que el componente de interés es el clave ligero, interesa optimizar la salida por cabeza de dicho componente. Por tal razón, su porcentaje en el destilado se maximiza hasta el 90%, a fin de desperdiciar la menor cantidad siguiendo la estrategia de separación marcada por la operación anterior, puesto que cuanto mayor cantidad de componente de interés no puede ser purificada, tanto mayor es el gasto en alimentación bruta al proceso.

De la misma forma, interesa que el clave pesado aparezca en la menor cantidad posible en la corriente de destilado a fin de procu-

rar unas condiciones, para la siguiente operación de separación, menos severas y antieconómicas: cuanto mayor composición en clave pesado contenga la corriente portadora del componente de interés, tanto mayor será el número de etapas requerido para eliminarlo en etapas subsecuentes. En este caso, ha podido minimizarse en gran cuantía la participación del clave pesado en el destilado, concretamente hasta el 10% del total alimentado. Si bien no se ha decidido efectuar la simplificación de desprestigiar su contenido frente a la corriente total, ya que ésta entra en su fase final de purificación. La siguiente operación, "MÚLTIPLE", elimina hasta la cuasi totalidad el contenido en cis-2-buteno del destilado de "EXTRACTIVA 2" y proporciona la corriente final que se purificará en una última operación de destilación binaria.

La justificación de los valores de diseño fijados para el cálculo y resolución de "EXTRACTIVA 2" cierra el capítulo actual, en el que se han proporcionado datos suficientes para el dimensionado de la columna requerida para la operación.



## **Capítulo A2.C4. Resolución de “MÚLTIPLE”**

### **A2.C4.1. Introducción**

La unidad “MÚLTIPLE”, constituye la primera operación de purificación, (la unidad “SIMPLE” previa permitió eliminar un primer componente minoritario y las operaciones “EXTRACTIVA 1” y “EXTRACTIVA 2”, separaron masivamente los componentes más alejados en volatilidad respecto del compuesto de interés), conducente a la eliminación de un nuevo componente minoritario de la corriente que contiene al componente de interés. La operación tiene por objeto proporcionar una corriente rica en dos componentes, fundamentalmente el 1,3-butadieno, que se purificará en una posterior y definitiva destilación binaria.

Se trata de una operación de destilación en columna de platos donde la alimentación, constituida por compuestos de similares propiedades químicas, se introduce separada del agente extractante, (lo que tuvo lugar en la previa “EXTRACTIVA 2”), que permite la eliminación del compuesto más pesado, del par de componentes que incluye el de interés. El componente pesado se recoge como residuo y constituye una corriente de producto terminado del proceso. El destilado contiene en este caso el componente de interés, mezclado con un componente de similar naturaleza, que forzará una última operación de purificación descrita en el siguiente capítulo: “BINARIA”. El destilado de “MÚLTIPLE”, la operación descrita en el presente capítulo, se carga íntegramente en la mencionada operación, objeto del capítulo siguiente.

La Figura A2.34 muestra un esquema de la unidad descrita, donde las líneas en negrita identifican las corrientes portadoras del componente de interés. Se adelanta en el diagrama la disposición final de la torre, que, por los cálculos que se presentarán en el presente capítulo, requiere un número de platos elevado en tal cuantía que se requiere la segregación de la columna en dos unidades. La alimentación E, procedente de la operación “EXTRACTIVA 2”, (re-

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

suelta en el capítulo previo), cuya composición y caudales por componentes y global se procura en el tercer capítulo del anexo tercero; es el destilado íntegro de la operación antedicha.

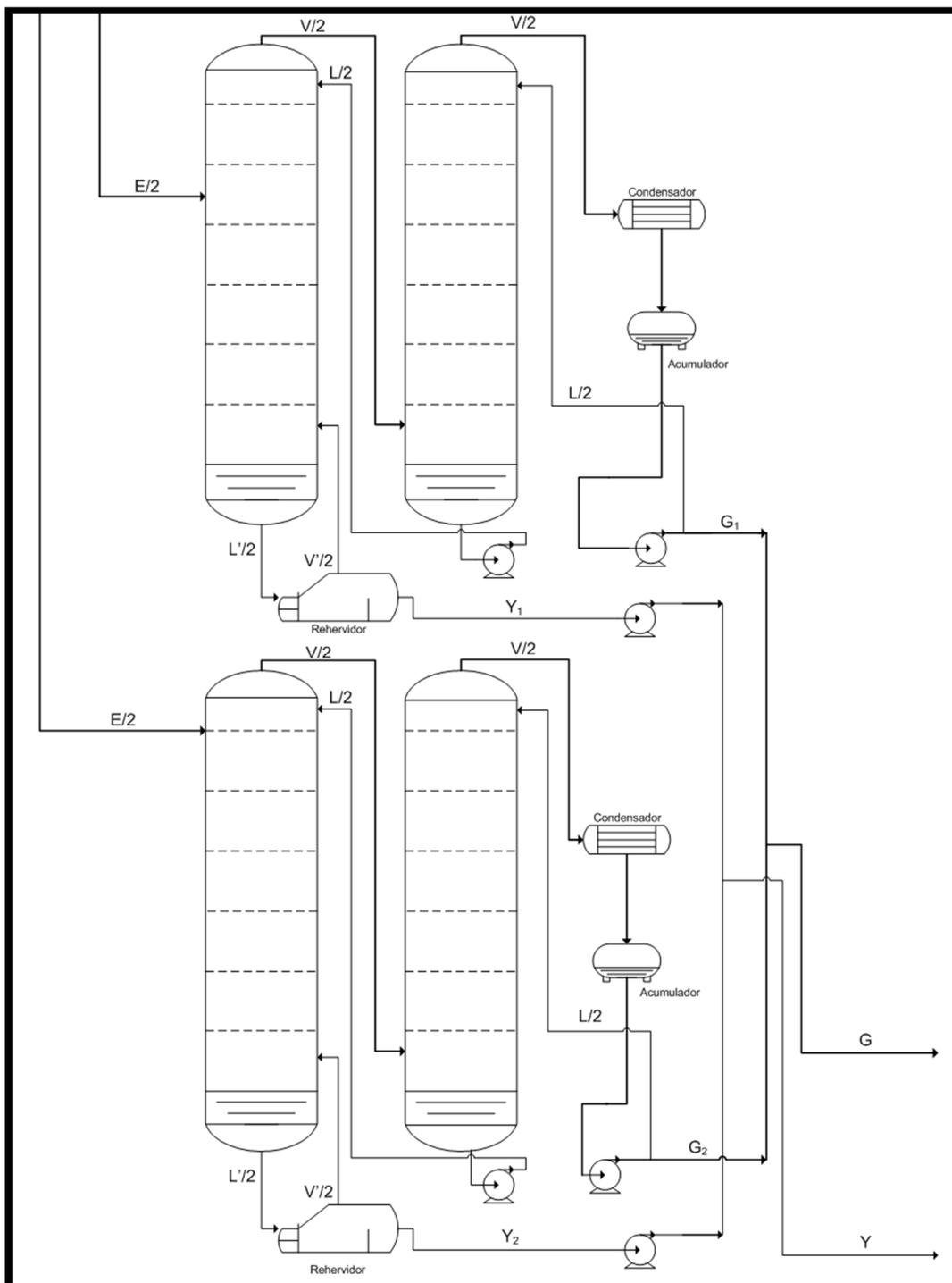


Figura. A2.34. Esquema de la unidad "MÚLTIPLE". (Elaboración propia)

El destilado, E, de “EXTRACTIVA 2” viene directamente ramificado: como se indicó en el capítulo previo, se prescindía del diseño de una conducción colectora del destilado, por introducirse este mitad y mitad en cada uno de los dos trenes de la operación en curso. La razón de la disposición mostrada en la Figura A2.34 se justifica plenamente en el capítulo tercero del anexo tercero, que presenta el diseño hidráulico de “MÚLTIPLE”. La magnitud del caudal de la alimentación, a esta última operación, obliga a la segregación del flujo para su separación en dos trenes, a fin de reducir las dimensiones de la eventual columna diseñada en un solo tren.

Las corrientes de residuo,  $Y_1$  e  $Y_2$ , de cada tren se recogen en un solo ramal, corriente Y, y se retira del proceso como corriente terminada de proceso, como se indicó *ut supra*. Por su parte, las corrientes de destilado de cada tren,  $G_1$  y  $G_2$ , se recogen en un solo ramal, corriente G, y se dirige a la siguiente operación de separación denominada “BINARIA”, donde el destilado G se constituye como la alimentación tripartita de dicha operación..

Suponiendo despreciable la variación de los caudales del líquido y el vapor a su paso por platos, en el trasiego por las columnas, se definen los siguientes:  $L/2$ ,  $V/2$ ,  $L'/2$  y  $V'/2$ , esto es, caudal de líquido en columna, vapor en columna, combinado de líquido y alimentación y combinado de vapor y alimentación respectivamente. Las corrientes se presentan en cada tren divididas por dos, puesto que la suma de tales corrientes correspondería a las corrientes de líquido y vapor circulantes por una columna alimentada íntegramente por E.

Puesto que las torres de cada tren están interconectadas como si de una sola se tratase, puede observarse en la Figura A2.34, cómo el líquido de fondo de la segunda columna se introduce en el primer plato de su columna precedente, (se comienza la numeración de los platos desde el superior de columna) y, de la misma forma, el vapor de cabeza de la primera columna se introduce en el último plato de su columna subsecuente. Esta interconexión es equivalente a una

sola torre que contuviera todos los platos, que, por razones de construcción, resulta inviable.

Por su parte, el vapor de la segunda columna es la suma de la corriente de reflujo y la que se toma como destilado. Este vapor se condensa totalmente y previa separación, en base a los cálculos que se presentarán en el presente capítulo, se acumula en el depósito dispuesto al efecto que permite estabilizar el control de las variables de cabeza de columna, por actuación sobre el reflujo, manteniendo en todo caso el destilado estable. Disponer de un volumen de reserva en el acumulador asegura una operación estable ante excursiones de las variables respecto de sus puntos de consigna. El destilado total de la operación es la suma de los caudales circulantes por cada uno de los ramales de destilado de cada uno de los trenes.

Asimismo, el líquido de fondo de la primera columna debe someterse a un último equilibrio externo a la columna, en el rehervidor, un cambiador de calor de carcasa y tubos debidamente concebido para permitir la vaporización de una corriente líquida. El vapor de equilibrio,  $V'/2$ , se retorna a columna en su último plato y el líquido,  $L'/2$ , se retira como residuo o cola de la operación. La suma de las dos corrientes de residuo de cada tren supone el residuo global de "MÚLTIPLE", una corriente terminada del proceso.

Introducida la operación, el capítulo se invertirá en la resolución de la columna por el método de FUG.

#### **A2.C4.2. Resolución de columna**

Previamente a la aplicación del método FUG para la resolución de la columna, es preciso caracterizar, como en el capítulo anterior, las corrientes involucradas en la operación.

Puesto que las diversas corrientes de "MÚLTIPLE" se balancearán en el anexo siguiente, (capítulo tercero), se omite la reitera-

ción del cálculo y se presenta el siguiente diagrama, a modo de resumen, de las tres principales corrientes de la operación:

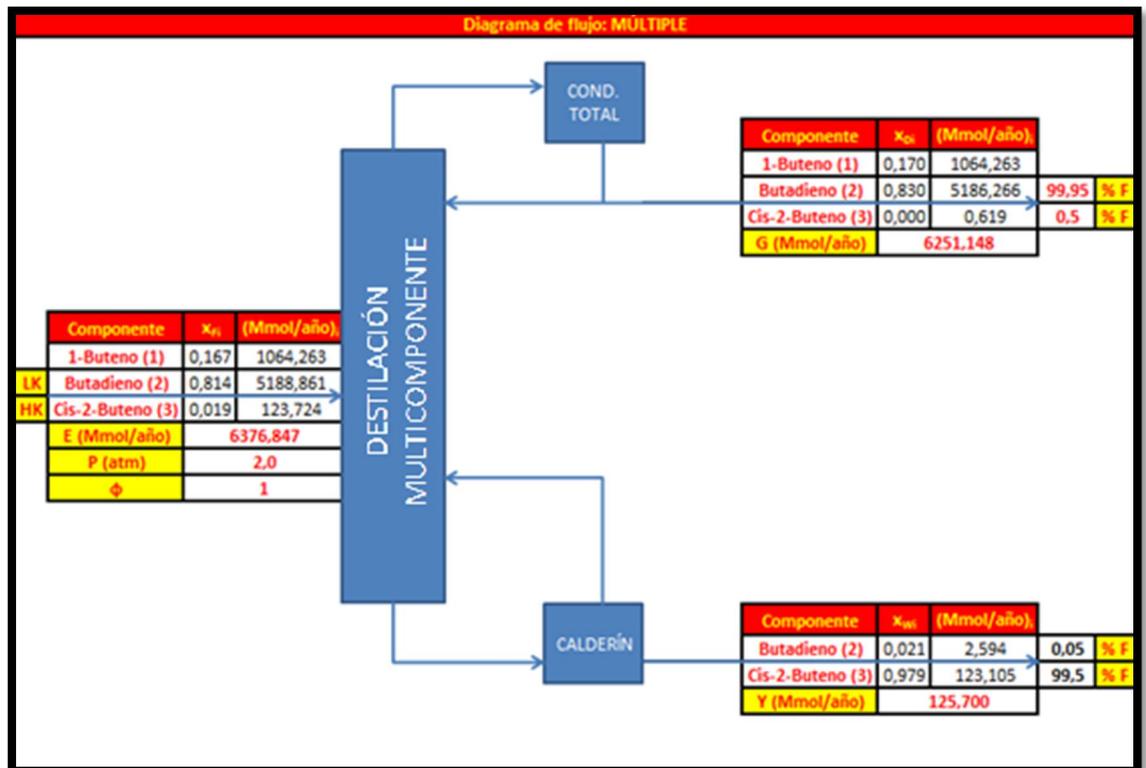


Figura. A2.35. Resumen de corrientes. (Elaboración propia)

Se incluye en la figura la descripción de las corrientes de alimentación, destilado y residuo, (E, G e Y, respectivamente), en lo tocante a composición y caudales molares globales y por componente. También se participan otras informaciones como la presión de la operación, y la condición de alimentación, ( $\Phi = 1$ ), que indica alimentación líquida a su temperatura de ebullición. En cada corriente se ha respetado la numeración de los componentes proveniente de la operación previa "EXTRACTIVA 2": el orden de los componentes se practica en base a la volatilidad decreciente. Las flechas cortan las corrientes en función de los componentes clave, (LK y HK) y proporcionan una idea de la separación lograda en las corrientes de destilado y residuo. El tanto por ciento indicado junto a los componentes clave corresponde al caudal molar, de tales componentes en la alimentación, que pasa a cada corriente donde se indican.

En este caso, el componente clave ligero de la operación anterior continúa siendo el clave ligero de la actual. Se trata del componente de interés, 1-3 butadieno, cuyo subíndice se ha mantenido con el número 2. El componente clave pesado es nuevamente el cis-2-buteno, cuyo nuevo subíndice corresponde al 3. El objeto de la operación es separar la pequeña cantidad de clave pesado de la corriente rica en componente de interés, procurando obtener una corriente lo más pura posible en los dos componentes, que se separarán en la siguiente y postrera operación del proceso diseñado.

Con lo anterior y los datos de equilibrio determinados en el anexo precedente se está en disposición de resolver el número de equilibrios requerido para la separación pretendida. Es de aplicación el método FUG de resolución rápida de columnas de platos en destilaciones multicomponente. Este método se basa en la solución de la ecuación de *Fenske*<sup>\*</sup>, para la obtención del número de platos en operación a reflujo total, esto es, el número mínimo de platos requerido para la separación perseguida; la ecuación de *Underwood*<sup>†</sup> para la estimación del reflujo mínimo consecuente y la correlación gráfica de *Gilliland*<sup>‡</sup> ajustada por *Molokanov*<sup>§</sup> que permite estimar el número de etapas ideales en función de los términos dilucidados por las dos primeras ecuaciones.

Las etapas ideales suponen que las corrientes de líquido y vapor experimentan la mayor separación posible, que corresponde a aquella situación en que tales corrientes abandonan la etapa en cuestión en estado de equilibrio termodinámico. Finalmente, dilucidado el número de etapas ideales, se puede estimar la posición del pla-

---

\* Fractionation of straight-run Pennsylvania gasoline. *M. R. Fenske*. Ind. Eng. Chem. 24 (1932) 482.

† Fractional distillation of multicomponent mixtures-calculation of minimum reflux ratio. *A. J. V. Underwood*. J. Inst. Petroleum 32 (1946) 614.

‡ Multicomponent rectification. Estimation of the number of theoretical plates as a function of the reflux ratio. *E. R. Gilliland*. Ind. Eng. Chem. 32 (1940) 1220.

§ *Y. K. Molokanov, T. P. Korablina, N. I. Mazurina, G. A. Nikiforov*. Int. Chem. Eng. 12 (2), 209-212 (1972).

to ideal de alimentación por aplicación de la ecuación de *Kirkbride*<sup>\*</sup> que, en función de datos termodinámicos y los caudales de destilado y residuo, permite determinar el número de platos ideales de rectificación y agotamiento, localizando indirectamente el plato de alimentación siendo éste el plato frontera entre ambas secciones de columna.

El método FUG es una aplicación abreviada para el cálculo de columnas de rectificación, extensamente recomendada por la bibliografía<sup>†</sup>, en el dimensionado de torres nuevas, (no así para el estudio y optimización de torres existentes). Lo anterior sumado a la perspectiva de ingeniería básica que pretende cubrir el presente PFC, justifica convenientemente la elección del método FUG para la resolución de columnas multicomponente.

Se procede al cálculo del número de etapas a reflujo total, esto es, el número mínimo de etapas requerido para la operación de destilación objeto del capítulo en curso. Es de aplicación la ecuación de *Fenske* dada en el capítulo segundo del presente anexo, ecuación (A2.77). La siguiente tabla recoge los datos requeridos para el cálculo del número mínimo de platos, así como la aplicación de la ecuación de *Fenske* a tal objeto:

Ecuación de <i>Fenske</i>				
$x_{D1}$	$x_{D2}$	$x_{D3}$		
0,170	0,830	0,000	$K_2 I_D$	0,979
$y_{D1}$	$y_{D2}$	$y_{D3}$	$K_3 I_D$	0,792
0,188	0,812	0,000	$K_2 I_W$	1,383
$x_{W1}$	$x_{W2}$	$x_{W3}$	$K_3 I_W$	0,992
0,000	0,021	0,979	$\alpha_m$	1,312
$y_{W1}$	$y_{W2}$	$y_{W3}$	$N_{min}$	<b>47,422</b>
0,000	0,029	0,971		

Tabla. A2.XCIX. Resolución de la ecuación de *Fenske*

\* C. G. *Kirkbride*. *Petroleum Refiner* 23 (9), 87-102 (1944).

† Consúltese la obra de autores como E. J. *Henley* y J. D. *Seader*, R. E. *Treybal*, G. *Towler* y R. *Sinnott* o H. Z. *Kister* entre otros.

Donde las composiciones de líquido del destilado y del residuo se han tomado de la Figura A2.35, (las referidas a los distintos componentes en las correspondientes corrientes de la operación “MÚLTIPLE”) y las composiciones de vapor son las obtenidas en equilibrio a la misma temperatura y presión de la operación, que se notaron en las tablas del anexo anterior A1.CXCIII.

Puesto que el clave ligero es el componente 1,3-butadieno, (subíndice 2) y el componente pesado es el cis-2-buteno, (subíndice 3), los coeficientes de reparto se han calculado aplicando (A2.77.3) como sigue:

$$\begin{cases} K_{LK}|_D = K_2|_D = y_{D2}/x_{D2}; & K_{LK}|_W = K_2|_W = y_{W2}/x_{W2} \\ K_{HK}|_D = K_3|_D = y_{D3}/x_{D3}; & K_{HK}|_W = K_3|_W = y_{W3}/x_{W3} \end{cases}$$

Por su parte, el coeficiente de volatilidad promedio geométrico se calcula según (A2.77.2) particularizada a la sazón de la siguiente forma:

$$\alpha_m = \sqrt{\left(\frac{K_{LK}}{K_{HK}}\right)|_D \cdot \left(\frac{K_{LK}}{K_{HK}}\right)|_W} = \sqrt{\frac{K_2|_D}{K_3|_D} \cdot \frac{K_2|_W}{K_3|_W}}$$

La aplicación de la ecuación de *Fenske* proporciona el número mínimo de platos en base a los datos mostrados en la Tabla A2.XCIX. Su particularización al caso se expresa seguidamente:

$$N_{\text{mín}} = \frac{\log \frac{x_{D2}}{x_{W2}} + \log \frac{x_{W3}}{x_{D3}}}{\log \alpha_m}$$

Conocido el número mínimo de platos, es preciso dilucidar el reflujo mínimo a fin de determinar el número ideal de etapas requeridas para la separación planteada. Es de aplicación la ecuación de *Underwood* dada en el capítulo segundo del presente anexo, ecuación (A2.78).

Esta pareja de ecuaciones permite obtener, por resolución iterativa, el valor del reflujo externo mínimo, es decir, la relación de líquido retornado a columna, una vez condensado totalmente el vapor, frente al líquido tomado como destilado, esto es,  $L/D$ . *Underwood* propuso esta solución algebraica al problema del reflujo externo, para sistemas de múltiples componentes cuya destilación provoca escisión de componentes en destilado o residuo, como es el caso, donde los componentes no clave ligeros sólo aparecen en el destilado y los no clave pesados, sólo en el residuo. Este tipo de sistemas se denomina de tipo 2, confrontando con aquellos, denominados de tipo 1, en los que los múltiples componentes alimentados pasan, en mayor o menor proporción, a las corrientes de destilado y residuo.

La ecuación de *Underwood* parte de un balance de materia a las regiones de rectificación y agotamiento de columna, y procura una solución común a tales zonas: la raíz  $\theta$ . El procedimiento algebraico desarrollado por *Underwood* se basa en distintas hipótesis cuya demostración se omitirá por razones de brevedad. De este modo, será preciso hallar las volatilidades relativas de los distintos componentes involucrados en el proceso, respecto de un componente referencia que suele tomarse como el clave pesado. Estas volatilidades se notan en la expresión (A2.78) como  $\alpha_{i,HK}$ . El desarrollo de (A2.78.1), para el caso que atañe al capítulo presente, produce:

$$\frac{(\alpha_{1,3})|_F x_{F1}}{(\alpha_{1,3})|_F - \theta} + \frac{(\alpha_{2,3})|_F x_{F2}}{(\alpha_{2,3})|_F - \theta} + \frac{(\alpha_{3,3})|_F x_{F3}}{(\alpha_{3,3})|_F - \theta} = 0 \quad (A2.88)$$

Donde las volatilidades relativas se refieren a cada componente respecto del clave pesado, a la sazón, el cis-2-buteno (subíndice 3). Las composiciones  $x_{Fi}$  corresponden a las de cada componente en la alimentación y se toman de la Figura A2.35. Por su parte, la condición de alimentación,  $\Phi$ , se ha sustituido por la unidad como corresponde a la alimentación introducida a su temperatura de ebullición.

Las volatilidades relativas se calculan según:

$$(\alpha_{i,HK})|_F \xrightarrow{HK \equiv 3} (\alpha_{i,3})|_F = \frac{(K_i)|_F}{(K_3)|_F} = \frac{y_{Fi}/x_{Fi}}{y_{F3}/x_{F3}}$$

Lo que requiere tomar las composiciones del vapor en equilibrio con el líquido de alimentación, tabuladas en A1.CXCIII. Con esto puede resolverse por tanteo la expresión (A2.88) y procurarse un valor de la raíz  $\theta$ , que deberá estar comprendido, por indicación de *Underwood* entre las volatilidades relativas más alta y más baja. Dado que existen distintas raíces conducentes a soluciones sin sentido físico del reflujo mínimo, (valores negativos o tendentes a infinito positivo o negativo), se emplea la herramienta de la hoja de cálculo *Excel* denominada *Solver*. Esta aplicación permite encontrar rápidamente un valor solución a una ecuación por resolución numérica. El procedimiento se detalla a continuación:

- Se introduce el miembro izquierdo de (A2.88) en una celda.
- Se activa la herramienta *Solver* y se define como celda objetivo la anterior, para un valor de 0, (es decir, el segundo miembro de la ecuación).
- La raíz se mostrará en aquella celda que se introduzca, dentro de la aplicación, en el apartado "Cambiando las celdas de variables".
- Se deben introducir restricciones a la solución, a fin de obtener una raíz que procure una solución coherente. Para ello se agregan las condiciones de que la raíz, (la celda del guión anterior), no debe ser mayor que la más alta volatilidad relativa ni menor que la más baja, aún dentro de *Solver*.
- Finalmente, se pulsa "Resolver" y se obtiene la raíz.

Caso de no procurar una solución satisfactoria del reflujo mínimo, se fija el extremo menor en la siguiente volatilidad relativa y así sucesivamente.

El reflujo mínimo, una vez determinada la raíz de la primera ecuación de *Underwood*, debe obtenerse por desarrollo de la segunda:

$$R_{D\text{mín}} = \frac{(\alpha_{1,3})|_F x_{D1}}{(\alpha_{1,3})|_F - \theta} + \frac{(\alpha_{2,3})|_F x_{D2}}{(\alpha_{2,3})|_F - \theta} + \frac{(\alpha_{3,3})|_F x_{D3}}{(\alpha_{3,3})|_F - \theta} - 1 \quad (A2.89)$$

Donde las volatilidades relativas son las ya aplicadas en la ecuación anterior, las composiciones  $x_{Di}$  corresponden a las de los componentes en el destilado y se toman de la Tabla A2.XCIX y la raíz  $\theta$  es la recién obtenida mediante *Solver*.

Los resultados de aplicar el procedimiento descrito, para la obtención del reflujo mínimo, se tabulan seguidamente:

Ecuación de <i>Underwood</i>				
$x_{F1}$	$x_{F2}$	$x_{F3}$		
0,167	0,814	0,019		
$y_{F1}$	$y_{F2}$	$y_{F3}$	$\Sigma_i$	$7,656 \cdot 10^{-7}$
0,184	0,800	0,015	$1 - \phi = 1 - 1 = 0$	
$K_{1F}$	$K_{2F}$	$K_{3F}$	$\theta$	1,004
1,104	0,983	0,793	$R_{D\text{mín}}$	<b>3,952</b>
$\alpha_{13F}$	$\alpha_{23F}$	$\alpha_{33F}$		
1,392	1,239	1		

Tabla. A2.C. Resolución de la ecuación de *Underwood*

Donde se han consignado las distintas variables requeridas: composición del líquido y el vapor en equilibrio de la alimentación, coeficientes de reparto y volatilidades relativas de cada componente respecto al clave pesado. La celda  $\Sigma_i$  presenta el valor del miembro izquierdo de (A2.88) cuando se le sustituye la raíz  $\theta$  encontrada por la herramienta *Solver*. Se le solicitó a la aplicación afinar la raíz para que el citado miembro se anulase y la respuesta del programa es una aproximación aceptable, ya que el residuo de  $\Sigma_i$  es suficientemente próximo a cero como para aceptar la raíz encontrada.

Operando con dicha raíz y el resto de datos de la Tabla A2.XCVI en (A2.89) se ha obtenido  $R_{Dmin}$ .

El reflujo operativo suele oscilar 1,1 y 1,5 veces la relación mínima, según recomendaciones de los autores consultados y referenciados en el presente capítulo. Típicamente suele seleccionarse el valor intermedio de 1,3, si bien, en operaciones con número reducido de etapas, suele primarse el efecto beneficioso para la separación que supone aumentar el reflujo hasta el máximo de la recomendación. Análogamente suele seleccionarse el mínimo recomendado de la relación de reflujo cuando el número de etapas es elevado, primando en este caso el factor económico.

En el caso presente y a diferencia del anterior, se evaluará únicamente como alternativa de diseño el reflujo que excede 1,1 veces la relación mínima, puesto que el valor de reflujo obtenido en este caso es bastante elevado, en comparación con el de la operación previa, y la reducción de dimensiones de la columna se practicará segregando la corriente de alimentación en dos trenes de separación. En el tercer capítulo del siguiente anexo se efectuarán los cálculos concernientes al diseño hidráulico y en el actual se indicará el número ideal de etapas. Sea la ecuación de *Molokanov*, ajuste de la correlación gráfica de *Gilliland*, dada en el capítulo segundo del anexo presente, ecuación (A2.81), que, despejada para el número de etapas teóricas proporciona la ecuación (A2.82) del mismo capítulo.

La aplicación de (A2.81.2) sobre la relación mínima de reflujo, tomada de la Tabla A2.C y la relación que la excede 1,1 veces, tabulada en A2.CI; seguida de (A2.82) ejecutada sobre el número mínimo de platos, tomado de la Tabla A2.XCIX, proporciona el siguiente número de platos teóricos.

Ecuación de <i>Gilliland</i> : Ajuste de <i>Molokanov</i>					
$R_D (1,1R_{Dmin})$	4,347	X	0,074	N	114,56

Tabla. A2. CI. Número de platos teóricos

Resta localizar el punto óptimo de inserción de la alimentación, lo que delimitará las zonas de rectificación y agotamiento de la columna. Es de aplicación la ecuación de *Kirkbride*, dada en el capítulo segundo del presente anexo, ecuación (A2.83).

Considerando el número de platos teóricos  $N$  como la suma de platos de agotamiento  $N_A$  y de rectificación  $N_R$ , puede despejarse este último número, operando en (A2.83), como sigue y corresponde al sistema en estudio:

$$(A2.90) \begin{cases} N = N_A + N_R \Rightarrow N_A = N - N_R \quad (1) \\ \frac{N_R}{N_A} = \frac{N_R}{N - N_R} = \left[ \frac{(x_{F3}) (x_{W2})^2 (Y)}{(x_{F2}) (x_{D3})^2 (G)} \right]^{0,206} \Rightarrow N_R = \frac{N \cdot \left[ \frac{(x_{F3}) (x_{W2})^2 (Y)}{(x_{F2}) (x_{D3})^2 (G)} \right]^{0,206}}{1 + \left[ \frac{(x_{F3}) (x_{W2})^2 (Y)}{(x_{F2}) (x_{D3})^2 (G)} \right]^{0,206}} \quad (2) \end{cases}$$

Por aplicación de (A2.90.2) sobre las composiciones consignadas en las tablas A2.XCIX y A2.C, las corrientes  $Y$  y  $G$  tomadas de la Figura A2.35 y el número de platos teóricos de la Tabla A2.CI; se obtiene el número teórico de platos de rectificación. Conocido éste, por diferencia se conoce el número de platos teóricos de agotamiento, según (A2.90.1). Se obtiene:

Ecuación de Kirkbride. ( $R_D=1,1R_{Dmin}$ )					
$N_R/N_A$	1,870	$N_R$	74,638	$N_A$	39,921

Tabla. A2.CII. Número de platos teóricos por zona de columna

Se cierra el capítulo haciendo referencia a las variables de diseño empleadas, sobre las que ha girado el cálculo y dimensionamiento de columna referido en el capítulo presente. Tales variables son la presión de operación y los porcentajes de componentes clave ligero y pesado en destilado.

La presión de operación fija los datos de equilibrio, ya que, como se ha demostrado en el anexo previo, tal variable es introducida junto a las composiciones de líquido para obtener composiciones de vapor en equilibrio y la temperatura de los mismos. Una vez progra-

mada la hoja de cálculo, se vincularon todas las celdas referidas a la presión a una sola, que permitía comprobar la repercusión de los cambios sobre ésta en el dimensionado de columna.

Al modificar la presión, varían los datos de equilibrio y éstos fuerzan la reiteración del cálculo del número de etapas teóricas. Tras diversas pruebas se constata que la subida de presión eleva tanto la temperatura de operación de la columna como el número de etapas teóricas requeridas. El primer cambio halla explicación en la mecánica estadística de partículas. La temperatura es proporcional al promedio de la energía cinética de una distribución de partículas por la constante de *Boltzmann*, por lo que si un aumento de presión supone aumentar la probabilidad de colisiones por la reducción de volumen implícita; debe aumentar al tiempo tanto la energía cinética promedio como, por ende, la temperatura. El segundo cambio también se basa en la cinética de colisiones: el aumento de presión supone, como queda expresado, el alza de la probabilidad de colisión y de formación de enlaces estables en fase líquida. Por consiguiente, el sistema es menos volátil y la separación tanto más dificultosa.

La presión de 2 atm elegida es una solución de compromiso entre una temperatura no demasiado baja, por disminución de la presión y un número de platos no excesivo por aumento de ésta.

Los porcentajes de los componentes clave en el destilado fijan la participación de éstos en el residuo. Puesto que el componente de interés es el clave ligero, interesa optimizar la salida por cabeza de dicho componente. Por tal razón, su porcentaje en el destilado se maximiza hasta el 99,95%, a fin de desperdiciar la menor cantidad siguiendo la estrategia de separación marcada por la operación anterior, puesto que cuanto mayor cantidad de componente de interés no puede ser purificada, tanto mayor es el gasto en alimentación bruta al proceso.

De la misma forma, interesa que el clave pesado aparezca en la menor cantidad posible en la corriente de destilado a fin de poder

efectuar la simplificación de desconsiderar su contribución, y resolver la siguiente operación de destilación como si de una binaria se tratase. En este caso, ha podido minimizarse hasta la cuasi totalidad la participación del clave pesado en el destilado, concretamente hasta el 0,5% del total alimentado, lo que permite efectuar la simplificación anunciada: la cantidad ínfima de clave pesado se suma al componente no de interés, (tal como se consideró para la operación “EXTRACTIVA 1”) y se supone que la corriente se compone del clave ligero y del no clave ligero de la presente operación. La siguiente operación, “BINARIA”, elimina hasta la cuasi totalidad el contenido en 1-buteno del destilado de “MÚLTIPLE” y proporciona la corriente terminada de producto de interés purísimo.

La justificación de los valores de diseño fijados para el cálculo y resolución de “MÚLTIPLE” cierra el capítulo actual, en el que se han proporcionado datos suficientes para el dimensionado de la columna requerida para la operación.



---

## **Capítulo A2.C5. Resolución de “BINARIA”**

### **A2.C5.1. Introducción**

La unidad “BINARIA”, constituye la última operación de purificación, (la unidad “SIMPLE” previa permitió eliminar un primer componente minoritario, las operaciones “EXTRACTIVA 1” y “EXTRACTIVA 2”, separaron masivamente los componentes más alejados en volatilidad respecto del compuesto de interés y la precedente “MÚLTIPLE” eliminó un último componente minoritario), conducente a la obtención del componente de interés a partir de la corriente de composición binaria que procuró la operación previa. La corriente con el componente de interés purísimo al 99,9%, se envía para su almacenamiento y posterior disposición comercial.

Se trata de una operación de destilación en columna de platos, donde la alimentación está constituida por solo dos compuestos de similares propiedades químicas, que permite la purificación del compuesto de interés, como queda expresado. El componente de interés se recoge como residuo y constituye una corriente de producto terminado del proceso. El destilado contiene en este caso mayoritariamente 1-buteno, mezclado parcialmente con 1,3-butadieno de interés, y, de la misma forma, constituye también una corriente de producto terminado.

La Figura A2.36 muestra un esquema de la unidad descrita, donde las líneas en negrita identifican las corrientes portadoras del componente de interés. Se adelanta en el diagrama la disposición final de la torre, que, por los cálculos que se presentarán en el presente capítulo, requiere un número de platos elevado en tal cuantía que se requiere la segregación de la columna en tres unidades. La alimentación G, procedente de la operación “MÚLTIPLE”, (resuelta en el capítulo previo), cuya composición y caudales por componentes y global se procura en el cuarto capítulo del anexo tercero; es el destilado íntegro de la operación antedicha.

# Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

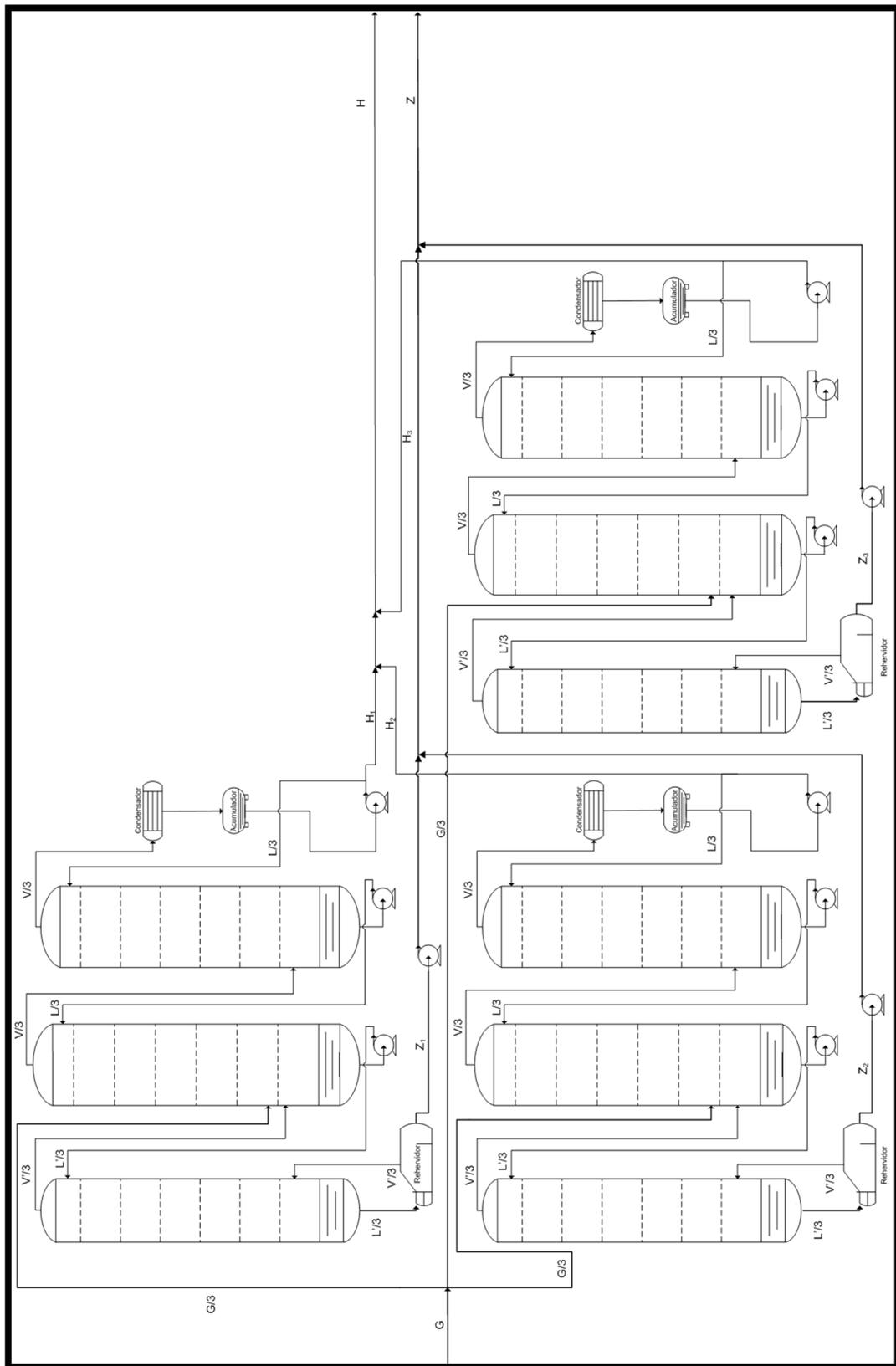


Figura. A2.36. Esquema de la unidad "BINARIA". (Elaboración propia)

El destilado, G, de "MÚLTIPLE" se ramifica en tres ramales previa alimentación. La razón de la disposición mostrada en la Figura A2.36 se justifica plenamente en el capítulo cuarto del anexo tercero, que presenta el diseño hidráulico de "BINARIA". La magnitud del caudal de la alimentación, a esta última operación, obliga a la segregación del flujo para su separación en tres trenes, a fin de reducir las dimensiones de la eventual columna diseñada en uno o dos trenes. Obsérvese que, en este caso la alimentación se inserta en la segunda columna, siendo por tanto la primera estrictamente de agotamiento, de la misma forma que la tercera lo es de rectificación.

Las corrientes de residuo,  $Z_1$ ,  $Z_2$  y  $Z_3$ , de cada tren se recogen en un solo ramal, corriente Z, y se retira del proceso como corriente terminada de proceso conteniendo al componente de interés, como se indicó *ut supra*. Por su parte, las corrientes de destilado de cada tren,  $H_1$ ,  $H_2$  y  $H_3$ , se recogen en un solo ramal, corriente H, y se retira asimismo del proceso como corriente terminada, dirigiéndose en parte al tanque de "BLENDING de EXTRACTIVA 1".

Suponiendo despreciable la variación de los caudales del líquido y el vapor a su paso por platos, en el trasiego por las columnas, se definen los siguientes:  $L/3$ ,  $V/3$ ,  $L'/3$  y  $V'/3$ , esto es, caudal de líquido en columna, vapor en columna, combinado de líquido y alimentación y combinado de vapor y alimentación respectivamente. Las corrientes se presentan en cada tren divididas por tres, puesto que la suma de tales corrientes correspondería a las corrientes de líquido y vapor circulantes por una columna alimentada íntegramente por G.

Puesto que las torres de cada tren están interconectadas como si de una sola se tratase, puede observarse en la Figura A2.36, cómo el líquido de fondo de la tercera columna se introduce en el primer plato de su columna precedente, (se comienza la numeración de los platos desde el superior de columna) y, de la misma forma, el vapor de cabeza de la primera columna se introduce en el último plato de su columna subsecuente y así sucesivamente. Esta interconexión es

equivalente a una sola torre que contuviera todos los platos, que, por razones de construcción, resulta inviable.

Por su parte, el vapor de la tercera columna es la suma de la corriente de reflujo y la que se toma como destilado. Este vapor se condensa totalmente y previa separación, en base a los cálculos que se presentarán en el presente capítulo, se acumula en el depósito dispuesto al efecto que permite estabilizar el control de las variables de cabeza de columna, por actuación sobre el reflujo, manteniendo en todo caso el destilado estable. Disponer de un volumen de reserva en el acumulador asegura una operación estable ante excursiones de las variables respecto de sus puntos de consigna. El destilado total de la operación es la suma de los caudales circulantes por cada uno de los ramales de destilado, de cada uno de los trenes, y es una corriente terminada de proceso.

Asimismo, el líquido de fondo de la primera columna debe someterse a un último equilibrio externo a la misma, en el rehervidor, un cambiador de calor de carcasa y tubos debidamente concebido para permitir la vaporización de una corriente líquida. El vapor de equilibrio,  $V'/3$ , se retorna a columna en su último plato y el líquido,  $L'/3$ , se retira como residuo o cola de la operación. La suma de las tres corrientes de residuo de cada tren supone el residuo global de "BINARIA", la principal corriente terminada del proceso.

Introducida la operación, el capítulo se invertirá en la resolución de la columna por el método de *McCabe-Thiele*.

### **A2.C5.2. Resolución de columna**

Previamente a la aplicación del método de *McCabe-Thiele* para la resolución de la columna, es preciso caracterizar, como en el capítulo anterior, las corrientes involucradas en la operación.

Puesto que las diversas corrientes de "BINARIA" se balancearán en el anexo siguiente, (capítulo tercero), se omite la reiteración

del cálculo y se presenta el siguiente diagrama, a modo de resumen, de las tres principales corrientes de la operación:

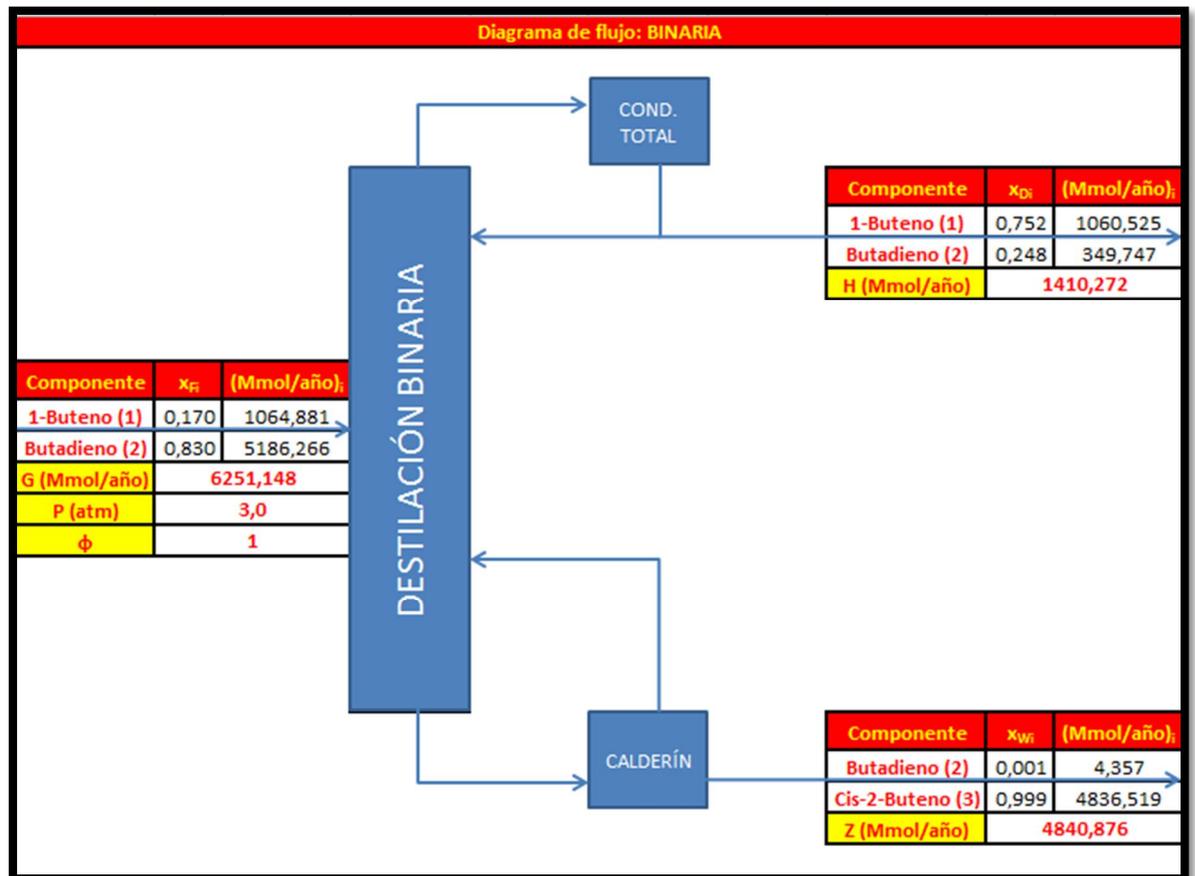


Figura. A2.37. Resumen de corrientes. (Elaboración propia)

Se incluye en la figura la descripción de las corrientes de alimentación, destilado y residuo, (G, H y Z, respectivamente), en lo tocante a composición y caudales molares globales y por componente. También se participan otras informaciones como la presión de la operación, y la condición de alimentación, ( $\Phi = 1$ ), que indica alimentación líquida a su temperatura de ebullición. En cada corriente se ha respetado la numeración de los componentes proveniente de la operación previa "EXTRACTIVA 2": el orden de los componentes se practica en base a la volatilidad decreciente. Las flechas cortan las corrientes en función de los componentes clave. En este caso la designación del clave ligero y el pesado es trivial, puesto que sólo exis-

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

ten dos componentes, de modo que el 1-buteno, más ligero, haría las veces de clave ligero y el butadieno de interés, de clave pesado.

El objeto de la operación es separar por colas una corriente rica en butadieno, mientras que la corriente superior tratará de purificarse al máximo en 1-buteno con la intención de aprovechar al máximo el componente de interés. Obsérvese la siguiente tabla:

T (°C)	x	y
27,62	0,00	0,0000
27,34	0,05	0,0572
27,08	0,10	0,1123
26,85	0,15	0,1657
26,65	0,20	0,2176
26,46	0,25	0,2684
26,31	0,30	0,3182
26,17	0,35	0,3672
26,04	0,40	0,4157
25,94	0,45	0,4638
25,85	0,50	0,5116
25,78	0,55	0,5593
25,72	0,60	0,6070
25,68	0,65	0,6548
25,65	0,70	0,7028
25,63	0,75	0,7511
25,63	0,80	0,7997
25,64	0,85	0,8489

Tabla. A2.CIII. Equilibrio 1-buteno/butadieno

Se trata de los datos de equilibrio para el sistema que alimenta la torre de destilación binaria. La Tabla A2.CIII se ha confeccionado a partir de las tablas A1.CCXXX y A1.CXCXV del anexo anterior. También se ha cambiado de unidades la temperatura.

Las composiciones  $x$  e  $y$  están referidas al compuesto más volátil, a la sazón el 1-buteno. Se observa cómo la temperatura aumenta a medida que el líquido es más rico en 1-buteno, esto es, a medida que éste es más volátil por presentar mayor composición en la sustancia ligera. Sin embargo, se aprecia un punto en el que esta tendencia cambia: en los dos últimos datos se observa un repunte de la temperatura que indica que la volatilidad relativa del sistema ha cambiado; así lo demuestra también la inversión de la composición de la fase líquida y vapor, puesto que siempre que no se invierta la volatilidad del sistema, la fase vapor debe presentar mayor composición que el líquido. La situación anterior es lo que se conoce como punto azeotrópico o azeótropo del sistema. Más allá de este es imposible obtener separación, puesto que, por la inversión de la volatilidad, un mayor grado de rectificación comenzaría a empobrecer el vapor en el producto *a priori* más volátil.

La presencia de este azeótropo sería relevante si la corriente de interés fuera el destilado, puesto que no podría obtenerse con una pureza en el compuesto ligero superior al 75% a tenor de los datos mostrados. Si bien, el sistema no presenta dificultad a la purificación de la corriente de cola que, a la sazón contendrá el componente de interés. El azeótropo por tanto únicamente justifica la composición seleccionada del destilado.

Con lo anterior se está en disposición de resolver el número de equilibrios requerido para la separación pretendida. A partir de los datos de equilibrio y las condiciones a las que se introducirá la alimentación, debe decidirse la relación de reflujo y establecer cuál es el número de etapas de equilibrio ideales.

Dado que no se dispone de diagramas de entalpía-composición para el sistema 1-buteno/butadieno, deberá emplearse el método gráfico de *McCabe-Thiele*, en adelante M-T, para la resolución de la columna. Además, dada la similitud de composiciones del líquido y el vapor, es de esperar una curva muy ceñida a la recta  $y = x$ , por lo

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

que se aplicará la resolución analítica por el método analítico de *Sorel-Lewis*, en adelante S-L.

Comienza el desarrollo analítico por practicar balances a las zonas de rectificación y agotamiento de la columna.

La posición del plato de alimentación, limita la región donde las composiciones son mayores que la de la alimentación plato a plato, (zona de rectificación); de aquella otra zona, donde la mezcla alimentada se agota en el componente menos volátil, luego las composiciones son menores que la de la alimentación, (zona de agotamiento).

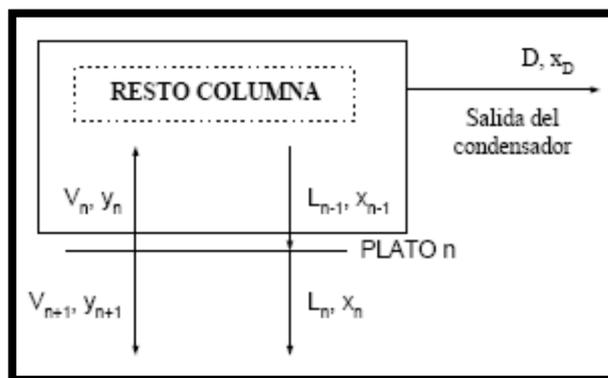


Figura. A2.38. Balance de la zona de rectificación. (R. E. Treybal, 1990)

Considerando un funcionamiento continuo, en ambas zonas, para la sección de rectificación, representada en el dibujo anterior se tiene:

$$(A2.91) \begin{cases} \text{Balance a la zona de rectificación: } V_n = L_{n-1} + D & (1) \\ \text{Balance aplicado al 1-buteno: } V_n y_n = L_{n-1} x_{n-1} + D x_D & (2) \end{cases}$$

Siendo  $n$  el plato  $n$ ésimo de rectificación y considerando que el plato número uno es el superior de la columna. Operando en el balance aplicado al 1-buteno:

$$y_n = \frac{L_{n-1}}{V_n} x_{n-1} + \frac{D}{V_n} x_D \quad (A2.92)$$

Del mismo modo, para la zona de agotamiento, (obsérvese la figura siguiente):

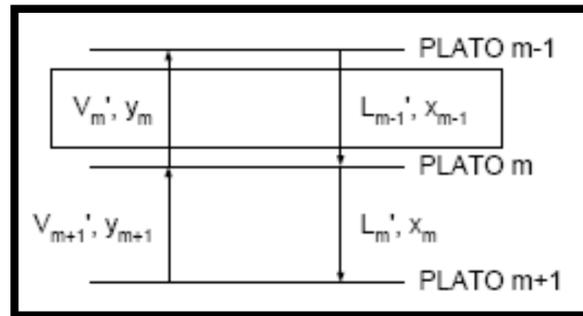


Figura. A2.39. Balance de la zona de agotamiento. (R. E. Treybal, 1990)

Se tiene:

$$(A2.93) \begin{cases} \text{Balance a la zona de agotamiento: } V'_m + W = L'_{m-1} & (1) \\ \text{Balance aplicado al 1-buteno: } V'_m y_m = L'_{m-1} x_{m-1} - W x_W & (2) \end{cases}$$

Siendo  $m$  el plato  $m$ -ésimo de agotamiento. Si el plato  $m+1$  del dibujo fuera el último equilibrio, (el calderín); entonces la corriente  $L'_m$  equivaldría al residuo  $W$ . De este modo, a la zona de agotamiento ingresa la corriente anterior al plato  $m$ , primero de agotamiento,  $L'_{m-1}$ , y parten las corrientes  $V'_m$  y  $W$ . Operando en el balance aplicado al 1-buteno:

$$y_m = \frac{L'_{m-1}}{V'_m} x_{m-1} - \frac{W}{V'_m} x_W \quad (A2.94)$$

De las expresiones obtenidas al practicar los balances a las zonas de rectificación y agotamiento, denominadas rectas de operación, es inmediato concluir que si los flujos molares de  $L$  y  $V$  en cada plato no son constantes, el cálculo se hace bastante tedioso. Precisamente, los métodos de S-L y M-T, parten de la simplificación:

$$(A2.95) \begin{cases} V_1 = V_2 = \dots = V_n = V \text{ y } V'_1 = V'_2 = \dots = V'_m = V' & (1) \\ L_1 = L_2 = \dots = L_n = L \text{ y } L'_1 = L'_2 = \dots = L'_m = L' & (2) \end{cases}$$

Por tanto, las rectas de operación se reducen a las siguientes expresiones:

$$(A2.96) \left\{ \begin{array}{l} \text{Recta de rectificación: } y_n = \frac{L}{V} x_{n-1} + \frac{D}{V} x_D \quad (1) \\ \text{Recta de agotamiento: } y_m = \frac{L'}{V'} x_{m-1} - \frac{W}{V'} x_W \quad (2) \end{array} \right.$$

Las corrientes D y W corresponden al destilado y residuo genéricos, en el caso presente, debería sustituirse D por H y W por Z.

Estas rectas, junto a los datos de equilibrio constituyen las herramientas de cálculo que se emplearán en los métodos S-L y M-T. Las rectas de operación relacionan la composición del vapor que abandona un plato con el líquido que procede del plato anterior, mientras que los datos de equilibrio, permiten obtener las composiciones del líquido que abandona un plato, una vez se ha determinado la composición del vapor mediante la recta de operación y admitiendo que la transferencia de materia en cada plato, es adecuada para que las corrientes de líquido y vapor partan en equilibrio. Esto es, suponiendo que el plato separa idealmente. Bajo esta hipótesis se encontrará el número de etapas ideales requerido por la operación "BINARIA" y en el anexo siguiente se discutirá el número de etapas reales, definiendo el concepto de eficacia. Es necesario por tanto determinar los coeficientes de las rectas de operación. Para ello, se toman datos de L, L', V y V' de la Figura A2.37, que contiene los datos de balance que se justificarán en el anexo que sigue. Debe señalarse que, para la ejecución de los balances se ha tomado la relación de reflujo interna L/V igual a 0,98, de lo que se dará cumplida explicación al final del capítulo.

Se sigue el razonamiento por aplicación de balance al plato de alimentación, mostrado en la Figura A2.40.

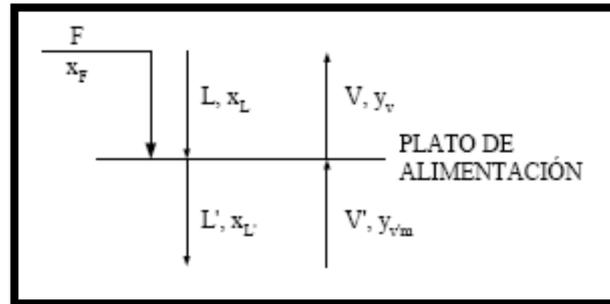


Figura. A2.40. Balance del plato de alimentación. (R. E. Treybal, 1990)

El número de platos se ve afectado directamente por el modo en que ingresa la alimentación. Si se define  $\phi$ , la condición de alimentación, en general se tiene al balancear:

$$(A2.97) \begin{cases} L' = L + \phi F & (1) \\ V = V' + (1 - \phi)F & (2) \end{cases}$$

Siendo  $F$  la alimentación genérica, a la sazón,  $G$ . El valor de  $\phi$ , en este caso viene dado por el dato de la temperatura de la alimentación como se demuestra seguidamente. Según las ecuaciones (A2.97) se despeja:

$$(A2.98) \begin{cases} \phi = \frac{L' - L}{F} & (1) \\ (1 - \phi) = \frac{V - V'}{F} & (2) \end{cases}$$

Practicando un balance de energía al plato de alimentación según la Figura A2.40 se obtiene:

$$\Delta H + \Delta E_c + \Delta E_p = Q + W_e \text{ Balance global de energía (A2.99)}$$

Admitiendo que las formas de energía mecánicas son despreciables respecto a la variación de entalpía, y que, en el plato de alimentación no se aporta ni se retira calor ni se realiza trabajo externo de ningún tipo, el balance se reduce a  $\Delta H = 0$ , también denominado, balance entálpico. De esta forma, el balance se transforma, aten-

diendo a la Figura A2.40 e igualando entradas y salidas de energía del sistema en:

$$FH_F + V'H_{V'}^{sat} + LH_L^{sat} = VH_V^{sat} + L'H_{L'}^{sat} \quad (A2.100)$$

Si se desprecian los calores sensibles frente a los latentes:

$$H_{V'}^{sat} = H_V^{sat} \text{ y } H_{L'}^{sat} = H_L^{sat} \quad (A2.101)$$

Puede simplificarse la ecuación (A2.100), operando e introduciendo (A2.98) y (A2.101), según:

$$\begin{aligned} FH_F &= H_V^{sat}(V - V') + H_L^{sat}(L' - L) \\ H_F &= H_V^{sat} \left( \frac{V - V'}{F} \right) + H_L^{sat} \left( \frac{L' - L}{F} \right) \\ H_F &= H_V^{sat}(1 - \phi) + H_L^{sat} \phi \\ \phi &= \frac{H_V^{sat} - H_F}{H_V^{sat} - H_L^{sat}} \quad (A2.102) \end{aligned}$$

Considerando la diferencia de entalpías de saturación como el calor latente de cambio de fase,  $\lambda$ , se determina  $\phi$ :

$$\phi = \frac{H_V^{sat} + H_L^{sat} - H_L^{sat} - H_F}{\lambda} = 1 + \frac{H_L^{sat} - H_F}{\lambda} \quad (A2.103)$$

A partir de la ecuación (A2.103), se deduce que, a la temperatura de ebullición, las entalpías del líquido y la alimentación líquida son coincidentes, por lo que, como sucede en todas las operaciones proyectadas el coeficiente de alimentación,  $\phi$ , equivale a la unidad *quod erat demonstrandum*.

El valor de  $\phi$  se utiliza, junto con las ecuaciones (A2.97) y (A2.98), para encontrar el lugar de todos los puntos de intersección de las rectas de operación. La ecuación para esta recta, se deduce como sigue.

Sean:

$$(A2.104) \begin{cases} Vy_R = Lx_R + Dx_D & (1) \\ V'y_A = L'x_A - Wx_W & (2) \end{cases}$$

Las expresiones de las rectas de operación, con una notación modificada que permite hacer más intuitivo el razonamiento. R designa rectificación y A, agotamiento. La nueva notación es equivalente a la anterior, dada en (A2.96); las expresiones (A2.104), representan genéricamente el lugar de todas las composiciones correspondientes a los flujos de líquido y vapor que llegan y parten de un plato, respectivamente, en las zonas de la columna designadas por R y A, esto es, rectificación y agotamiento.

Si estas rectas contienen todos los puntos mencionados en sus respectivas secciones, la conclusión que se desprende es que ambas rectas serán comunes en el plato de alimentación, que diferencia el funcionamiento de enriquecimiento en el componente más volátil, a empobrecimiento a lo largo de la columna. Por tanto, en el plato de alimentación debe cumplirse:

$$(A2.105) \begin{cases} y_R = y_A = y & (A) \\ x_R = x_A = x & (B) \end{cases}$$

Restando ahora (A2.104.1) y (A2.104.2) y aplicando (A2.105) se logra:

$$y(V - V') = (L - L')x + Dx_D + Wx_W \quad (A2.106)$$

Considerando el balance global de materia a la columna, dado en (A2.107.1) y las ecuaciones (A2.98), la anterior (A2.106) se reescribe según:

$$(A2.107) \begin{cases} Fx_F = Dx_D + Wx_W & \text{Balance global de la columna(1)} \\ y(1 - \phi)F = -\phi Fx + Fx_F \\ y = \frac{\phi}{(\phi - 1)}x - \frac{x_F}{(\phi - 1)} & (2) \end{cases}$$

Donde (A2.107.2) es la recta de alimentación: el lugar de los puntos de corte de todas las rectas de operación posibles. Como puede comprobarse sólo depende de la condición de alimentación y la composición de la alimentación.

En este caso, con una condición de alimentación igual a la unidad, la pendiente de la recta tiende a infinito, por lo que la recta de alimentación será vertical. Si se verifica el corte con la recta  $y = x$  y se hace  $x = x_F$ :

$$y = \frac{\phi}{(\phi - 1)} x_F - \frac{x_F}{(\phi - 1)} \Bigg|_{y = x} \Rightarrow x = \frac{\phi}{(\phi - 1)} x_F - \frac{x_F}{(\phi - 1)} = x_F$$

Por tanto, la recta de alimentación vendrá descrita por la ecuación:

$$x = x_F \Rightarrow x = 0,170 \text{ Recta de alimentación (A2.108)}$$

Donde se ha sustituido  $x_F$ , la composición de 1-buteno en la alimentación, tomada de la Figura A2.37.

Las rectas de operación, tras sustituir los datos conocidos, dados en la Figura A2.37; en las ecuaciones (A2.96) resultan:

$$(A2.109) \begin{cases} y_R = 0,98x_R + 0,01504 \text{ Recta de rectificación (1)} \\ y_A = 1,069x_A - 9,618 \cdot 10^{-4} \text{ Recta de agotamiento (2)} \end{cases}$$

La resolución por el método de S-L se basa en la aplicación directa de las rectas de operación e interpolación lineal en datos de equilibrio: Se parte de la composición conocida del líquido que retorna a columna, esto es, el procedente del condensador. Si se aplica la recta de rectificación, se obtendrá la misma composición, puesto que el condensador es total, y devuelve a columna un líquido con la misma composición del vapor saliente. El líquido que cae del primer plato al segundo, se supone en equilibrio con la composición del vapor saliente de columna, (por la consideración de etapa ideal anteriormente referida).

Las composiciones de los líquidos se determinan interpolando linealmente en los datos de equilibrio.

Las composiciones de los vapores en cada plato se determinan introduciendo el valor de composición del líquido del plato anterior en la recta de operación correspondiente, (si  $x > x_F$ , en la de rectificación y si es al contrario, en la de agotamiento).

El plato donde se intercambian las rectas de operación, es el plato de alimentación. El proceso continúa hasta lograr una composición de líquido menor o igual a  $x_W$ .

El procedimiento así aplicado, se tabula a continuación a fin de determinar el número de etapas ideales requerido.

Operación 1		Operación 2		Operación 3		Operación 4	
$x_0$	0,7520	$x_1$	0,7510	$x_2$	0,7499	$x_3$	0,7489
$y_1$	0,752	$y_2$	0,751	$y_3$	0,750	$y_4$	0,749
Equilibrio 1		Equilibrio 2		Equilibrio 3		Equilibrio 4	
Interpolación		Interpolación		Interpolación		Interpolación	
$x$	$y$	$x$	$y$	$x$	$y$	$x$	$y$
0,7500	0,7511	0,7000	0,7028	0,7000	0,7028	0,7000	0,7028
0,7520	0,7530	0,7500	0,7511	0,7500	0,7511	0,7500	0,7511
$y_1$	0,7520	$y_2$	0,751	$y_3$	0,750	$y_4$	0,749
$x_1$	0,7510	$x_2$	0,7499	$x_3$	0,7489	$x_4$	0,7578
Operación 5		Operación 6		Operación 7		Operación 8	
$x_4$	0,7578	$x_5$	0,7467	$x_6$	0,7456	$x_7$	0,7444
$y_5$	0,748	$y_6$	0,747	$y_7$	0,746	$y_8$	0,745
Equilibrio 5		Equilibrio 6		Equilibrio 7		Equilibrio 8	
Interpolación		Interpolación		Interpolación		Interpolación	
$x$	$y$	$x$	$y$	$x$	$y$	$x$	$y$
0,7000	0,7028	0,7000	0,7028	0,7000	0,7028	0,7000	0,7028
0,7500	0,7511	0,7500	0,7511	0,7500	0,7511	0,7500	0,7511
$y_5$	0,748	$y_6$	0,747	$y_7$	0,746	$y_8$	0,745
$x_5$	0,7467	$x_6$	0,7456	$x_7$	0,7444	$x_8$	0,7433

Tabla. A2.CIV. Primeras etapas de separación

Como se describe, la primera corriente conocida es el vapor condensado, devuelto en la parte que indica el reflujo a columna, que presenta la misma composición que el destilado. La operación primera corresponde al primer plato de columna: al aplicar la recta de rectificación conocida la composición del reflujo, se obtiene la composición del vapor que parte del primer plato. Este vapor presenta la misma composición, puesto que es esta corriente la que se condensa totalmente para producir el destilado y el reflujo de idéntica composición.

Conocido el vapor que abandona el primer plato, el líquido que cae al siguiente se determina interpolando en los datos de equilibrio de la Tabla A2.CIII. En la operación segunda se aplica de nuevo la recta de operación para obtener el vapor que parte del segundo plato, conocida la composición del líquido que cae al segundo. De nuevo se interpola en los datos de equilibrio y se conoce así la composición del líquido que cae al tercer plato.

Aplicando esta mecánica de cálculo, se observa cómo el líquido que va cayendo plato a plato disminuye en composición del más ligero, puesto que éste pasa a formar parte del vapor. Cuando la composición de líquido es inferior a la de la alimentación, (siempre referida al componente más ligero, 1-buteno), debe cambiarse la recta de operación únicamente, respetándose la mecánica de cálculo hasta lograr una composición de líquido inferior a la deseada, (0,001 en 1-buteno, esto es, 0,999 en butadieno, ya que el sumatorio de fracciones molares de componentes suma la unidad, lo que supone el 99,9% en éste último). El número de platos ideales coincide con el de operaciones realizadas como las mostradas en la Tabla A2.CIV.

Se muestran seguidamente los cálculos cercanos al plato de alimentación y al último plato de columna:

Operación 134		Operación 135		Operación 136	
x <sub>133</sub>	0,1777	x <sub>134</sub>	0,1726	x <sub>135</sub>	0,1678
y <sub>134</sub>	0,189	y <sub>135</sub>	0,184	y <sub>136</sub>	0,179
Equilibrio 134		Equilibrio 135		Equilibrio 136	
Interpolación		Interpolación		Interpolación	
x	y	x	y	x	y
0,1500	0,1657	0,1500	0,1657	0,1500	0,1657
0,2000	0,2176	0,2000	0,2176	0,2000	0,2176
y <sub>134</sub>	0,189	y <sub>135</sub>	0,184	y <sub>136</sub>	0,179
x <sub>134</sub>	0,1726	x <sub>135</sub>	0,1678	x <sub>136</sub>	0,1631
<b>Plato de alimentación</b>					

Tabla. A2.CV. Etapas próximas al plato de alimentación

Operación 207		Operación 208		Operación 209		Operación 210	
x <sub>206</sub>	0,0013	x <sub>207</sub>	0,00120	x <sub>208</sub>	0,00106	x <sub>209</sub>	0,00094
y <sub>207</sub>	0,0014	y <sub>208</sub>	0,00122	y <sub>209</sub>	0,00107	y <sub>210</sub>	0,00094
Equilibrio 5		Equilibrio 6		Equilibrio 7		Equilibrio 8	
Interpolación		Interpolación		Interpolación		Interpolación	
x	y	x	y	x	y	x	y
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,0500	0,0572	0,0500	0,0572	0,0500	0,0572	0,0500	0,0572
y <sub>207</sub>	0,0014	y <sub>208</sub>	0,00122	y <sub>209</sub>	0,00107	y <sub>210</sub>	0,00094
x <sub>207</sub>	0,0012	x <sub>208</sub>	0,00106	x <sub>209</sub>	0,00094	x <sub>210</sub>	0,0008

Tabla. A2.CVI. Primeras etapas de separación

Donde se estiman 210 etapas ideales de separación para el propósito de obtener 1,3-butadieno al 99,9%. Se precisarán 135 platos para rectificación, a tenor de la posición del plato de alimentación. El resto, 75 serán de agotamiento.

Finalmente resta por justificar la elección del reflujo interno, L/V, al 98% y la elección de la presión de operación.

Puesto que se ha obviado la demostración gráfica del método de M-T, (la resolución analítica S-L es bastante más práctica cuando se trata de resolver operaciones con cuantioso número de etapas),

así también se ahorra la explicación gráfica de la obtención del reflujo mínimo, esto es, aquél para el que el número de platos se hace infinito. Las recomendaciones de diseño indican trabajar con un reflujo entre 1,1 y 1,3 veces superior al mínimo. En este caso, el reflujo estará muy próximo a la unidad, (el máximo reflujo posible cuando se trata de la relación  $L/V$ ), con lo cual, la selección del mismo respondió a un criterio de ensayo-error basado en dos criterios contrapuestos:

- Un reflujo elevado disminuye el número de etapas al tiempo que aumenta el caudal de líquido en columna, con la consecuencia de un necesario aumento en el diámetro de la misma.
- Un reflujo bajo causa el efecto contrario: al recircular menor caudal de líquido, el diámetro de la columna puede disminuirse, si bien aumenta su altura por número de etapas requeridas.

La solución de compromiso llevó a emplear una relación del 98%, que no pudo disminuirse por el desmesurado aumento del número de platos, ni pudo aumentarse por el impracticable diámetro de columna que supondría.

Por último, en lo que respecta a la presión, tal variable fija los datos de equilibrio, ya que, como se ha demostrado en el anexo previo, tal variable es introducida junto a las composiciones de líquido para obtener composiciones de vapor en equilibrio y la temperatura de los mismos. Una vez programada la hoja de cálculo, se vincularon todas las celdas referidas a la presión a una sola, que permitía comprobar la repercusión de los cambios sobre ésta en el dimensionado de columna.

Al modificar la presión, varían los datos de equilibrio y éstos fuerzan la reiteración del cálculo del número de etapas teóricas. Tras diversas pruebas se constata que la subida de presión eleva tanto la temperatura de operación de la columna como el número de etapas

teóricas requeridas. El primer cambio halla explicación en la mecánica estadística de partículas. La temperatura es proporcional al promedio de la energía cinética de una distribución de partículas por la constante de *Boltzmann*, por lo que si un aumento de presión supone aumentar la probabilidad de colisiones por la reducción de volumen implícita; debe aumentar al tiempo tanto la energía cinética promedio como, por ende, la temperatura. El segundo cambio también se basa en la cinética de colisiones: el aumento de presión supone, como queda expresado, el alza de la probabilidad de colisión y de formación de enlaces estables en fase líquida. Por consiguiente, el sistema es menos volátil y la separación tanto más dificultosa.

La presión de 3 atm elegida es una solución de compromiso entre una temperatura no demasiado baja, por disminución de la presión y un número de platos no excesivo por aumento de ésta.

La justificación de los valores de diseño fijados para el cálculo y resolución de "BINARIA" cierra el capítulo actual, en el que se han proporcionado datos suficientes para el dimensionado de la columna requerida para la operación.



## Capítulo A2.C6. Diseño de “RECUPERACIÓN”

### A2.C6.1. Balance y diseño de “RECUPERACIÓN”

La operación “RECUPERACIÓN”, es una operación paralela al proceso principal, concebida con el propósito de purificar y concentrar, en el mayor grado posible, el valioso agente extractante. Como el primer paso del tren de separación propuesto para la obtención del componente de interés, es una destilación sencilla en etapa simple. Considérese la figura que se muestra seguidamente:

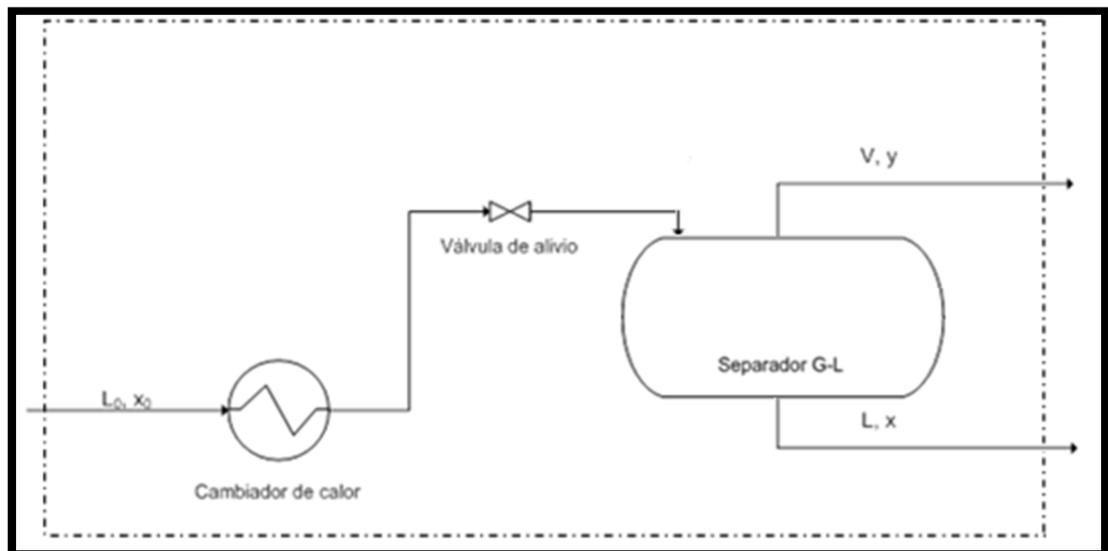


Figura. A2.41. Esquema de una destilación simple. (*Elaboración propia*)

En una destilación simple, la alimentación previamente acondicionada, (calentada o enfriada según convenga), se descomprime previo paso a un separador de fase que, dependiendo de la relación altura-diámetro requerida, podrá construirse horizontal o verticalmente. La descompresión ocasiona una súbita escisión del líquido y el vapor, de modo que proporcionando el suficiente tiempo de contacto, (para el que se diseña el separador), se logra una separación de líquido y vapor en equilibrio. Dicho vapor puede o no condensarse en función de las necesidades futuras.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

En el caso que ocupa a este PFC, la destilación de “RECUPERACIÓN” consiste en una vaporización, por el método descrito, de la corriente de residuo de la operación “EXTRACTIVA 2”, corriente X, que contiene el extractante mezclado en su mayor parte con cis-2-buteno y en menor medida con el componente de interés, 1,3-butadieno.

La siguiente tabla, recoge la información pertinente sobre la corriente X:

Componente	$x_{Fi}$	(Mmol/año) <sub>i</sub>
Butadieno (1)	0,112	576,540
Cis-2-Buteno (2)	0,217	1113,514
Furfural (3)	0,671	3440,773
X (Mmol/año)		5130,827
Datos de la alimentación (X)		

Tabla. A2.CVII. Composición y caudales por componente de la corriente X

Donde los componentes se notan junto a su subíndice “i” y las composiciones vienen dadas en fracción molar.

Considérense seguidamente los datos consignados en las tablas A1.CCXXXII y A1.CCLXXIII del anexo anterior:

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	T (K)
0,071	0,081	0,848	0,269	0,731	0,000	278,788

Tabla. A2.CVIII. Datos de equilibrio para la operación “RECUPERACIÓN”

Los datos de equilibrio están calculados para una presión de 9 atm, por lo que la corriente X deberá bombearse a 10 atm, por parte de las bombas B-18 y B-21 del diagrama de flujo mostrado en el plano 3, y refrigerarse en la unidad E-22 del mismo plano previa descompresión a la presión de trabajo en la válvula reductora correspondiente.

Convenientemente descrita la corriente de alimentación, del proceso que se diseña en el actual capítulo, por conocerse sus con-

diciones de temperatura, presión y composición, puede practicarse balance de materia a la unidad de separación.

Vuélvase la atención nuevamente a la Figura A2.41. Puede observarse que sólo tres corrientes ingresan o abandonan el proceso, representado por el cuadro trazado con línea discontinua: X, la alimentación que entra al proceso y se separa en las dos corrientes salientes líquido, L' y vapor, V'. No deben confundirse estas corrientes con aquéllas notadas en los correspondientes capítulos de diseño referidos a torres de destilación, (en tales casos corresponden genéricamente al líquido o vapor de sus zonas de agotamiento).

A partir de la ecuación (2.4), se desarrollaron los términos del balance global de materia, y se procuró el razonamiento sobre las simplificaciones pertinentes a un proceso estacionario sin reacción química, como sigue siendo el caso. Por tanto, se está a lo deducido en la expresión (A2.5) y, en particular al caso:

$$(A2.110) \begin{cases} X = L' + V' & (1) \\ (x_0)_i X = x_i L' + y_i V' & (2) \end{cases}$$

El caudal de la alimentación ha de coincidir con la suma de los de las corrientes de líquido y vapor escindidas de tal corriente. La expresión (A2.110.1) es el balance de materia global de la operación "RECUPERACIÓN". Por su parte, y considerando la anterior, (A2.110.2) indica que el caudal individual de un componente cualquiera en la alimentación debe coincidir con la suma de los respectivos caudales en el líquido y el vapor. Esta ecuación es la conocida como balance de materia global por componente. Introduciendo (A2.110.1) en (A2.110.2) y operando se obtiene:

$$\begin{aligned} (x_0)_i (L' + V') &= x_i L' + y_i V' \\ (y_i - (x_0)_i) V' &= ((x_0)_i - x_i) L' \end{aligned}$$

Ergo:

$$\frac{L'}{V'} = \frac{y_i - (x_0)_i}{(x_0)_i - x_i} \quad (A2.111)$$

Ecuación que procura la proporción del líquido sobre el vapor, o entendido de otra forma, el grado de vaporización a que debe someterse la alimentación. Dicha razón se encuentra ligada únicamente a composiciones molares de las distintas corrientes, como se ha encontrado manipulando expresiones a partir de la ecuación del balance.

Considerando conocidas las composiciones de cada corriente, (véanse tablas A2.CVII y A2.CVIII), debe encontrarse una expresión para determinar los caudales de líquido y vapor. Para ello, tómesese (A2.110.1) y divídase por el caudal de vapor,  $V'$ :

$$\frac{X}{V'} = \frac{L'}{V'} + 1$$

Despejando para el volumen de vapor, (en función de  $L'/V'$ ):

$$V' = \frac{X}{L'/V' + 1} \quad (A2.112)$$

Operando e introduciendo (A2.112):

$$L' = \frac{L'}{V'} \cdot V' = \frac{L'}{V'} \cdot \frac{X}{L'/V' + 1} = \frac{X}{V'/L' \left( L'/V' + 1 \right)}$$

Se obtiene, para  $L'$ :

$$L' = \frac{X}{1 + V'/L'} \quad (A2.113)$$

Puesto que  $L'/V'$  en (A2.111) incluye tres ecuaciones, (una por cada componente), así (A2.112) y (A2.113), por ser dependientes de

la mencionada razón, también incluyen una ecuación por componente cada una. Se aplica el siguiente procedimiento de cálculo:

- Se resuelve (A2.111) una vez para cada componente. Las composiciones se toman de las tablas A2.CVII y A2.CVIII.
- Se determina, para cada componente tomando los datos del guión anterior, el caudal de vapor y líquido por aplicación de las ecuaciones (A2.112) y (A2.113).

Se obtiene:

<b>L'/V'</b>	3,777	<b>L'/V'</b>	3,777	<b>L'/V'</b>	3,777
<b>V' (Mmol/año)</b>	1074,077	<b>V' (Mmol/año)</b>	1074,077	<b>V' (Mmol/año)</b>	1074,077
<b>L' (Mmol/año)</b>	4056,750	<b>L' (Mmol/año)</b>	4056,750	<b>L' (Mmol/año)</b>	4056,750
<b>Balance (al componente 1)</b>		<b>Balance (al componente 2)</b>		<b>Balance (al componente 3)</b>	

Tabla. A2.CIX. Primera ejecución del balance para "RECUPERACIÓN"

En este caso, a diferencia de la situación encontrada en el diseño de "SIMPLE", se obtiene convergencia en la determinación de las corrientes de la operación independientemente del componente seleccionado para el cálculo de la razón L'/V'. Este hecho no es casual, sino que responde a la utilización de los grados de libertad de que se dispone en este diseño.

Mientras en la unidad "SIMPLE" la composición de la alimentación no quedaba restringida por condición alguna, (puesto que procede de una operación anterior), en la actual "RECUPERACIÓN", la composición de la alimentación es una variable fija, determinada previamente en los balances de materia de la unidad que precede a ésta. De esta forma, el grado de libertad en la operación en curso estriba en las composiciones del líquido y el vapor. En busca de un líquido lo más rico posible en extractante, se han tanteado las composiciones mostradas en la Tabla A2.CVIII hasta lograr la convergencia mostrada en A2.CIX.

Por lo anterior, el balance se da por cerrado y puede calcularse el contenido en cada una de las especies tanto del líquido L', como

del vapor  $V'$ , conocido el caudal global y sus respectivas composiciones por multiplicación de los mismos. Se obtiene para el líquido:

<b>Composición L'</b>		
<b><math>x_1</math></b>	<b><math>x_2</math></b>	<b><math>x_3</math></b>
0,071	0,081	0,848
<b>Mmol/año (1)</b>	<b>Mmol/año (2)</b>	<b>Mmol/año (3)</b>
287,424	328,563	3440,763
<b>L' (Mmol/año)</b>		4056,750

Tabla. A2.CX. Composición de la corriente de líquido

Y para el vapor:

<b>Composición V'</b>		
<b><math>y_1</math></b>	<b><math>y_2</math></b>	<b><math>y_3</math></b>
0,269	0,731	0,000
<b>Mmol/año (1)</b>	<b>Mmol/año (2)</b>	<b>Mmol/año (3)</b>
289,116	784,951	0,010
<b>V' (Mmol/año)</b>		1074,077

Tabla. A2.CXI. Composición de la corriente de vapor

### **A2.C6.2. Diseño hidromecánico de “RECUPERACIÓN”**

Esta segunda sección se dividirá en varios apartados imbricados tanto en el diseño de la unidad separadora como en el diseño mecánico de la misma. No se incluirán aspectos tales como el diseño de la válvula de alivio de presión o la red de tuberías, si bien, se indicarán los diámetros nominales requeridos en las bridas de entrada y salida a la unidad de “RECUPERACIÓN”.

La sección se divide, como queda indicado, en los siguientes apartados:

- Dimensionado hidráulico de la unidad de separación.
- Diseño mecánico (I). Determinación de la presión de diseño.
- Diseño mecánico (II). Determinación de espesores para el casco y los cabezales sometidos a presión interna.

- Diseño mecánico (III). Determinación del espesor del aislamiento y de la chapa envolvente.
- Diseño mecánico (IV). Determinación del peso del aparato en operación.
- Diseño mecánico (V). Diseño del soporte.
- Diseño mecánico (VI). Cálculo de las tubuladuras y refuerzos.
- Cálculo de orejas de izado y pintado del casco y cabezales.

Lo que a expensas del presupuesto cerrará el cálculo para la primera unidad. Como puede comprobarse, el diseño mecánico para un depósito horizontal resulta más sencillo que para uno vertical, ya que pueden obviarse las cargas por viento y sismo al no tratarse de recipientes elevados. Además, tampoco se contempla el soporte mediante faldón, entre otras diferencias que se irán mostrando en los respectivos apartados cuando proceda.

#### A2.C6.2.1. Dimensionado hidráulico de la unidad de separación

Previamente al dimensionado, y puesto que se requerirán con posterioridad, es necesario generar datos de densidad de fases. Tal como se mostrará por extenso en el anexo siguiente, se estimará la citada propiedad para las corrientes de líquido y vapor en equilibrio, así como para la alimentación a presión de operación.

Puesto que los métodos de cálculo se citaron en el capítulo primero del presente anexo y las propiedades de las sustancias han sido dadas en el anterior, se excusa por motivos de brevedad el procedimiento y se presentan directamente los valores de densidad de las distintas corrientes:

$\rho_x$ (mol/cm <sup>3</sup> )	$\rho_L$ (mol/cm <sup>3</sup> )	$\rho_V \cdot 10^4$ (mol/cm <sup>3</sup> )
0,012	0,013	3,082

Tabla. A2.CXII. Estimación de densidades molares de las corrientes de “RECUPERACIÓN”

Seguidamente pueden presentarse las ecuaciones y secuencia de cálculo para el dimensionado del equipo separador correspondiente a "RECUPERACIÓN". Sea la Figura A2.42: se muestra en ésta un esquema genérico de separador gas-líquido, en este caso horizontal. Las razones propuestas por el autor para emplear tal unidad consisten en reaprovechar productos de interés, (como es el caso del extractante rescatado en la operación "RECUPERACIÓN"), mejorar la pureza de una corriente, reducir emisiones o proteger equipos aguas abajo.

La unidad mostrada en la Figura A2.42, encuentra su principio físico de funcionamiento en la separación por gravedad e impacto: la mezcla alimentada ingresa al separador a través de una tubuladura en la región superior de su casco, donde una placa deflectora, (*splash plate*, véase Figura A2.42), dirige el líquido hacia la salida inferior.

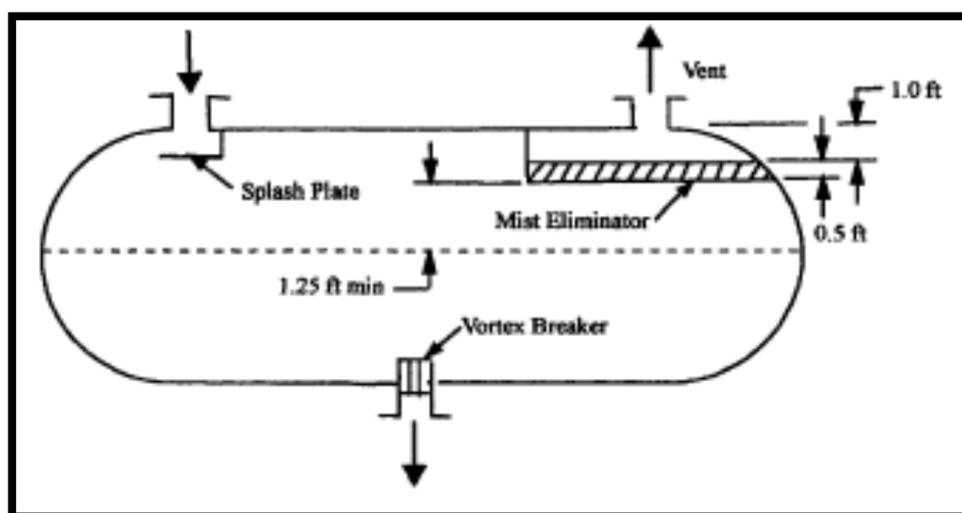


Figura. A2.42. Esquema de un separador horizontal. (H. Silla, 2003)

El vapor conteniendo pequeñas gotas de líquido fluye hacia la salida superior. En este caso se contempla el diseño de una pletina deflectora, puesto que ésta queda indicada para aplicaciones de bajo porcentaje de vaporización; basta comprobar el caudal molar de las

---

corrientes implicadas para comprobar que es el líquido la corriente mayoritaria.

En el camino ascendente del vapor, las gotas de mayor diámetro coalescen y caen por gravedad hacia el fondo del equipo. En general la eficacia de separación gas-líquido suele oscilar el 95%, es decir, el vapor contiene un 5% de líquido, en forma de gotas micronizadas, que ha arrastrado en su seno.

A diferencia del caso anterior, dado que el extractante no vaporiza no es importante limitar el contenido en líquido del vapor, por lo que se prescindirá del extractor de neblina, (*mist eliminator*, véase Figura A2.42), cerca de la salida de vapor.

El objetivo principal del dimensionado del separador, consiste en minimizar la velocidad del vapor lo suficiente para reducir el arrastre de gotas líquidas. Por consiguiente, es preciso encontrar el diámetro óptimo, acorde con lo anterior, y con el hecho de que el separador debe contemplarse también como un acumulador de líquido, que garantice un funcionamiento estable ante un eventual transitorio. De ese modo, también deberá calcularse la altura óptima que permita ese nivel de líquido “colchón”, (según el argot propio de refinería), que amortigüe las variaciones en el flujo.

Tal nivel de líquido no sólo incluirá el propósito señalado, sino que permitirá el burbujeo de vapor atrapado en el líquido, mejorando la separación.

Existen en la bibliografía distintos procedimientos. En este caso se aplicará el que se indica en el libro de *Silla*<sup>\*</sup>, contrastado al tiempo que simple. En su capítulo de diseño de operaciones de separación se proponen ecuaciones para separadores gas-líquido, tanto verticales como horizontales. Debe partirse, en primera instancia de la suposición de disposición vertical y verificar *a posteriori* la relación de

---

\* Chemical Process Engineering. Design and Economics. H. Silla. Marcel Dekker, 2003

altura a diámetro H/D. Si esta relación no supera el valor de 5, deberá disponerse el separador verticalmente.

Lo anterior lleva a un cálculo iterativo en base a las expresiones (A2.19), lo que se ahorrará al lector, anticipándole la necesidad de disponer horizontalmente el separador, ya que la relación de altura a diámetro supera el valor de 5. Las ecuaciones indicadas para el dimensionado de un separador horizontal son las que sigue:

Inicialmente debe determinarse el diámetro de la unidad separadora. A tal propósito se resuelven sucesivamente las siguientes ecuaciones:

$$(A2.114) \left\{ \begin{array}{l} v_{V'}(\text{ft/s}) = 1,25 \cdot k_V(\text{ft/s}) \cdot \sqrt{\frac{\rho_{L'} - \rho_{V'}}{\rho_{V'}}} \quad (1) \\ A(\text{ft}^2) = \frac{V'(\text{ft}^3/\text{s})}{0,5 \cdot v_{V'}(\text{ft/s})} \quad (2) \\ A = \pi \frac{D^2}{4} \Rightarrow D(\text{ft}) = \sqrt{\frac{4A(\text{ft}^2)}{\pi}} \quad (3) \end{array} \right.$$

Donde  $v_V$  corresponde a la velocidad lineal del vapor,  $k_V$  es una constante de corrección que depende del extractor de neblina instalado; puesto que no se instala extractor de neblina, *Silla* proporciona un valor de  $k_V = 0,1$  ft/s. Asimismo,  $V'$  es el caudal de vapor de la operación "RECUPERACIÓN",  $A$  es el área de la sección transversal del separador y  $D$ , el diámetro perseguido.

Las densidades de líquido y vapor se proporcionan al principio del apartado y los caudales de líquido y vapor, en la sección anterior.

La aplicación de (A2.114) se tabula seguidamente:

Dimensionado del separador vertical					
$k_v$ (ft/s)	0,1	$\rho_L$ (mol/cm <sup>3</sup> )	0,013	$\rho_V$ (mol/cm <sup>3</sup> )	$3,082 \cdot 10^{-4}$
$L'$ (Mmol/año)	4056,750	$V'$ (Mmol/año)	1074,077	1 ft → m	0,3048
1 año → s	31536000	$L$ (ft <sup>3</sup> /s)	0,361	$V$ (ft <sup>3</sup> /s)	3,903
$v_v$ (ft/s)	0,789	$A$ (ft <sup>2</sup> )	9,894	$D$ (ft)	3,549

Tabla. A2.CXIII. Cálculo del diámetro del separador

Las conversiones aplicadas para obtener un caudal volumétrico en unidades anglosajonas son análogas a las participadas por (A2.20).

Seguidamente, puede calcularse la longitud de la unidad. En primer lugar se seleccionará un tiempo de residencia del líquido, en el fondo del separador, comprendido en la horquilla de 7,5 a 10 minutos, ambos inclusive. A la sazón, se tomará 8 minutos y 45 segundos, (525 s) como tiempo intermedio. Así, puede aplicarse la última ecuación del método de cálculo:

$$L(\text{ft}) = \frac{L'(\text{ft}^3/\text{s}) \cdot t_s(\text{s})}{0,5 \cdot A(\text{ft}^2)} \quad (\text{A2.115})$$

Siendo  $L$  la longitud del recipiente,  $t_s$  el tiempo de residencia y  $A$ , el área transversal.  $L'$  es el caudal de líquido, obtenido en la sección anterior. Este método prevé un nivel de líquido de la mitad del recipiente. Asimismo deberá instalarse, en la tubuladura de salida, un rompedor de vórtice radial de paletas (*radial vane vortex breaker*, véase Figura A2.42) con un ancho de dos veces el diámetro del tubo de descarga, (se indicará ulteriormente tal dimensión) y una altura, sobre tal descarga, de un diámetro. Se obtiene, finalmente:

Dimensionado del separador vertical					
$t_s$ (s)	525	$L$ (ft)	38,307	$L/D$	6,965

Tabla. A2.CXIV. Cálculo de la altura del separador

Donde se ha incluido la relación de altura, o por mayor corrección longitud, a diámetro, tomando tales magnitudes de las dos ta-

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

blas anteriores. Se verifica el criterio de L/D superior a 5, con lo que el separador queda dimensionado y conforme.

Por tanto, la unidad “RECUPERACIÓN” se compone de un único separador que presenta las siguientes dimensiones:

- Longitud de casco sin incluir cabezales, (de costura a costura), de 38,307 ft (11,7 m).
- Diámetro interno de 3,549 ft (1,1 m).
- El rompedor de vórtices tendrá un diámetro de dos veces la tubuladura inferior y una altura de al menos un diámetro.
- El nivel de líquido en el separador es la mitad de su diámetro, esto es, 1,774 ft (0,5 m) y el tiempo de residencia de 8 minutos y 45 segundos (525 s).

Se sigue en los próximos apartados el diseño mecánico del separador.

### A2.C6.2.2. Diseño mecánico (I). Determinación de la presión de diseño

En adelante se evitará repetir procedimientos ya mostrados con anterioridad, por lo que se presenta directamente la tabla conteniendo la información concerniente al apartado en cuestión, y se emplaza al lector a la revisión del capítulo primero del presente anexo, donde se proporcionan las expresiones y datos precisos para el cálculo.

Cálculo para $P_{\text{agua}}$		Cálculo para $P_{\text{diseño}}$	
<b>H (ft)</b>	38,307	<b><math>P_{\text{operación}}</math> (atm)</b>	9
<b>T (ft)</b>	3,549	<b>10% P (atm)</b>	0,9
<b>V (m<sup>3</sup>)</b>	10,732	<b>30 psi (atm)</b>	2,041
<b>S (m<sup>2</sup>)</b>	39,682	<b><math>P_{\text{diseño}}</math> (psi)</b>	<b>162,648</b>
<b><math>m_{\text{agua}}</math> (kg)</b>	10732,342		
<b><math>p_{\text{agua}}</math> (N)</b>	105248,323		
<b><math>P_{\text{agua}}</math> (atm)</b>	0,026		

Tabla. A2.CXV. Cálculo de la presión de diseño

A2.C6.2.3. Diseño mecánico (II). Determinación de espesores para el casco y los cabezales sometidos a presión interna

Se obtiene para el casco:

Espesor por presión interna	
<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	162,648
<b>S (psi)</b>	13800
<b>E</b>	0,85
<b>R (in) (interior)</b>	21,296
<b>D (in) (interior)</b>	42,591
<b>C.A. (in) (20 años)</b>	0,1
<b>t (in)</b>	<b>0,299</b>
<b>t<sub>c,pi</sub> (in) (20 años)</b>	<b>0,399</b>
<b>P<sub>adm</sub> (psi)</b>	<b>238,047</b>
<b>t<sub>c,circ</sub> (in) (20 años)</b>	<b>0,248</b>

Tabla. A2.CXVI. Cálculo del espesor de casco sometido a presión interna

El material seleccionado para el separador es acero al carbono según especificación SA-285 grado C. Se vuelve a emplear tal material debido a su económico precio y suficiente resistencia mecánica y a la corrosión para el uso a que se dirige. Nuevamente se observa que el régimen longitudinal de esfuerzos predomina sobre el circunferencial y la presión admisible supera la de diseño. Lo que proporciona un espesor comercial:

$$t_{c,pi} = 7/16 \text{ de pulgada (11,11 mm)}$$

Este será el espesor final de casco sometido a presión interna, que se empleará en cálculos posteriores.

Los cabezales en este caso son del tipo “*Korboggen*” tal como se recomendó, en el primer capítulo del presente anexo, para una presión de operación entre 6,8 y 10 atm. La única variación respecto a las ecuaciones dadas, al objeto de estimar el espesor de cabezales

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

a presión interna, consiste en sustituir L, el radio de curvatura por 0,8 veces el diámetro. Así, se obtiene:

Espesor por presión interna	
<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	162,648
<b>D (in) (interior)</b>	42,591
<b>S (psi)</b>	13800
<b>E</b>	1
<b>M</b>	1,54
<b>C.A. (in) (20 años)</b>	0,1
<b>t (in)</b>	<b>0,310</b>
<b>t<sub>cab,pi</sub> (in) (20 años)</b>	<b>0,410</b>
<b>P<sub>adm</sub> (psi)</b>	<b>262,494</b>

Tabla. A2.CXVII. Cálculo del espesor de cabezales sometidos a presión interna

La presión admisible supera la de diseño, por lo que el cálculo es conforme. Así, se toma para cada cabezal el siguiente espesor comercial:

$$t_{cab,pi} = 1/2 \text{ de pulgada (12,7 mm)}$$

Según normas de diseño mecánico, el espesor de los cabezales debe ser superior al del casco, a fin de asegurar un cierre adecuado. Por ello se ha aumentado una fracción comercial respecto a lo calculado.

### A2.C6.2.4. Diseño mecánico (III). Determinación del espesor del aislamiento y de la chapa envolvente

Para el caso de temperatura de operación superior a la ambiental, se ha estimado un espesor requerido de 10 mm, frente a 50 mm para temperatura de operación inferior a la ambiente. Por tanto, se toma 50 mm (1,968 in) como espesor requerido de aislamiento.

$$t_{ais} = 50 \text{ mm}$$

El espesor de la envolvente se mantiene respecto del anterior capítulo de diseño mecánico de “SIMPLE”. En definitiva, se tiene como espesor de la envolvente de aluminio:

$$t_{env} = 0,61 \text{ mm}$$

Según normas ASTM B 209, incluirá recubrimiento corrosivo a base de papel *kraft* con película de polietileno para protección contra intemperie.

A2.C6.2.5. Diseño mecánico (IV). Determinación del peso del aparato en operación

Se excusa referir el procedimiento íntegro de cálculo y se emplaza al lector a la revisión del capítulo primero del presente anexo.

Únicamente debe precisarse el cambio del radio de curvatura a 0,8 veces el diámetro interno del recipiente, que deberá tomarse en cuenta al determinar  $r_i$  y  $r_e$  por la ecuación (A2.27).

Por su parte, la ecuación (A2.40.1) se modifica por la siguiente:

$$V_{sect.bomb.} (\text{in}^3) = 0,1 [D_{e,cab}^3 (\text{in}) - D_i^3 (\text{in})] \text{ (A2.116)}$$

Igualmente la ecuación (A2.45.1) se modifica por la siguiente:

$$V_{l,sect.bomb.} = 0,01 \cdot D_i^3 \text{ (A2.117)}$$

El resto permanece inalterado, teniendo en cuenta que no se prevé la instalación de plataformas o escalera, por lo que no cuentan en el peso final,  $m_{sep, op}$ .

Peso del separador					
$m_{casco} \text{ (lb)}$	7702,653	$m_{cabezales} \text{ (lb)}$	382,801	$m_{envolvente} \text{ (lb)}$	161,198
$m_{aislamiento} \text{ (lb)}$	303,308	$m_{armado} \text{ (lb)}$	8459,961	$m_{agua,rec} \text{ (lb)}$	24399,167
		$m_{sep,op} \text{ (lb)}$	33011,510		

Tabla. A2.CXVIII. Estimación del peso del separador

### A2.C6.2.6. Diseño mecánico (V). Diseño del soporte

Los recipientes horizontales descansan sobre silletas, elementos metálicos con forma de U que abrazan al recipiente por su zona inferior mediando una placa de desgaste que evita la corrosión de las mismas. Normalmente se utilizan dos silletas, fijándose una al terreno por cuatro pernos, (protegiendo la base de la silleta de los pernos por casquillos distanciadores), y concediendo libertad a la otra en previsión a posible contracción o dilatación térmica del recipiente que soportan.

El diseño de las silletas viene normalizado según el código STD-RP-004 de *CEPSA*, cuyas figuras se proporcionan al final del presente capítulo. Así, se tienen las siguientes dimensiones:

Cálculo del soporte					
<b>D<sub>e</sub> (mm)</b>	1214,792 (1400 mm)	<b>L (mm)</b>	11675,978	<b>A (mm)</b>	1240
<b>B (mm)</b>	865	<b>C (mm)</b>	12	<b>D (mm)</b>	16
<b>E (mm)</b>	460	<b>F (mm)</b>	130	<b>b (mm)</b>	200
<b>H (mm)</b>	45	<b>φ (mm)</b>	22	<b>* (mm)</b>	328

Tabla. A2.CXIX. Diseño de las silletas

Donde D<sub>e</sub> corresponde al diámetro externo, (el que suma al interno los dobles espesores por presión interna aislamiento y envolvente). El código solicita redondear a la siguiente magnitud disponible y ésta es 1400 mm como queda indicado. El resto de dimensiones están dadas en función de este redondeo. Se trata de:

- A: Largo de la base.
- B: Altura de la base desde la mitad del recipiente.
- C: Espesor de las chapas de sustentación.
- D: Espesor de la base.
- E: Distancia entre pernos contiguos de la base.
- F: Distancia entre pernos opuestos de la base.
- b: Ancho de la silleta.
- H: Distancia entre casquillos distanciadores.

- $\phi$ : Diámetro de los cuatro pernos.
- \*: Ancho de la placa de desgaste.

Esta última magnitud se calcula en función de otras conocidas según se indica en las figuras de final de capítulo. Por su parte, el espesor de la placa de desgaste, sumado al de la silleta deberá resultar 16 mm, (si el espesor de la silleta fuera superior, se prescindiría de dicha placa). Por último, debe indicarse el material de construcción de las silletas que deberá ser, tanto para el soporte como para la placa de desgaste acero al carbono según SA-515 grado 70.

Todas las magnitudes se encuentran tabuladas al final del capítulo.

#### A2.C6.2.7. Diseño mecánico (VI). Cálculo de las tubuladuras y refuerzos

La estimación del peso de las bridas de admisión y descarga requiere el dimensionado de las tuberías de la alimentación, del líquido y del vapor. El método de cálculo se explicó convenientemente en el capítulo primero del presente anexo, por lo que se omite su repetición.

Conocidas las velocidades óptimas y los caudales volumétricos, puede encontrarse el radio interno para las conducciones de alimentación, líquido y vapor. Se requieren las siguientes tuberías:

- Conducción de la alimentación: Trasiega el residuo de “EXTRACTIVA 2” a una presión de 5 atm.
- Conducción de líquido: Para descarga del líquido rico en extractante.
- Conducciones de vapor: Para la descarga del vapor, una corriente terminada del proceso.

Se presentan las tablas resumen de estas tres conducciones:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Cálculo de las conducciones: P-135					
<b>P (psi)</b>	132,264	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	162,264	<b>S (psi)</b>	15000
<b>X (Mmol/año)</b>	5130,827	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	0,012	<b>X (ft<sup>3</sup>/s)</b>	0,465
<b>A<sub>i,tubo</sub> (ft<sup>2</sup>)</b>	0,053	<b>R<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	1,557	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,119	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	1096,948	<b>D<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	<b>3,113</b>

Tabla. A2.CXX. Estimación del tamaño de la conducción de la alimentación

Cálculo de las conducciones: P-138					
<b>P (psi)</b>	132,264	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	162,264	<b>S (psi)</b>	15000
<b>L' (Mmol/año)</b>	4056,750	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	0,013	<b>L' (ft<sup>3</sup>/s)</b>	0,361
<b>A<sub>i,tubo</sub> (ft<sup>2</sup>)</b>	0,038	<b>R<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	1,313	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,118	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	1274,612	<b>D<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	<b>2,626</b>

Tabla. A2.CXXI. Estimación del tamaño de la conducción de líquido

Cálculo de las conducciones: P-136					
<b>P (psi)</b>	132,264	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	162,264	<b>S (psi)</b>	15000
<b>V' (Mmol/año)</b>	1074,077	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	3,082·10 <sup>-4</sup>	<b>V' (ft<sup>3</sup>/s)</b>	3,903
<b>A<sub>i,tubo</sub> (ft<sup>2</sup>)</b>	0,135	<b>R<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	2,491	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,131	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	762,027	<b>D<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	<b>4,981</b>

Tabla. A2.CXXII. Estimación del tamaño de la conducción de vapor

Con las conducciones conocidas, (se ha incluido sus denominaciones como figura en el plano que muestra el diagrama de flujo), resta sumar el peso de las bridas de alimentación y descarga de líquido y vapor de cada separador:

Cada separador contará con una brida de alimentación de diámetro nominal de 3 in, una brida de descarga de líquido de 2-1/2 in y otra de descarga de vapor de 5 in.

Todas las bridas se construirán en acero forjado según especificación SA-105; se clasifican por su clase de presión o, en inglés, "rating", expresadas en psi. La clase inferior de bridas, para servicios a baja presión como los requeridos para el presente diseño es de 150 psi ó 150#, como se nota técnicamente.

Para la clase de presión seleccionada, *Megyesy* proporciona una tabla de pesos de bridas, según diámetro nominal de las conducciones embridadas y tipo de brida. De dicha tabla se toman los pesos mostrados en la Tabla A2.CXXIII, para bridas de la clase 150# de tipo cuello soldable, según los distintos diámetros nominales de tubo asociado. La mencionada tabla de pesos, tomada de *Megyesy* se presentó al final del capítulo primero del segundo anexo.

Las bridas de cuello soldable son las más extensamente utilizadas en la industria petroquímica, para líneas de proceso. Esta aplicación se denomina de responsabilidad. Por ello, se seleccionan, para las tubuladuras de entrada y salida de corrientes, este tipo de bridas.

Las bridas se sueldan a un tubo de longitud determinada por normas, (según las dimensiones de las mismas) y, por forzar la pérdida de material al insertarse en el casco o cabezales del recipiente, pueden requerir refuerzo: aquéllas conducciones de 3 pulgadas, o menor espesor, introducidas en casco o cabezal de espesor de 3/8 de pulgada, o menos, no requieren refuerzo según normas *ASME*.

Se emplearán bridas de cuello soldable introducidas en el casco, (brida de alimentación), y cabezales, (brida de descarga de líquido y de descarga de vapor), con la mínima extensión para soldar y sobresaliendo, del casco una determinada longitud según normas. Esto obliga a soldar un tramo recto de tubería, que complemente la longitud de las bridas, tabulada en *Megyesy* y transcritas en las figuras finales del primer capítulo del anexo segundo, de modo tal que la longitud sobresaliente de la brida y el tramo de tubo sea conforme a las normas, también transcrita en el capítulo citado.

El peso de los tubos debe añadirse al nominal de la brida en la Tabla A2.CXXIII, multiplicando las longitudes correspondientes por el peso por pie de tubería, también proporcionado por *Megyesy*. Las dimensiones de las bridas, del tramo de tubo y el su peso por unidad

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

de longitud, se proporcionan en sendas figuras al final del capítulo primero del anexo segundo como queda indicado.

Con lo antedicho y las dimensiones tomadas de las figuras indicadas, se recopila y calculan los siguientes pesos de las tubuladuras:

<b>Peso de las tubuladuras</b>			
<b>Bridas P-136 (5" Sch 10)</b>		<b>Brida P-135 (3" Sch 30)</b>	
$W_{\text{brida } 150\#, 5"} \text{ (lb)}$	20	$W_{\text{brida } 150\#, 3"} \text{ (lb)}$	11,5
<b>Tubo 5", Sch 10 (ft)</b>	0,375	<b>Tubo 3", Sch 30 (ft)</b>	0,271
$W_{\text{tubo } 5", \text{ Sch } 10} \text{ (lb/ft)}$	7,77	$W_{\text{tubo } 3", \text{ Sch } 30} \text{ (lb/ft)}$	6,65
$W_{\text{tub } 5"} \text{ (lb)}$	22,914	$W_{\text{tub } 3"} \text{ (lb)}$	13,301
<b>Brida P-138 (2-1/2" Sch 10)</b>			
$W_{\text{brida } 150\#, 2,5"} \text{ (lb)}$	10		
<b>Tubo 2,5", Sch 10 (ft)</b>	0,271		
$W_{\text{tubo } 2,5", \text{ Sch } 10} \text{ (lb/ft)}$	3,53		
$W_{\text{tub } 2,5"} \text{ (lb)}$	10,956		
$m_{\text{bridas}} \text{ (lb)}$	<b>47,171</b>		

Tabla. A2.CXXIII. Peso de las tubuladuras

Donde los pesos  $W_{\text{brida } 150\#, \text{ DN}}$  son los pesos de brida de la categoría de 150 psi, correspondientes a los distintos diámetros nominales de las tuberías calculadas.

Las magnitudes "Tubo DN, Sch" incluyen las longitudes de los tramos de tubería soldados a las bridas, debidamente convertidas. A título de ejemplo, para una brida de 8" Sch 60 se soldará una tubería de longitud 4 pulgadas (0,333 ft) de modo que, según la magnitud C de la Figura A2.20 para la brida de 8 pulgadas, el conjunto sobresalga 8 pulgadas del cabezal de acuerdo a la Figura A2.19 del segundo anexo.

Los valores  $W_{\text{tubo } \text{DN}, \text{ Sch}}$  recogen el peso por pie de las distintas tuberías según su número de *Schedule* y diámetro nominal. Este peso se multiplica por la longitud de la tubería, de la fila previa, y se suma al peso de las bridas obteniéndose los pesos  $W_{\text{tub } \text{DN}}$ , el peso de las tubuladuras de distintos diámetros nominales.

Finalmente, el peso total,  $m_{\text{bridas}}$ , es la suma de los pesos individuales de las tubuladuras. A la sazón suman las masas de las tres bridas.

Por mor de lo indicado procede reforzar todas las bridas, ya que su diámetro nominal supera las 3 pulgadas o, en todo caso, el espesor del casco o cabezales es superior a 3/8 de pulgada, (7/16 de pulgada y 1/2 de pulgada respectivamente).

El refuerzo para las bridas consiste en un anillo que debe reponer la cantidad de metal eliminado por la abertura del, casco o cabezales, al perforarlo. El anillo de refuerzo se construye del mismo material que el casco y cabezales, (acero al carbono según especificación SA-285 grado C).

La Figura A2.13, del segundo anexo, muestra el dibujo esquemático y dimensiones asociadas al anillo de refuerzo.

El área transversal del anillo,  $A_{\text{ref}}$ , viene dada por la ecuación (A2.63) y las consideraciones efectuadas en el capítulo primero del anexo segundo siguen siendo válidas. Las dimensiones del refuerzo se calculan, a partir de la anterior ecuación, mediante (A2.64) y su peso, mediante (A2.65). Por tanto, se tienen los siguientes refuerzos:

<b>Cálculo de anillos de refuerzo: Torre primera</b>					
<b>Tubería de 5" (P-136)</b>					
<b>d (in)</b>	5,295	<b>t<sub>r</sub> (in)</b>	0,5	<b>A<sub>ref</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	2,648
<b>t<sub>ref</sub> (in)</b>	0,5	<b>a<sub>ref</sub> (in)</b>	2,648	<b>d<sub>i</sub> (in)</b>	5,563
	<b>d<sub>o</sub> (in)</b>	10,858	<b>m<sub>ref</sub> (lb)</b>	<b>9,674</b>	
<b>Tubería de 3" (P-135)</b>					
<b>d (in)</b>	3,124	<b>t<sub>r</sub> (in)</b>	0,4375	<b>A<sub>ref</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	1,367
<b>t<sub>ref</sub> (in)</b>	0,4375	<b>a<sub>ref</sub> (in)</b>	1,562	<b>d<sub>i</sub> (in)</b>	3,5
	<b>d<sub>o</sub> (in)</b>	6,624	<b>m<sub>ref</sub> (lb)</b>	<b>3,079</b>	
<b>Tubería de 2-1/2" (P-138)</b>					
<b>d (in)</b>	2,635	<b>t<sub>r</sub> (in)</b>	0,5	<b>A<sub>ref</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	1,318
<b>t<sub>ref</sub> (in)</b>	0,5	<b>a<sub>ref</sub> (in)</b>	1,318	<b>d<sub>i</sub> (in)</b>	2,875
	<b>d<sub>o</sub> (in)</b>	5,510	<b>m<sub>ref</sub> (lb)</b>	<b>2,458</b>	

Tabla. A2.CXXIV. Dimensiones y peso de los anillos de refuerzo

En cada refuerzo, se ha tomado bien el espesor del casco, bien el del cabezal, según corresponda al cuerpo en el que se inserta la brida. El peso de los tres refuerzos ya se incluyó en el del separador apartados atrás, así como el de las bridas.

#### A2.C6.2.8. Cálculo de orejas de izado y pintado del casco y cabezales

Los recipientes debe construirse incluyendo al menos un par de orejas de izado como las que muestra la Figura A2.15: eslabones atornillados a una base, con forma de oreja, soldada al casco. Se tienen las siguientes dimensiones para orejas resistentes hasta una carga de 8650 lb:

Cálculo de las orejas de izado					
<b>S (psi)</b>	17500	<b>W (lb)</b>	8612,343	<b>D (in)</b>	1
<b>D<sub>1</sub> (in)</b>	1,125	<b>H (in)</b>	1,31	<b>A (in)</b>	1,7
<b>B (in)</b>	2	<b>E (in)</b>	2,59	<b>t (in)</b>	<b>0,171</b>

Tabla. A2.CXXV. Dimensiones de las orejas de izado

La tabla de dimensiones relacionadas con el peso se ha tomado del libro de *Megyesy* y se muestra en la Figura A2.16.

El espesor de las orejas se redondea a 3/16 in. La soldadura se practica directamente al casco, (que también debe incluir clips de sujeción para el aislamiento y la chapa envolvente). Para la dimensión de la soldadura se considera la tabla de la Figura A2.17.

Puesto que el espesor de la placa más gruesa, (a la sazón el casco cuyo espesor es de 7/16 de pulgada frente a la oreja de 3/16 de pulgada), el tamaño de la soldadura de filete, o angular, será de 1/4 de pulgada. Esta dimensión corresponde al cateto del triángulo rectángulo isósceles mayor que puede inscribirse en el cordón.

Según normas, la longitud de la unión debe estar comprendida entre 15 y 60 veces el tamaño de la garganta, (la hipotenusa correspondiente al triángulo anterior). Así, se tiene:

$$l_{sold}(\text{in}) = 30 \cdot a(\text{in}) = 30 \cdot \sqrt{(1/4)^2 + (1/4)^2} \cong 11 \text{ in}$$

Donde  $a$  es la dimensión de la garganta, calculada a partir del teorema de *Pitágoras*. La longitud de la oreja será de 11 pulgadas.

Por último, las orejas de izado se colocan, según recomendaciones de ubicación tomadas de *Megyesy*, a 0,207 veces la longitud total del recipiente, (la oreja superior se coloca a una longitud igual a la total menos la cantidad mencionada).

En lo tocante a la pintura, es éste un elemento importante de protección frente a la corrosión bajo aislamiento, como queda explicado en el capítulo primero del segundo anexo.

Debe calcularse tanto la superficie del casco como la de los cabezales. Se obtiene:

Pintura			
$D_{e,c}(\text{in})$	47,451	$D_{e,cab}(\text{in})$	43,591
$L(\text{in})$	459,685	$t_{cab,pi}(\text{in})$	0,5
$S_{casco}(\text{in}^2)$	68526,547	$S_{cab}(\text{in}^2)$	1560,895
$e_{capa}(\text{in})$	0,001	$e_{capa}(\text{in})$	0,001
$V_{pint,casco}(\text{in}^3)$	68,526	$V_{pint,cabezales}(\text{in}^3)$	3,122
$V_{pint,casco}(\text{gal(US)})$	0,297	$V_{pint,cabezales}(\text{gal(US)})$	0,014
	$V_{pint,tot}(\text{gal(US)})$		0,651

Tabla. A2.CXXVI. Cálculo de volumen de pintura

Se ha seleccionado un sistema de pinturas siguiendo especificaciones del *Steel Structures Painting Council*, (SSPC). Dicho sistema viene recomendado para ambientes secos, no corrosivos en interior de edificios o protegidos temporalmente contra intemperie. No se han considerado condiciones excesivamente severas, ya que la ma-

yor parte del tiempo la estructura estará guarnecida por el aislamiento y chapa envolvente.

La identificación del sistema viene dada por SSPC-PS 7.01. No obliga al tratamiento previo, (sólo una limpieza de contaminantes superficiales del casco: grasa, tierra, entre otros componentes), y requiere un espesor de pintura seca de una milésima de pulgada, ( $e_{\text{capa}}$  en la Tabla A2.CXXVI).

El volumen de pintura de cada componente, (casco y cabezales) se ha calculado multiplicando la superficie por el espesor de la capa de pintura. En el caso de los cabezales, debe multiplicarse por dos el anterior volumen, (a fin de obtener el volumen requerido por los dos cabezales). El volumen final es la suma de los volúmenes del casco y los dos cabezales, convertido a galones estadounidenses, la unidad de referencia de los sistemas SSPC.

El sistema SSPC-PS 7.01 indica aplicar una mano de pintura de taller roja o café, cuyo contenido en sólidos es del 60%. Se exige una capa de pintura de espesor seco de una milésima de pulgada: cuando la pintura se seca, el espesor aplicado merma por la pérdida de volátiles, luego será necesario aumentar la cantidad de pintura aplicada el tanto por ciento correspondiente a los componentes volátiles: 40% para un contenido en sólidos del 60% como se muestra más arriba. El incremento del 40% se aplica multiplicando la suma de los volúmenes de casco y cabezales por 1,4.

Debe incrementarse un 50% la cantidad de pintura requerida en concepto de pérdidas por aplicación, (se trata del factor 1,5 de la última ecuación). Finalmente, el volumen de pintura se multiplica por la unidad, lo que deberá considerarse en la ecuación (A2.76) referida a los cuatro separadores requeridos por la operación "SIMPLE", en este caso sólo se precisa un equipo.

Se presentan seguidamente las tablas de dimensiones y pesos requeridas en algunos apartados, desde los que han sido previamente referenciadas.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

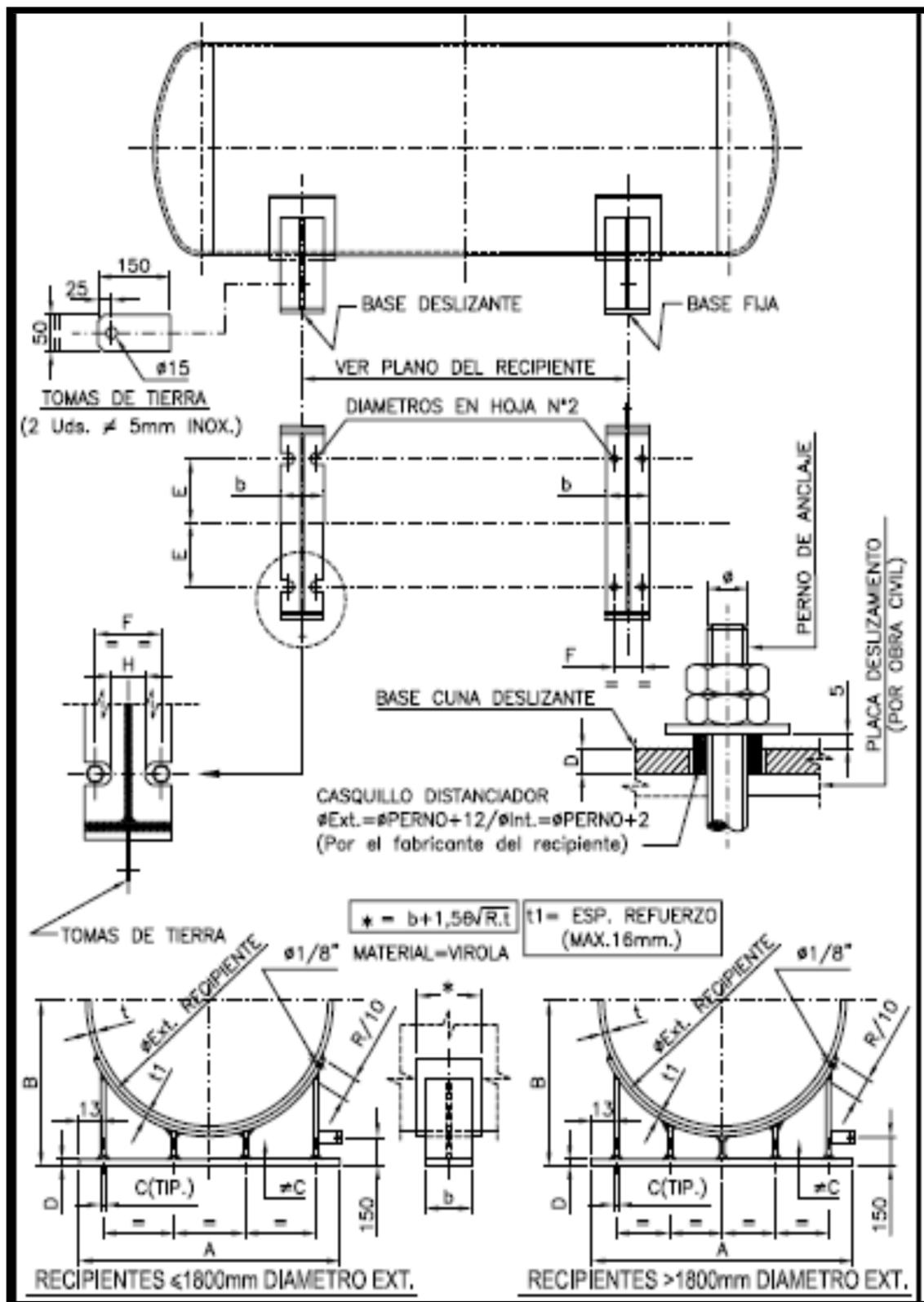


Figura. A2.43. Dimensiones de las silletas (1). (STD-RP-004, CEPSA)

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

ØEXT. RECIPIENTE	A	B	C	D	E	F	b	H	# PERNOS	#TAL. FIJO	#TAL. RASGADO
600	545	485	10	12	170	100	150	40	M-20	Ø24	Ø34
750	675	560	10	12	213	100	150	40			
900	805	635	10	12	255	100	150	40			
1100	980	710	10	12	330	100	150	40			
1200	1065	785	10	12	375	100	150	40			
1400	1240	865	12	16	460	130	200	45	M-22	Ø28	Ø36
1500	1325	940	12	16	500	130	200	45			
1700	1500	1015	12	16	590	130	200	45			
1800	1585	1090	12	16	630	130	200	45			
2000	1760	1170	12	16	720	130	200	45			
2100	1845	1245	12	16	760	130	200	45			
2300	2020	1320	12	16	850	130	200	45	M-24	Ø28	Ø36
2400	2105	1395	16	20	890	150	250	55			
2600	2280	1475	16	20	980	150	250	55			
2700	2365	1550	16	20	1020	150	250	55			
2900	2540	1625	16	20	1110	150	250	55			
3000	2625	1700	16	20	1150	150	250	55	M-27	Ø32	Ø41
3200	2800	1780	16	20	1240	150	250	55			
3400	2970	1855	16	20	1325	150	250	55			
3500	3060	1930	16	20	1370	150	250	55			
3700	3230	2005	16	20	1450	150	250	55			

**NOTAS:**

1- PARA RECIPIENTES DE DIAMETRO INTERMEDIO USAR LAS DIMENSIONES DE LA CUNA CORRESPONDIENTE AL DIAMETRO INMEDIATO SUPERIOR.

2- MATERIAL DEFINIDO EN EL PLANO DEL RECIPIENTE.

3- BASES, FIJA Y DESLIZANTE DEFINIDAS EN EL PLANO DEL RECIPIENTE.

Figura. A2.44. Dimensiones de las silletas (2). (STD-RP-004, CEPISA)



### **Capítulo A2.C7. Estrategia de recirculaciones**

Este breve capítulo cierra el anexo segundo de diseño de unidades y responde a la justificación de cálculos en recirculación de corrientes, que quedó pendiente en la memoria descriptiva, en su capítulo segundo.

Sin redundar en los detalles que describió la anterior, se mostrará cómo tomando los porcentajes de las corrientes indicadas se obtiene una mezcla que es idéntica en composición y caudal a aquella que alimenta a “EXTRACTIVA 1”. Las siguientes son las corrientes empleadas:

- V, vapor de la operación “SIMPLE”.
- L', líquido rico en extractante procedente de “RECUPERACIÓN”.
- D, destilado de “EXTRACTIVA 1”.
- H, destilado de “BINARIA”.
- Z, residuo de “BINARIA”, corriente rica en el compuesto de interés.
- M, corriente de reposición o *make-up* de extractante.

Ya se han proporcionado en el capítulo segundo de la memoria y se tabulan nuevamente junto al porcentaje de utilización preconizado en la misma:

Componente	$x_i$	(Mmol/año) <sub>i</sub>	Cantidad utilizada
<b>i-Butano (5)</b>	0,041	546,075	404,096
<b>i-Buteno (2)</b>	0,264	3498,264	2588,715
<b>1-Buteno (3)</b>	0,161	2128,526	1575,109
<b>Butadieno (1)</b>	0,440	5823,637	4309,492
<b>Cis-2-Buteno (4)</b>	0,093	1237,238	915,556
<b>Furfural (6)</b>	0,000	0,000	0,000
<b>V (Mmol/año)</b>		<b>13233,741</b>	<b>9792,968</b>
<b>%</b>		<b>74,000</b>	

Tabla. A2.CXXVII. Corriente V

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Componente	$x_i$	(Mmol/año) <sub>i</sub>	Cantidad utilizada
<b>Butadieno (1)</b>	0,071	287,424	281,404
<b>Cis-2-Buteno (2)</b>	0,081	328,563	321,682
<b>Furfural (3)</b>	0,848	3440,763	3368,696
<b>L' (Mmol/año)</b>		<b>4056,750</b>	<b>3971,782</b>
<b>%</b>		<b>97,906</b>	

Tabla. A2.CXXVIII. Corriente L'

Componente	$x_i$	(Mmol/año) <sub>i</sub>	Cantidad utilizada
<b>i-Butano (5)</b>	0,106	546,075	141,980
<b>i-Buteno (2)</b>	0,677	3498,264	909,549
<b>1-Buteno (3)</b>	0,206	1064,263	276,708
<b>Butadieno (1)</b>	0,011	58,236	15,141
<b>D (Mmol/año)</b>		<b>5166,839</b>	<b>1343,378</b>
<b>%</b>		<b>26,000</b>	

Tabla. A2.CXXIX. Corriente D

Componente	$x_i$	(Mmol/año) <sub>i</sub>	Cantidad utilizada
<b>1-Buteno (1)</b>	0,752	1060,525	275,694
<b>Butadieno (2)</b>	0,248	349,747	90,920
<b>H (Mmol/año)</b>		<b>1410,272</b>	<b>366,614</b>
<b>%</b>		<b>25,996</b>	

Tabla. A2.CXXX. Corriente H

Componente	$x_i$	(Mmol/año) <sub>i</sub>	Cantidad utilizada
<b>1-Buteno (1)</b>	0,001	4,357	1,015
<b>Butadieno (2)</b>	0,999	4836,519	1126,680
<b>Z (Mmol/año)</b>		<b>4840,876</b>	<b>1127,695</b>
<b>%</b>		<b>23,295</b>	

Tabla. A2.CXXXI. Corriente Z

Por último, la corriente de *make-up* se emplea en su totalidad, por lo que no se incluye el porcentaje entre la información, como en el resto de las tablas previas.

<b>Componente</b>	<b><math>x_i</math></b>	<b><math>(\text{Mmol/año})_i</math></b>
<b>Furfural <i>make-up</i></b>	1,000	72,077
<b>M (Mmol/año)</b>		<b>72,077</b>

Tabla. A2.CXXXII. Corriente M

En las tablas A2.CXXVII a A2.CXXXII, se ha incluido en la última columna el porcentaje que de cada corriente se emplea. Estas cantidades son fácilmente hallables multiplicando por el porcentaje consignado y dividiendo por 100 cada uno de los caudales individuales de componentes. El caudal global siempre es la suma de los individuales.

Si se suman todos los caudales individuales de componente utilizado, lo que sucede cuando se mezclan todas las corrientes, se obtiene la siguiente:

<b>Componente</b>	<b><math>(\text{Mmol/año})_i</math></b>	<b><math>x_i</math></b>
<b>i-Butano (5)</b>	546,075	0,033
<b>i-Buteno (2)</b>	3498,264	0,210
<b>1-Buteno (3)</b>	2128,526	0,128
<b>Butadieno (1)</b>	5823,637	0,349
<b>Cis-2-Buteno (4)</b>	1237,238	0,074
<b>Furfural (6)</b>	3440,773	0,206
<b>V (Mmol/año)</b>		<b>16674,514</b>

Tabla. A2.CXXXIII. Mezcla de corrientes

Donde por ejemplo el butadieno se ha calculado como suma de las tablas A2.CXXVII a A2.CXXXI:

$$4309,492 + 281,404 + 15,141 + 90,920 + 1126,680 = 5823,637 \frac{\text{Mmol}}{\text{año}}$$

Así, se ha obtenido una corriente idéntica en caudal y composición a la mostrada en la Tabla MD.VII, esto es, la alimentación de "EXTRACTIVA 1". De este modo se asegura una operación estable y una alta recuperación de extractante, como queda indicado.



FACULTAD DE CIENCIAS

TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO



# DOCUMENTOS DEL PROYECTO

## *TOMO II*

### • MEMORIA

#### ○ ANEXOS A LA MEMORIA

- ANEXO DE DISEÑO HIDRÁULICO DE UNIDADES
- ANEXO DE DISEÑO MECÁNICO DE UNIDADES
- ANEXO DE DISEÑO DE UNIDADES AUXILIARES

### • PLANOS

### • PLIEGO DE CONDICIONES

### • PRESUPUESTO



# Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Índice general

---

## **TOMO II**

### **ANEXO 3 (A3)**

Capítulo A3.C1. Diseño hidráulico de “EXTRACTIVA 1”	P.735
A3.C1.1. Datos previos	P.735
A3.C1.2. Determinación de propiedades físicas	P.739
A3.C1.2.1. Densidad de la fase líquida	P.739
A3.C1.2.2. Viscosidad de la fase líquida	P.740
A3.C1.2.3. Densidad de la fase vapor	P.743
A3.C1.2.4. Viscosidad de la fase vapor	P.747
A3.C1.2.5. Tensión superficial de corrientes	P.751
A3.C1.2.6. Difusividad del clave ligero en fase líquida	P.753
A3.C1.3. Diseño hidráulico	P.754
A3.C1.3.1. Recopilación y conversión de datos y propiedades	P.757
A3.C1.3.2. Determinación gráfica del nº de pasos por columna	P.759
A3.C1.3.3. Estimación de dimensiones previas	P.762
A3.C1.3.4. Fijación de los límites de operación	P.765
A3.C1.3.5. Cálculo reiterado de áreas de columna y otras dimensiones	P.767
A3.C1.3.6. Verificaciones de las magnitudes calculadas	P.776
con los límites de operación	
A3.C1.3.7. Estimación de las pérdidas de carga	P.784
A3.C1.4. Decisiones finales de diseño hidráulico	P.795
A3.C1.4.1. Determinación de eficacia por zonas	P.795

---

A3.C1.4.2. Decisión final de columna	P.802
A3.C1.4.3. Evaluación de alternativas	P.808
Capítulo A3.C2. Diseño hidráulico de “EXTRACTIVA 2”	P.821
A3.C2.1. Datos previos	P.821
A3.C2.2. Determinación de propiedades físicas	P.824
A3.C2.2.1. Densidad de la fase líquida	P.824
A3.C2.2.2. Viscosidad de la fase líquida	P.826
A3.C2.2.3. Densidad de la fase vapor	P.828
A3.C2.2.4. Viscosidad de la fase vapor	P.831
A3.C2.2.5. Tensión superficial de corrientes	P.834
A3.C2.2.6. Difusividad del clave ligero en fase líquida	P.836
A3.C2.3. Diseño hidráulico	P.837
A3.C2.3.1. Recopilación y conversión de datos y propiedades	P.839
A3.C2.3.2. Determinación gráfica del nº de pasos por columna	P.841
A3.C2.3.3. Estimación de dimensiones previas	P.842
A3.C2.3.4. Fijación de los límites de operación	P.844
A3.C2.3.5. Cálculo reiterado de áreas de columna y otras dimensiones	P.845
A3.C2.3.6. Verificaciones de las magnitudes calculadas	P.849
con los límites de operación	
A3.C2.3.7. Estimación de las pérdidas de carga	P.851
A3.C2.4. Decisiones finales de diseño hidráulico	P.855
A3.C2.4.1. Determinación de eficacia por zonas	P.855

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

### Índice general

---

A3.C2.4.2. Evaluación de alternativas	P.858
A3.C2.4.3. Decisión final de columna	P.870
Capítulo A3.C3. Diseño hidráulico de "MÚLTIPLE"	P.875
A3.C3.1. Datos previos	P.821
A3.C3.2. Determinación de propiedades físicas	P.878
A3.C3.2.1. Densidad de la fase líquida	P.878
A3.C3.2.2. Viscosidad de la fase líquida	P.880
A3.C3.2.3. Densidad de la fase vapor	P.881
A3.C3.2.4. Viscosidad de la fase vapor	P.884
A3.C3.2.5. Tensión superficial de corrientes	P.887
A3.C3.2.6. Difusividad del clave ligero en fase líquida	P.889
A3.C3.3. Diseño hidráulico	P.890
A3.C3.3.1. Recopilación y conversión de datos y propiedades	P.892
A3.C3.3.2. Determinación gráfica del nº de pasos por columna	P.894
A3.C3.3.3. Estimación de dimensiones previas	P.895
A3.C3.3.4. Fijación de los límites de operación	P.897
A3.C3.3.5. Cálculo reiterado de áreas de columna y otras dimensiones	P.898
A3.C3.3.6. Verificaciones de las magnitudes calculadas con los límites de operación	P.902
A3.C3.3.7. Estimación de las pérdidas de carga	P.904
A3.C3.4. Decisiones finales de diseño hidráulico	P.908
A3.C3.4.1. Determinación de eficacia por zonas	P.908

---

A3.C3.4.2. Evaluación de alternativas	P.912
A3.C3.4.3. Decisión final de columna	P.923
Capítulo A3.C4. Diseño hidráulico de “MÚLTIPLE”	P.929
A3.C4.1. Datos previos	P.929
A3.C4.2. Determinación de propiedades físicas	P.933
A3.C4.2.1. Densidad de la fase líquida	P.933
A3.C4.2.2. Viscosidad de la fase líquida	P.934
A3.C4.2.3. Densidad de la fase vapor	P.936
A3.C4.2.4. Viscosidad de la fase vapor	P.939
A3.C4.2.5. Tensión superficial de corrientes	P.942
A3.C4.2.6. Difusividad del clave ligero en fase líquida	P.943
A3.C4.3. Diseño hidráulico	P.944
A3.C4.3.1. Recopilación y conversión de datos y propiedades	P.946
A3.C4.3.2. Determinación gráfica del nº de pasos por columna	P.948
A3.C4.3.3. Estimación de dimensiones previas	P.949
A3.C4.3.4. Fijación de los límites de operación	P.951
A3.C4.3.5. Cálculo reiterado de áreas de columna y otras dimensiones	P.952
A3.C4.3.6. Verificaciones de las magnitudes calculadas	P.956
con los límites de operación	
A3.C4.3.7. Estimación de las pérdidas de carga	P.958
A3.C4.4. Decisiones finales de diseño hidráulico	P.962
A3.C4.4.1. Determinación de eficacia por zonas	P.962

# Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

## Índice general

---

A3.C4.4.2. Decisión final de columna	P.966
<b>ANEXO 4 (A4)</b>	
Capítulo A4.C1. Diseño mecánico de “EXTRACTIVA 1”	P.973
A4.C1.1. Introducción	P.973
A4.C1.2. Diseño mecánico de “EXTRACTIVA 1”	P.974
A4.C1.2.1. Diseño mecánico (I). Determinación de la presión de diseño	P.974
A4.C1.2.2. Diseño mecánico (II). Determinación de espesores para el casco, los cabezales y el cono reductor sometidos a presión interna	P.978
A4.C1.2.3. Diseño mecánico (III). Determinación del espesor del aislamiento y de la chapa envolvente	P.987
A4.C1.2.4. Diseño mecánico (IV). Determinación del espesor requerido para soportar la carga por viento	P.993
A4.C1.2.5. Diseño mecánico (V). Determinación del peso de los aparatos en operación	P.999
A4.C1.2.6. Diseño mecánico (VI). Determinación del espesor del faldón	P.1008
A4.C1.2.7. Diseño mecánico (VII). Determinación del espesor requerido para soportar la carga sísmica	P.1009
A4.C1.2.8. Diseño mecánico (VIII). Diseño del anillo de la base	P.1011
A4.C1.2.9. Diseño mecánico (IX). Cálculo de las tubuladuras y refuerzos	P.1015
A4.C1.2.10. Diseño mecánico (X). Iteración de cálculos	P.1027
A4.C1.2.11. Diseño mecánico (XI). Comprobaciones	P.1028
A4.C1.2.12. Cálculo de orejas de izado y pintado del casco y cabezales	P.1031
Capítulo A4.C2. Diseño mecánico de unidades principales	P.1039
A4.C2.1. Introducción	P.1039
A4.C2.2. Diseño mecánico de “EXTRACTIVA 2”	P.1040

---

A4.C2.2.1. Diseño mecánico (I). Determinación de la presión de diseño	P.1041
A4.C2.2.2. Diseño mecánico (II). Determinación de espesores para el casco y los cabezales	P.1042
A4.C2.2.3. Diseño mecánico (III). Determinación del espesor del aislamiento y de la chapa envolvente	P.1043
A4.C2.2.4. Diseño mecánico (IV). Determinación del espesor final requerido para soportar la carga por viento	P.1044
A4.C2.2.5. Diseño mecánico (V). Determinación del espesor final requerido para soportar la carga sísmica	P.1045
A4.C2.2.6. Diseño mecánico (VI). Determinación del peso final del aparato en operación	P.1045
A4.C2.2.7. Diseño mecánico (VII). Diseño final del anillo de la base	P.1046
A4.C2.2.8. Diseño mecánico (VIII). Cálculo de las tubuladuras y refuerzos	P.1047
A4.C2.2.9. Diseño mecánico (IX). Comprobaciones	P.1055
A4.C2.2.10. Cálculo de orejas de izado y pintado del casco y cabezales	P.1057
A4.C2.3. Diseño mecánico de "MÚLTIPLE"	P.1060
A4.C2.3.1. Diseño mecánico (I). Determinación de la presión de diseño	P.1061
A4.C2.3.2. Diseño mecánico (II). Determinación de espesores para el casco y los cabezales	P.1062
A4.C2.3.3. Diseño mecánico (III). Determinación del espesor del aislamiento y de la chapa envolvente	P.1063
A4.C2.3.4. Diseño mecánico (IV). Determinación del espesor final requerido para soportar la carga por viento	P.1064
A4.C2.3.5. Diseño mecánico (V). Determinación del espesor final requerido para soportar la carga sísmica	P.1065

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

### Índice general

---

A4.C2.3.6. Diseño mecánico (VI). Determinación del peso final del aparato en operación	P.1065
A4.C2.3.7. Diseño mecánico (VII). Diseño final del anillo de la base	P.1066
A4.C2.3.8. Diseño mecánico (VIII). Cálculo de las tubuladuras y refuerzos	P.1067
A4.C2.3.9. Diseño mecánico (IX). Comprobaciones	P.1074
A4.C2.3.10. Cálculo de orejas de izado y pintado del casco y cabezales	P.1076
A4.C2.4. Diseño mecánico de "BINARIA"	P.1079
A4.C2.4.1. Diseño mecánico (I). Determinación de la presión de diseño	P.1080
A4.C2.4.2. Diseño mecánico (II). Determinación de espesores para el casco y los cabezales	P.1081
A4.C2.4.3. Diseño mecánico (III). Determinación del espesor del aislamiento y de la chapa envolvente	P.1082
A4.C2.4.4. Diseño mecánico (IV). Determinación del espesor final requerido para soportar la carga por viento	P.1083
A4.C2.4.5. Diseño mecánico (V). Determinación del espesor final requerido para soportar la carga sísmica	P.1084
A4.C2.4.6. Diseño mecánico (VI). Determinación del peso final del aparato en operación	P.1084
A4.C2.4.7. Diseño mecánico (VII). Diseño final del anillo de la base	P.1085
A4.C2.4.8. Diseño mecánico (VIII). Cálculo de las tubuladuras y refuerzos	P.1086
A4.C2.4.9. Diseño mecánico (IX). Comprobaciones	P.1094
A4.C2.4.10. Cálculo de orejas de izado y pintado del casco y cabezales	P.1096

---

**ANEXO 5 (A5)**

Capítulo A5.C1. Red de tuberías y bombeo	P.1103
A5.C1.1. Planteamiento general	P.1103
A5.C1.2. Descripción teórica	P.1104
A5.C1.2.1. Longitud de las conducciones	P.1104
A5.C1.2.2. Pérdida de carga por fricción	P.1106
A5.C1.2.3. Carga de altura	P.1108
A5.C1.2.4. Carga de presión	P.1109
A5.C1.2.5. Pérdida total de carga	P.1109
A5.C1.2.6. Potencia de bombeo estimada	P.1110
A5.C1.3. Tablas de resultados	P.1112
Capítulo A5.C2. Diseño de acumuladores de reflujo	P.1131
A5.C2.1. Introducción	P.1131
A5.C2.2. Dimensionado hidráulico	P.1131
A5.C2.3. Diseño mecánico	P.1135
A5.C2.3.1. Diseño mecánico (I). Determinación de la presión de diseño	P.1135
A5.C2.3.2. Diseño mecánico (II). Determinación de espesores para el casco y los cabezales sometidos a presión interna	P.1136
A5.C2.3.3. Diseño mecánico (III). Determinación del espesor del aislamiento y de la chapa envolvente	P.1136
A5.C2.3.4. Diseño mecánico (IV). Determinación del peso del aparato en operación	P.1137
A5.C2.3.5. Diseño mecánico (V). Diseño del soporte	P.1137
A5.C2.3.6. Diseño mecánico (VI). Cálculo de las tubuladuras y refuerzos	P.1139

# Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

## Índice general

---

A5.C6.3.7. Cálculo de orejas de izado y pintado del casco y cabezales	P.1140
Capítulo A5.C3. Estimación de cambiadores de calor	P.1143
A5.C3.1. Introducción	P.1143
A5.C3.2. Fundamento teórico	P.1143
A5.C3.2.1. Cálculo de calderines	P.1144
A5.C3.2.2. Cálculo de condensadores	P.1147
A5.C3.2.3. Cálculo de calentadores y refrigerantes	P.1149
A5.C3.3. Calores y áreas de intercambio	P.1150
Capítulo A5.C4. Dimensionado de tanques	P.1153
A5.C4.1. Diseño de los tanques cilíndricos	P.1153
A5.C4.2. Diseño del tanque esférico	P.1160

### **PLANOS**

P1 Ubicación del proceso
P2 Distribución en terreno
P3 Diagrama de flujo del proceso
P4 Alzado de los recipientes de "SIMPLE"
P5 Planta de los recipientes de "SIMPLE"
P6 Alzado de los recipientes de "EXTRACTIVA 1"
P7 Alzado de los recipientes de "EXTRACTIVA 2"
P8 Alzado de los recipientes de "MÚLTIPLE"
P9 Alzado de los recipientes de "BINARIA"
P10 Recipiente de "RECUPERACIÓN"
P11 Acumuladores de proceso
P12 Tanques de proceso

---

P13 Esfera de almacenamiento

**PLIEGO DE CONDICIONES**

PC.C1. Generalidades	P.1169
PC.C1.1. Objeto	P.1169
PC.C1.2. Documentos que definen las obras	P.1169
PC.C1.3. Obras accesorias no especificadas en el proyecto	P.1170
PC.C1.4. Contradicciones, omisiones o errores	P.1170
PC.C2. Condiciones generales de índole facultativa	P.1171
PC.C2.1. Obligaciones y derechos del contratista	P.1171
PC.C2.2. Trabajo, materiales y medios auxiliares	P.1173
PC.C2.2.1. Libro de órdenes	P.1173
PC.C2.2.2. Comienzo de los trabajos y plazo de ejecución	P.1173
PC.C2.2.3. Condiciones generales de ejecución de los trabajos	P.1173
PC.C2.2.4. Personal técnico	P.1174
PC.C2.2.5. Trabajos nocturnos	P.1175
PC.C2.2.6. Accidentes de trabajo	P.1175
PC.C2.2.7. Trabajos defectuosos	P.1176
PC.C2.2.8. Equipos de maquinaria	P.1176
PC.C2.2.9. Materiales no utilizables o defectuosos	P.1176
PC.C2.2.10. Medios auxiliares	P.1177
PC.C2.2.11. Precauciones especiales	P.1177
PC.C2.2.12. Señalización de las obras	P.1178

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

### Índice general

---

PC.C2.3. Recepción y liquidación	P.1178
PC.C2.3.1. Recepción provisional de las obras	P.1178
PC.C2.3.2. Período de garantías	P.1179
PC.C2.3.3. Recepción definitiva	P.1180
PC.C2.3.4. Documentación final de la obra	P.1181
PC.C2.4. Facultades de la dirección de obra	P.1181
PC.C3. Condiciones generales de índole económica	P.1182
PC.C3.1. Percepción económica del contratista	P.1182
PC.C3.2. Precios unitarios	P.1182
PC.C3.4. Fijación de precios unitarios no contratados	P.1183
PC.C3.5. Variaciones en los precios unitarios	P.1184
PC.C3.6. Obras complementarias. Cambios de materiales	P.1184
PC.C3.7. Valoración y abono de los trabajos	P.1185
PC.C3.7.1. Forma de abono de las obras	P.1185
PC.C3.7.2. Abono de unidades de obra ejecutadas	P.1185
PC.C3.7.3. Relaciones valoradas y certificaciones	P.1185
PC.C3.7.4. Liquidaciones parciales	P.1185
PC.C3.7.5. Documentación final de la obra	P.1185
PC.C3.7.6. Pagos	P.1186
PC.C3.7.7. Suspensión o retraso en el ritmo de los trabajos	P.1186
PC.C4. Condiciones generales de índole legal	P.1186
PC.C4.1. El contrato	P.1187

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Índice general

---

PC.C4.2. Arbitraje obligatorio	P.1187
PC.C4.3. Jurisdicción competente	P.1187
PC.C4.4. Responsabilidad del contratista	P.1188
PC.C4.5. Causas de rescisión del contrato	P.1188
PC.C5. Condiciones generales técnicas de los materiales y equipos	P.1190
PC.C5.1. Referencias y normativas	P.1190
PC.C5.2. Condiciones para los materiales	P.1192
PC.C5.2.1. Condiciones generales para los materiales	P.1192
PC.C5.2.2. Acopios	P.1193
PC.C5.2.3. Condiciones para las tuberías	P.1194
PC.C5.2.4. Condiciones para las bridas	P.1195
PC.C5.2.5. Condiciones para los accesorios soldables	P.1195
PC.C5.2.6. Cond. de las placas de fabricación de los equipos	P.1195
PC.C5.3. Condiciones para los equipos	P.1196
PC.C5.3.1. Cond. para los cambiadores de calor y tanques	P.1196
PC.C5.3.2. Cond. para las bombas	P.1196
PC.C5.3.4. Condiciones para los equipos reutilizados	P.1197
PC.C5.4. Condiciones para los equipos	P.1197
PC.C5.4.1. Condiciones sobre pintura y preparación de superficies	P.1197
PC.C5.4.2. Condiciones para los aislamientos	P.1198
PC.C6. Condiciones generales de los equipos a presión	P.1198

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

### Índice general

---

PC.C6.1. Definiciones generales	P.1198
PC.C6.1.1. Aparatos sometidos a presión	P.1199
PC.C6.1.2. Tuberías	P.1199
PC.C6.1.3. Sistemas	P.1199
PC.C6.1.4. Diseño mecánico	P.1199
PC.C6.1.5. Ingeniería	P.1199
PC.C6.1.6. Fabricante	P.1200
PC.C6.1.7. Reparador	P.1200
PC.C6.1.8. Instalador	P.1200
PC.C6.1.9. Usuario	P.1201
PC.C6.1.10. Inspecciones y pruebas periódicas	P.1201
PC.C6.1.11. Inspector propio	P.1201
PC.C6.1.12. Inspecciones y pruebas previas	P.1201
PC.C6.1.13. Control de calidad	P.1201
PC.C6.2. Definiciones de ámbito técnico	P.1201
PC.C6.2.1. Presión de diseño ( $P_d$ )	P.1201
PC.C6.2.2. Presión máxima de servicio ( $P_{ms}$ )	P.1202
PC.C6.2.3. Presión de precinto	P.1202
PC.C6.2.4. Presión de servicio ( $P_s$ )	P.1202
PC.C6.2.5. Presión de prueba ( $P_p$ )	P.1202
PC.C6.2.6. Temperatura máxima de servicio ( $T_s$ )	P.1202
PC.C6.2.7. Temperatura de servicio ( $T_s$ )	P.1202

---

PC.C6.3. Condiciones generales para todos los aparatos	P.1203
PC.C6.3.1. Manual de diseño	P.1203
PC.C6.3.2. Certificados	P.1204
PC.C6.3.3. Proceso de fabricación	P.1204
PC.C6.3.4. Legalización de aparatos a presión	P.1204
PC.C6.3.5. Instalación	P.1205
PC.C6.3.6. Inspecciones y pruebas	P.1206
PC.C6.3.7. Placas	P.1209
PC.C6.3.8. Elementos de seguridad	P.1209
PC.C6.4. Prueba para las tuberías	P.1210
PC.C6.5. Prueba de los sistemas antes de la puesta en marcha	P.1210
PC.C6.5.1. Prueba hidrostática	P.1210
PC.C6.5.2. Lavado del equipo	P.1211
PC.C6.5.3. Comprobación de servicios auxiliares	P.1212
PC.C7. Ejecución de las obras	P.1213
PC.C7.1. Ejecución en general	P.1213
PC.C7.2. Replanteo	P.1213
PC.C7.3. Comprobación del replanteo	P.1213
PC.C7.4. Fijación de los puntos de replanteo	P.1214
PC.C7.5. Programación de los trabajos	P.1214
PC.C7.6. Ensayos	P.1215
PC.C7.7. Orden de los trabajos	P.1216

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

### Índice general

---

PC.C7.8. Ejecución en general	P.1216
<b><u>PRESUPUESTO</u></b>	
Capítulo C.C1. Introducción	P.1219
Capítulo C.C2. Estado de mediciones y presupuestos	P.1220
C.C2.1. Cálculo de precio de recipientes a presión	P.1221
C.C2.2. Cálculo de precio de tanques	P.1225
C.C2.3. Cálculo del precio de cambiadores de calor	P.1226
C.C2.4. Cálculo del precio de bombas	P.1228
C.C2.5. Presupuesto de ejecución material	P.1230
C.C2.6. Presupuesto de ejecución por contrata	P.1231
Capítulo C.C3. Estudio de costes e ingresos	P.1231
Capítulo C.C4. Presupuesto general	P.1236



# Documento 1. Memoria

---

## Anexo 3. Diseño hidráulico de unidades

1. Diseño hidráulico de "EXTRACTIVA 1"
2. Diseño hidráulico de "EXTRACTIVA 2"
3. Diseño hidráulico de "MÚLTIPLE"
4. Diseño hidráulico de "BINARIA"



## **Capítulo A3.C1. Diseño hidráulico de “EXTRACTIVA 1”**

### **A3.C1.1. Datos previos**

El diseño hidráulico de las columnas de platos requiere la evaluación de una serie de ecuaciones en las que se involucran diversas consideraciones, acerca del flujo de fluidos que en ésta acontece.

Parámetros como las velocidades de inundación y lloriqueo, el arrastre fraccional de líquido y su correcto flujo, así como las pérdidas de carga entre platos, pueden estimarse a través de distintas ecuaciones y gráficas que vinculan distintas propiedades físicas.

El objeto de este anexo radica en proveer de tales propiedades al proceso de dimensionamiento de la columna, así como del propio diseño hidráulico de la torre denominada “EXTRACTIVA 1”.

El diseño hidráulico de las columnas de platos viene necesariamente precedido de la obtención de propiedades físicas de las corrientes circulantes. A la sazón, se hace preciso definir los caudales y composiciones de las mismas, como información preliminar a la hora de generar las antedichas propiedades.

La alimentación de “EXTRACTIVA 1” consistirá en la siguiente corriente:

<b>Componente</b>	<b><math>x_{Fi}</math></b>	<b>(Mmol/año)<sub>i</sub></b>
<b>i-Butano (5)</b>	0,033	546,075
<b>i-Buteno (2)</b>	0,210	3498,264
<b>1-Buteno (3)</b>	0,128	2128,526
<b>Butadieno (1)</b>	0,349	5823,637
<b>Cis-2-buteno (4)</b>	0,074	1237,238
<b>Furfural (6)</b>	0,206	3440,773
<b>U (Mmol/año)</b>	<b>16674,514</b>	

Tabla. A3.I. Composición de la corriente U, alimentación de “EXTRACTIVA 1”

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Los componentes de la alimentación se han ordenado por volatilidad creciente. Una vez se establecen como clave ligero el componente 1-buteno y como pesado el butadieno, (de interés), y fijados los porcentajes de cada uno de ellos en las corrientes de destilado y residuo, estas últimas quedan definidas según:

Componente	$x_{Di}$	(Mmol/año) <sub>i</sub>	Componente	$x_{Wi}$	(Mmol/año) <sub>i</sub>
i-Butano (5)	0,106	546,075	1-Buteno (3)	0,092	1064,263
i-Buteno (2)	0,677	3498,264	Butadieno (1)	0,501	5765,401
1-Buteno (3)	0,206	1064,263	Cis-2-buteno (4)	0,108	1237,238
Butadieno (1)	0,011	58,236	Furfural (6)	0,299	3440,773
<b>D (Mmol/año)</b>	<b>5166,839</b>		<b>W (Mmol/año)</b>	<b>11507,675</b>	

Tabla. A3.II. Composiciones de las corrientes D y W, destilado y residuo de “EXTRACTIVA 1”

Donde se ha decidido que un 50% del clave ligero se recoja en el destilado así como un 1% del clave pesado. Los componentes no clave ligeros se recogen enteramente en el destilado y, de la misma forma, los no clave pesados se obtienen junto al residuo. Conocidas la corriente de alimentación y de destilado y residuo, pueden balancearse el resto de las corrientes de columna, partiendo del balance al condensador total y los datos obtenidos a partir de la resolución por el método FUG, (véase anexo correspondiente):

$$(A3.1) \begin{cases} V = L + D & (1) \\ R_D = L/D \cong 3,40 & (2) \end{cases}$$

De donde  $V$  es el vapor saliente de columna que se dirige al condensador,  $L$  es el líquido condensado totalmente y retornado a columna y  $D$  es el destilado, la fracción de líquido que se retira de la unidad y se envía en parte a “BLENDING de EXTRACTIVA 1”. Por su parte,  $R_D$  es la relación de reflujo externa estimada por aplicación de la ecuación de *Underwood*.

Operando con los datos de la Tabla A3.II y aplicando la ecuación (A3.1):

$$\begin{cases} L = R_D \cdot D = 3,40 \cdot 5166,389 \cong 17593,121 \text{ Mmol/año} \\ V = L + D = 17593,121 + 5166,839 \cong 22759,960 \text{ Mmol/año} \end{cases}$$

Considerando a continuación el balance al plato de alimentación:

$$(A3.2) \begin{cases} L' = L + \phi U \quad (1) \\ V = V' + (1 - \phi)U \quad (2) \end{cases}$$

Donde  $\phi$  es la condición de alimentación, a la sazón la unidad por tratarse ésta de un líquido a su temperatura de ebullición; se tiene:

$$\begin{cases} L' = L + U = 17593,121 + 16674,514 \cong 34267,634 \text{ Mmol/año} \\ V = V' \cong 22759,510 \text{ Mmol/año} \end{cases}$$

Las corrientes  $L'$  y  $V'$ , responden al flujo de líquido y vapor en la sección de agotamiento. Multiplicando las corrientes por el factor de conversión:  $\frac{1000 \text{ kmol}}{1 \text{ Mmol}} \cdot \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ días}} \cdot \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}}$ , se obtienen los siguientes resultados en unidades más convenientes:

Balance de materia					
<b>U (kmol/h)</b>	<b>1903,483</b>	<b>D (kmol/h)</b>	<b>589,822</b>	<b>W (kmol/h)</b>	<b>1313,661</b>
<b>L (kmol/h)</b>	<b>2008,347</b>	<b>V (kmol/h)</b>	<b>2598,169</b>		
<b>L' (kmol/h)</b>	<b>3911,830</b>	<b>V' (kmol/h)</b>	<b>2598,169</b>		

Tabla. A3.III. Caudales de las corrientes de “EXTRACTIVA 1”

Con las corrientes y sus composiciones definidas, puede procederse a la determinación de las propiedades requeridas para el procedimiento de diseño hidráulico de la columna. Tales propiedades son las que siguen: Densidad de fase líquida,  $\rho_L$ , y densidad de fase vapor,  $\rho_V$ , viscosidad de fase líquida y fase vapor,  $\mu_L$  y  $\mu_V$  respectivamente, tensión superficial del líquido,  $\sigma$ , y difusividad del componente clave ligero en fase líquida.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Dado que el diseño hidráulico de las zonas de rectificación y agotamiento de la columna dependerá de las características del flujo, se determinarán las propiedades del destilado, el residuo y el fluido que alimenta a la columna, siendo éstas las regiones críticas de la misma. De esta forma, las composiciones de líquido y vapor en las mencionadas regiones, así como las temperaturas correspondientes se consignan en las siguientes tablas:

Composición fase líquida							
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$T_L$ (K)
<b>Destilado</b>	0,011	0,677	0,206	0,000	0,106	0,000	297,688
<b>Plato alimentación</b>	0,349	0,210	0,128	0,074	0,033	0,206	301,392
<b>Residuo</b>	0,501	0,000	0,092	0,108	0,000	0,299	303,917

Tabla. A3.IV. Composición y temperatura del líquido para las distintas corrientes

Composición fase vapor							
	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_6$	$T_V$ (K)
<b>Destilado</b>	0,011	0,677	0,206	0,000	0,106	0,000	297,713
<b>Plato alimentación</b>	0,422	0,285	0,165	0,071	0,056	0,001	301,392
<b>Residuo</b>	0,711	0,000	0,154	0,134	0,000	0,001	303,917

Tabla. A3.V. Composición y temperatura del vapor para las distintas corrientes

Donde las corrientes de alimentación y residuo se encuentran en equilibrio, (de ahí las temperaturas coincidentes del líquido y el vapor), mientras que el destilado presenta una composición equivalente al vapor saliente de columna, al ser este condensado totalmente y retornado parcialmente a columna. Es por ello que la fase líquida y vapor del destilado no se encuentran en equilibrio y, como consecuencia, las temperaturas de ambas fases no son coincidentes, (se incidirá sobre este punto en el anexo de diseño de cambiadores de calor asociados a las columnas).

### **A3.C1.2. Determinación de propiedades físicas**

#### **A3.C1.2.1. Densidad de la fase líquida**

El cálculo de la densidad de la fase líquida se practica haciendo uso de la ecuación de *Rackett*\* para la estimación de volumen de líquido saturado:

$$(A3.3) \begin{cases} V_i^{Lsat} \text{ (L/mol)} = V_{ci} Z_{ci}^{(1-T_{ri})^{0.2857}} & \text{Ecuación de Rackett (1)} \\ T_{ri} = T_L / T_{ci} & (2) \end{cases}$$

Donde se requieren los volúmenes críticos,  $V_{ci}$ , y los factores de compresibilidad críticos,  $Z_{ci}$ , de las sustancias puras. También se requerirán las temperaturas críticas de las mismas, a fin de hallar la temperatura reducida según (A3.3.2). Las propiedades críticas requeridas se recogen en la tabla que sigue:

Propiedades críticas					
$T_{c1}$ (K)	425,0	$V_{c1}$ (L/mol)	0,221	$Z_{c1}$	0,270
$T_{c2}$ (K)	417,9	$V_{c2}$ (L/mol)	0,239	$Z_{c2}$	0,275
$T_{c3}$ (K)	419,6	$V_{c3}$ (L/mol)	0,240	$Z_{c3}$	0,277
$T_{c4}$ (K)	435,6	$V_{c4}$ (L/mol)	0,234	$Z_{c4}$	0,272
$T_{c5}$ (K)	408,1	$V_{c5}$ (L/mol)	0,263	$Z_{c5}$	0,283
$T_{c6}$ (K)	670,2	$V_{c6}$ (L/mol)	0,252	$Z_{c6}$	0,256

Tabla. A3.VI. Propiedades críticas requeridas por la ecuación (A3.3)

Con los datos de las tablas A3.VI y A3.IV y aplicando (A3.3), se tiene:

	$T_{r1}$	$T_{r2}$	$T_{r3}$	$T_{r4}$	$T_{r5}$	$T_{r6}$
<b>Destilado</b>	0,700	0,712	0,709	0,683	0,729	0,444
<b>Plato alimentación</b>	0,709	0,721	0,718	0,692	0,739	0,450
<b>Residuo</b>	0,715	0,727	0,724	0,698	0,745	0,454

Tabla. A3.VII. Aplicación de (A3.3). (Continúa en pág. siguiente)

\* H. G. Rackett. J. Chem. Eng. Data, vol. 15, pgs. 514-517, 1970.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

	$V_1^{Lsat}$ (L/mol)	$V_2^{Lsat}$ (L/mol)	$V_3^{Lsat}$ (L/mol)	$V_4^{Lsat}$ (L/mol)	$V_5^{Lsat}$ (L/mol)	$V_6^{Lsat}$ (L/mol)
<b>Destilado</b>	0,087	0,097	0,097	0,092	0,110	0,080
<b>Plato alimentación</b>	0,088	0,098	0,098	0,092	0,111	0,080
<b>Residuo</b>	0,089	0,098	0,099	0,093	0,112	0,080

Tabla. A3.VII. Aplicación de (A3.3). (Viene de pág. anterior)

Donde los volúmenes de líquido saturados, según la ecuación de Rackett, presentan las mismas unidades que los volúmenes críticos. Considerando que el recíproco de los volúmenes saturados coincide con la densidad molar de las sustancias puras, y ponderando según las composiciones de las mismas como regla de mezclado, se obtiene la densidad molar de las tres corrientes:

$$(A3.4) \left\{ \begin{array}{l} \rho_{Li} = 1/V_i^{Lsat} \quad (1) \\ \rho_L = \sum_i^n x_i \rho_{Li} = x_1 \rho_{L1} + \dots + x_6 \rho_{L6} \quad (2) \end{array} \right.$$

Mediante la aplicación de (A3.4) sobre los volúmenes saturados de la Tabla A3.VII y las composiciones en A3.IV, convirtiendo a unidades más convenientes, se obtiene para cada corriente:

	$\rho_L$ (mol/cm <sup>3</sup> )
<b>Destilado</b>	0,010
<b>Plato alimentación</b>	0,011
<b>Residuo</b>	0,011

Tabla. A3.VIII. Estimación de las densidades molares de fase líquida

### A3.C1.2.2. Viscosidad de la fase líquida

El cálculo de viscosidades para la fase líquida involucra distintos procedimientos: dos métodos para las viscosidades de compuestos puros y un método, o regla de mezclado, para la obtención de la viscosidad de la fase líquida multicomponente. Las viscosidades puras de los compuestos hidrocarbonados, esto es, del 1 al 5, se dilucidan mediante el procedimiento *API 11A2.1* contenido en el libro téc-

nico citado en la bibliografía consultada\*. Este procedimiento, similar a la ecuación de *Antoine* para el cálculo de presiones de vapor, viene dado por la siguiente expresión:

$$(A3.5) \left\{ \begin{array}{l} \mu_i = 1000 e^{\left( A_i + \frac{B_i}{T_L} + C_i \ln T_L + D_i T_L^{E_i} \right)} \text{ Procedimiento API 11A2.1} \\ \text{con } \mu_i \text{ en cP, } T_L \text{ en R} \end{array} \right.$$

El procedimiento precisa el valor de los coeficientes A, B, C, D y E de las sustancias puras, que figuran tabulados en el libro técnico citado, en las páginas que suceden a la expresión anterior. Para las sustancias en juego tales coeficientes son los que se consignan a continuación:

Coeficientes para el procedimiento API 11A2.1									
<b>A<sub>1</sub></b>	2,0489·10 <sup>1</sup>	<b>A<sub>2</sub></b>	-1,0353·10 <sup>1</sup>	<b>A<sub>3</sub></b>	-1,9161·10 <sup>0</sup>	<b>A<sub>4</sub></b>	-1,0343·10 <sup>1</sup>	<b>A<sub>5</sub></b>	-1,8985·10 <sup>1</sup>
<b>B<sub>1</sub></b>	-5,5836·10 <sup>2</sup>	<b>B<sub>2</sub></b>	1,0790·10 <sup>3</sup>	<b>B<sub>3</sub></b>	6,0498·10 <sup>2</sup>	<b>B<sub>4</sub></b>	9,4014·10 <sup>2</sup>	<b>B<sub>5</sub></b>	1,8360·10 <sup>3</sup>
<b>C<sub>1</sub></b>	-4,5060·10 <sup>0</sup>	<b>C<sub>2</sub></b>	-4,6090·10 <sup>-2</sup>	<b>C<sub>3</sub></b>	-1,2860·10 <sup>0</sup>	<b>C<sub>4</sub></b>	-1,1850·10 <sup>-2</sup>	<b>C<sub>5</sub></b>	1,0980·10 <sup>0</sup>
<b>D<sub>1</sub></b>	0,0000·10 <sup>0</sup>	<b>D<sub>2</sub></b>	0,0000·10 <sup>0</sup>	<b>D<sub>3</sub></b>	0,0000·10 <sup>0</sup>	<b>D<sub>4</sub></b>	0,0000·10 <sup>0</sup>	<b>D<sub>5</sub></b>	-1,7085·10 <sup>-29</sup>
<b>E<sub>1</sub></b>	0,0000·10 <sup>0</sup>	<b>E<sub>2</sub></b>	0,0000·10 <sup>0</sup>	<b>E<sub>3</sub></b>	0,0000·10 <sup>0</sup>	<b>E<sub>4</sub></b>	0,0000·10 <sup>0</sup>	<b>E<sub>5</sub></b>	1,0000·10 <sup>1</sup>

Tabla. A3.IX. Coeficientes para estimación de viscosidad de sustancias puras

Haciendo uso de la Tabla A3.IX y la ecuación (A3.5), se obtiene para las distintas corrientes:

	<b>T<sub>i</sub> (R)</b>	<b>μ<sub>1</sub> (cP)</b>	<b>μ<sub>2</sub> (cP)</b>	<b>μ<sub>3</sub> (cP)</b>	<b>μ<sub>4</sub> (cP)</b>	<b>μ<sub>5</sub> (cP)</b>
<b>Destilado</b>	535,839	<b>0,141</b>	<b>0,179</b>	<b>0,141</b>	<b>0,173</b>	<b>0,168</b>
<b>Plato alimentación</b>	542,506	<b>0,135</b>	<b>0,174</b>	<b>0,137</b>	<b>0,169</b>	<b>0,162</b>
<b>Residuo</b>	547,051	<b>0,131</b>	<b>0,171</b>	<b>0,134</b>	<b>0,167</b>	<b>0,159</b>

Tabla. A3.X. Estimación de viscosidad de los compuestos olefínicos

Donde se han convertido las temperaturas correspondientes a cada corriente, dadas en la Tabla A3.IV a Rankine, la unidad de temperatura solicitada por la ecuación (A3.5).

\* Se refiere a *Technical Data Book-Petroleum Refining*, American Petroleum Institute (API), 6ª Edición, abril 1997.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Para el cálculo de la viscosidad del furfural, dada la ausencia de datos en el procedimiento anterior, se ha seleccionado otro método, en esta ocasión del libro de *Reid, Prausnitz y Poling*, (véase reseña bibliográfica\*). Los autores, *Van Velzen et ál.*, *Yaws et ál.* y *Duhne*, publicaron constantes y correlaciones útiles para la determinación de viscosidades de diversas especies orgánicas, entre las que se encuentra el furfural. De las distintas ecuaciones propuestas, la válida para el anterior compuesto es la que en el libro antedicho figura como número 1:

$$(A3.6) \begin{cases} \mu_i = A_i T_L^{B_i} \text{ Ec. 1} \\ \text{con } \mu_i \text{ en cP, } T_L \text{ en K} \end{cases}$$

Tomando T de la Tabla A3.IV, las constantes A y B que se tabulan a continuación y haciendo uso de (A3.6) se tiene:

Coeficientes para (A3.6)		Destilado	$\mu_6$ (cP)
$A_6$	$3,628 \cdot 10^{14}$	Plato alimentación	1,392
$B_6$	$-5,815 \cdot 10^0$	Residuo	1,326

Tabla. A3.XI. Estimación de la viscosidad del furfural

Una vez determinadas las viscosidades de los compuestos puros, la de la mezcla se estima por la aplicación de la siguiente regla, tomada del libro técnico de *API*:

$$\mu_L = \left( \sum_{i=1}^n x_i \sqrt[3]{\mu_i} \right)^3 = (x_1 \sqrt[3]{\mu_1} + \dots + x_6 \sqrt[3]{\mu_6})^3 \text{ Procedimiento API 11A3.1 (A3.7)}$$

Haciendo uso de nuevo de las composiciones de la Tabla A3.IV, así como de las viscosidades de las tablas A3.X a A3.XI, y aplicando (A3.7), se obtiene:

\* The properties of gases & liquids. R. C. Reid, J. M. Prausnitz, B. E. Poling. McGraw-Hill. 4ª Edición.

	$\mu_l$ (cP)
Destilado	0,169
Plato alimentación	0,276
Residuo	0,328

Tabla. A3.XII. Estimación de las viscosidades de fase líquida

Como comentario a los métodos utilizados, debe mencionarse el hecho de que estos corresponden a estimaciones de la viscosidad a baja presión, como es el caso. Es por ello que las desviaciones esperadas del comportamiento experimental deben ser asumibles.

### A3.C1.2.3. Densidad de la fase vapor

La estimación de las corrientes de vapor, se ha realizado a partir de la ecuación de *Pitzer*\*:

$$(A3.8) \left\{ \begin{array}{l} Z_i = Z_i^0 + \omega_i Z_i^1 \text{ Ecuación de } Pitzer \text{ (1)} \\ Z_i^0 = 1 + B_i^0 \frac{P_{ri}}{T_{ri}} \text{ (2)} \\ Z_i^1 = B_i^1 \frac{P_{ri}}{T_{ri}} \text{ (3)} \\ P_{ri} = \frac{P_i}{P_{ci}} \text{ (4)} \\ T_{ri} = \frac{T_v}{T_{ci}} \text{ (5)} \\ \left\{ \begin{array}{l} B_i^0 = 0,083 - \frac{0,422}{T_{ri}^{1,6}} \text{ (6)} \\ B_i^1 = 0,139 - \frac{0,172}{T_{ri}^{4,2}} \text{ (7)} \end{array} \right. \end{array} \right.$$

La presión parcial de cada especie viene dada por:

$$P_i = y_i P \text{ Ley de Dalton (A3.9)}$$

Donde P, es la presión de operación especificada en el anexo de generación de datos termodinámicos: P = 3 atm. De esta forma,

\* Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química. J. M. Smith, H. C. Van Ness, M. M. Abbott. McGraw-Hill. 6ª Edición, pgs. 108-112.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

puede estimarse el factor de compresibilidad,  $Z_i$ , para sustancias puras. Atendiendo a las siguientes ecuaciones, puede obtenerse tanto el volumen de compuesto puro en cada corriente, como la densidad, de modo similar al empleado para la fase líquida:

$$(A3.10) \left\{ \begin{array}{l} Z_i = \frac{P_i V_{Vi}}{RT_V} \Rightarrow V_{Vi} (\text{L/mol}) = \frac{Z_i R \left( \frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right) T_V (\text{K})}{P_i (\text{atm})} \quad (1) \\ \rho_{Vi} (\text{mol/L}) = \frac{1}{V_{Vi}} \quad (2) \end{array} \right.$$

El cálculo final de la densidad de vapor se efectúa a través de la siguiente regla de mezclado:

$$\rho_V = \sum_i y_i \rho_{Vi} = y_1 \rho_{V1} + \dots + y_6 \rho_{V6} \quad (A3.11)$$

Haciendo uso de la Tabla A3.V, la Tabla A3.VI y la ecuación (A3.8.5), se determinan las siguientes temperaturas reducidas:

	$T_{r1}$	$T_{r2}$	$T_{r3}$	$T_{r4}$	$T_{r5}$	$T_{r6}$
<b>Destilado</b>	0,701	0,712	0,710	0,683	0,730	0,444
<b>Plato alimentación</b>	0,709	0,721	0,718	0,692	0,739	0,450
<b>Residuo</b>	0,715	0,727	0,724	0,698	0,745	0,454

Tabla. A3.XIII. Temperaturas reducidas de fase vapor

Se sigue el procedimiento empleando la Tabla A3.V y aplicando la ecuación (A3.9):

	$P_1 (\text{atm})$	$P_2 (\text{atm})$	$P_3 (\text{atm})$	$P_4 (\text{atm})$	$P_5 (\text{atm})$	$P_6 (\text{atm})$
<b>Destilado</b>	0,034	2,031	0,618	0,000	0,317	0,000
<b>Plato alimentación</b>	1,267	0,854	0,495	0,214	0,168	0,002
<b>Residuo</b>	2,134	0,000	0,463	0,401	0,000	0,002

Tabla. A3.XIV. Presiones parciales de fase vapor

El siguiente paso de cálculo requiere como dato las presiones de vapor críticas. En la siguiente tabla se proporcionarán también los factores acéntricos críticos:

Propiedades críticas			
$P_{c1}$ (atm)	42,7	$\omega_1$	0,195
$P_{c2}$ (atm)	39,5	$\omega_2$	0,190
$P_{c3}$ (atm)	39,7	$\omega_3$	0,187
$P_{c4}$ (atm)	41,5	$\omega_4$	0,202
$P_{c5}$ (atm)	36,0	$\omega_5$	0,176
$P_{c6}$ (atm)	55,9	$\omega_6$	0,3678

Tabla. A3.XV. Propiedades críticas requeridas por la ecuación (A3.8)

Por medio de las dos tablas anteriores y por aplicación de (A3.8.4), se obtienen las presiones reducidas:

	$P_{r1}$	$P_{r2}$	$P_{r3}$	$P_{r4}$	$P_{r5}$	$P_{r6}$
<b>Destilado</b>	0,001	0,051	0,016	0,000	0,009	0,000
<b>Plato alimentación</b>	0,030	0,022	0,012	0,005	0,005	0,000
<b>Residuo</b>	0,050	0,000	0,012	0,010	0,000	0,000

Tabla. A3.XVI. Presiones reducidas de fase vapor

La aplicación de la ecuación (A3.8) generará los factores de compresibilidad de cada componente en su correspondiente vapor, haciendo uso de los datos de la Tabla A3.XIII, la Tabla A3.XV y la Tabla A3.XVI:

	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$Z_5$	$Z_6$
<b>Destilado</b>	0,999	0,946	0,983	1,000	0,991	1,000
<b>Plato alimentación</b>	0,968	0,978	0,987	0,994	0,996	1,000
<b>Residuo</b>	0,948	1,000	0,988	0,989	1,000	1,000

Tabla. A3.XVII. Factores de compresibilidad de fase vapor

La tabla anterior, por aplicación de la ecuación (A3.10.1), proporciona volúmenes de cada especie en fase vapor. La presión parcial se toma de la Tabla A3.XIV y la temperatura de la Tabla A3.V:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

	$V_1$ (L/mol)	$V_2$ (L/mol)	$V_3$ (L/mol)	$V_4$ (L/mol)	$V_5$ (L/mol)	$V_6$ (L/mol)
<b>Destilado</b>	721,833	11,374	38,877	0,000	76,392	0,000
<b>Plato alimentación</b>	18,902	28,325	49,305	114,979	146,157	12927,813
<b>Residuo</b>	11,074	0,000	53,290	0,145	0,000	11404,357

Tabla. A3.XVIII. Volúmenes por componente en fase vapor

Donde se ha tomado  $R = 0,082057 \text{ atm}\cdot\text{L/mol}\cdot\text{K}$ . Los volúmenes correspondientes a especies sin composición en las distintas corrientes, (v. gr. en el destilado no debe existir disolvente como se explicó en el anexo previo y en las primeras líneas de éste); se han supuesto nulos, (si carece de composición, no ha de tener volumen). Como puede observarse, debido a la mínima composición de disolvente en la fase vapor, su presión parcial es también un valor muy bajo, por lo que al sustituir en (A3.10.1), el volumen resulta un valor muy elevado.

A efectos prácticos, debido a la escasa composición referida, se puede suponer que el disolvente apenas pasa a fase vapor en toda la columna y, por tanto, su volumen es despreciable. En todo caso, aunque se considerasen los volúmenes de furfural dados en la Tabla A3.XVIII, la contribución de los mismos a la densidad de la fase vapor es despreciable, puesto que, según (A3.10.2), suman los recíprocos de los volúmenes ponderados a las composiciones: si éstas ya son bajas, al multiplicar por el recíproco de un número elevado, el valor resulta nimio.

Haciendo uso combinado de las ecuaciones (A3.10.2) y (A3.11), leyendo volúmenes molares de la tabla anterior, las composiciones de vapor de la Tabla A3.V y cambiando a unidades más convenientes:

	$\rho_V \cdot 10^5 \text{ (mol/cm}^3\text{)}$
<b>Destilado</b>	6,622
<b>Plato alimentación</b>	3,674
<b>Residuo</b>	6,931

Tabla. A3.XIX. Estimación de las densidades molares de fase vapor

#### A3.C1.2.4. Viscosidad de la fase vapor

La viscosidad de la fase vapor, como para el caso de la fase líquida, requiere el concurso de dos métodos de estimación: uno para la determinación de viscosidad de los compuestos puros, y otro que proponga una regla de mezclado válida para encontrar la viscosidad de la fase.

Los componentes en juego podrían sugerir la utilización de una ecuación sencilla para la estimación de la viscosidad, toda vez que la mezcla de compuestos hidrocarbonados, *per se*, es apolar. Ahora bien, la presencia del furfural, compuesto altamente polar, complica los cálculos al requerir métodos más rigurosos de cálculo.

Por este motivo, se ha seleccionado, del libro de *Reid*, la ecuación de *Lucas*, adecuada para el cálculo de viscosidades de sustancias puras polares y a baja presión. Como regla de mezclado se empleará el método de *Wilke*, regla de rigurosidad intermedia, y suficiente en este caso, para obtener la viscosidad de la mezcla. Se muestran las expresiones de *Lucas*:

$$(A3.12) \left\{ \begin{array}{l} \mu_i (\mu P) = \frac{[0,807T_{ri}^{0,618} - 0,357e^{(-0,449T_{ri})} + 0,340e^{(-4,058T_{ri})} + 0,018]F_{Pi}^0 F_{Qi}^0}{\xi_i} \quad (1) \\ (2) \left\{ \begin{array}{l} \xi_i (\mu P^{-1}) = 0,176 \left( \frac{T_{ci}}{PM_i^3 P_{ci}^4} \right)^{1/6} \\ T_{ci} \text{ en K, } PM_i \text{ en g/mol y } P_{ci} \text{ en bar} \end{array} \right. \\ (3) \left\{ \begin{array}{l} F_{Pi}^0 = 1 \quad 0 \leq \mu_r \leq 0,022 \\ F_{Pi}^0 = 1 + 30,55(0,292 - Z_{ci})^{1,72} \quad 0,022 \leq \mu_r \leq 0,075 \\ F_{Pi}^0 = 1 + 30,55(0,292 - Z_{ci})^{1,72} |0,96 + 0,1(T_{ri} - 0,7)| \quad 0,075 \leq \mu_r \end{array} \right. \\ \mu_{ri} = 52,46 \frac{\mu_i^2 P_{ci}}{T_{ci}^2}, \text{ con } T_{ci} \text{ en K, } \mu_i \text{ en debyes y } P_{ci} \text{ en bar} \quad (4) \end{array} \right.$$

Donde  $F_P^0$  es un factor de corrección para polaridad, que está en función del momento dipolar reducido,  $\mu_r$ , calculado a partir de la ecuación (A3.12.4) para cada componente en función de su momento dipolar,  $\mu$ . El factor  $F_Q^0$  presta corrección a desviaciones cuánticas para el caso de gases como el hidrógeno, helio o deuterio. A la sazón

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

puede considerarse igual a la unidad, puesto que no se requiere corrección por efecto cuántico. Finalmente,  $\xi$  es la viscosidad reducida inversa y se calcula por la ecuación (A3.12.2), introduciendo las variables en las unidades especificadas.

Se listan a renglón seguido las propiedades necesarias para el cálculo de (A3.12):

Propiedades de compuestos puros			
$\mu_1$ (debyes)	0,0	$PM_1$ (g/mol)	54,092
$\mu_2$ (debyes)	0,5	$PM_2$ (g/mol)	56,108
$\mu_3$ (debyes)	0,3	$PM_3$ (g/mol)	56,108
$\mu_4$ (debyes)	0,3	$PM_4$ (g/mol)	56,108
$\mu_5$ (debyes)	0,1	$PM_5$ (g/mol)	58,124
$\mu_6$ (debyes)	3,6	$PM_6$ (g/mol)	96,1

Tabla. A3.XX. Propiedades requeridas por la ecuación (A3.12)

Con las que pueden calcularse tanto el momento dipolar reducido, como la viscosidad reducida inversa, haciendo uso de las ecuaciones (A3.12.4) y (A3.12.2) respectivamente; así como de las tablas A3.VI, A3.XV, (cambiando unidades) y A3.XX:

$\mu_{r1}$	0,0000	$\xi_1$ ( $\mu P^{-1}$ )	$5,32 \cdot 10^{-3}$
$\mu_{r2}$	0,0030	$\xi_2$ ( $\mu P^{-1}$ )	$5,49 \cdot 10^{-3}$
$\mu_{r3}$	0,0011	$\xi_3$ ( $\mu P^{-1}$ )	$5,48 \cdot 10^{-3}$
$\mu_{r4}$	0,0010	$\xi_4$ ( $\mu P^{-1}$ )	$5,35 \cdot 10^{-3}$
$\mu_{r5}$	0,0001	$\xi_5$ ( $\mu P^{-1}$ )	$5,72 \cdot 10^{-3}$
$\mu_{r6}$	0,0857	$\xi_6$ ( $\mu P^{-1}$ )	$3,60 \cdot 10^{-3}$

Tabla. A3.XXI. Aplicación de (A3.12.4) y (A3.12.2)

A la luz de los momentos dipolares reducidos aportados por la Tabla. A3.XXI, y según las expresiones (A3.12.3), se aplicará, la primera expresión a los cinco primeros componentes, (esto es, no recibirán corrección por polaridad) y la tercera al furfural. Con estas expresiones y los datos de las tablas A3.VI y A3.XIII, se tienen los siguientes factores de corrección para cada una de las corrientes:

$F_{P1}^0$	1,0000	$F_{P1}^0$	1,0000	$F_{P1}^0$	1,0000
$F_{P2}^0$	1,0000	$F_{P2}^0$	1,0000	$F_{P2}^0$	1,0000
$F_{P3}^0$	1,0000	$F_{P3}^0$	1,0000	$F_{P3}^0$	1,0000
$F_{P4}^0$	1,0000	$F_{P4}^0$	1,0000	$F_{P4}^0$	1,0000
$F_{P5}^0$	1,0000	$F_{P5}^0$	1,0000	$F_{P5}^0$	1,0000
$F_{P6}^0$	1,0939	$F_{P6}^0$	1,0940	$F_{P6}^0$	1,0940
<b>Destilado</b>		<b>Alimentación</b>		<b>Residuo</b>	

Tabla. A3.XXII. Factores de corrección para el método de *Lucas*

Finalmente, con los datos de las tablas A3.XXI a A3.XXII y nuevamente, A3.XIII, se estiman las viscosidades de los compuestos puros en cada corriente aplicando (A3.12.1):

	$\mu_1$ ( $\mu P$ )	$\mu_2$ ( $\mu P$ )	$\mu_3$ ( $\mu P$ )	$\mu_4$ ( $\mu P$ )	$\mu_5$ ( $\mu P$ )	$\mu_6$ ( $\mu P$ )
<b>Destilado</b>	79,787	78,682	78,574	77,466	77,395	82,095
<b>Plato alimentación</b>	80,776	79,656	79,547	78,427	78,352	83,074
<b>Residuo</b>	81,454	80,324	80,214	79,086	79,007	83,747

Tabla. A3.XXIII. Estimación de viscosidad de los compuestos puros

La viscosidad de la mezcla se estima por aplicación del método de *Wilke*, tal como figura *ut supra* y se escribe a continuación:

$$(A3.13) \text{ Método de Wilke} \left\{ \begin{array}{l} \mu_v = \sum_{i=1}^n \frac{y_i \mu_i}{\sum_{j=1}^n y_j \phi_{ij}} \quad (1) \\ \phi_{ij} = \frac{\left[ 1 + \sqrt{\mu_i / \mu_j} \sqrt{PM_j / PM_i} \right]^2}{\sqrt{8 \left( 1 + PM_i / PM_j \right)}} \quad (1) \\ \phi_{ji} = \frac{\mu_j PM_i}{\mu_i PM_j} \phi_{ij} \quad (2) \\ \phi_{ii} = \phi_{jj} = 1 \quad (3) \end{array} \right.$$

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

El desarrollo de la ecuación (A3.13.1) para una mezcla de seis componentes es el siguiente:

$$\mu_V = \frac{y_1\mu_1}{y_1 + y_2\phi_{12} + y_3\phi_{13} + y_4\phi_{14} + y_5\phi_{15} + y_6\phi_{16}} + \frac{y_2\mu_2}{y_2 + y_1\phi_{21} + y_3\phi_{23} + y_4\phi_{24} + y_5\phi_{25} + y_6\phi_{26}} + \frac{y_3\mu_3}{y_3 + y_1\phi_{31} + y_2\phi_{32} + y_4\phi_{34} + y_5\phi_{35} + y_6\phi_{36}} + \frac{y_4\mu_4}{y_4 + y_1\phi_{41} + y_2\phi_{42} + y_3\phi_{43} + y_5\phi_{45} + y_6\phi_{46}} + \frac{y_5\mu_5}{y_5 + y_1\phi_{51} + y_2\phi_{52} + y_3\phi_{53} + y_4\phi_{54} + y_6\phi_{56}} + \frac{y_6\mu_6}{y_6 + y_1\phi_{61} + y_2\phi_{62} + y_3\phi_{63} + y_4\phi_{64} + y_5\phi_{65}}$$

Se han eliminado directamente los  $\phi_{ii}$ , tal como indica (A3.13.2.3).

El cálculo de los coeficientes  $\phi_{ij}$  mediante la ecuación (A3.13.2.1) y los datos de las tablas A3.XX y A3.XXIII, se tabula a continuación:

	$\phi_{12}$	$\phi_{13}$	$\phi_{14}$	$\phi_{15}$	$\phi_{16}$	$\phi_{23}$	$\phi_{24}$
<b>Destilado</b>	1,026	1,026	1,034	1,052	1,293	1,001	1,008
<b>Plato alimentación</b>	1,026	1,026	1,034	1,052	1,293	1,001	1,008
<b>Residuo</b>	1,026	1,026	1,034	1,052	1,293	1,001	1,008

Tabla. A3.XXIV. Determinación de los  $\phi_{ij}$

	$\phi_{25}$	$\phi_{26}$	$\phi_{34}$	$\phi_{35}$	$\phi_{36}$	$\phi_{45}$	$\phi_{46}$	$\phi_{56}$
<b>Destilado</b>	1,026	1,263	1,007	1,026	1,262	1,018	1,252	1,232
<b>Plato alimentación</b>	1,026	1,263	1,007	1,026	1,262	1,018	1,253	1,232
<b>Residuo</b>	1,026	1,263	1,007	1,026	1,262	1,018	1,253	1,232

Tabla. A3.XXIV.bis. Determinación de los  $\phi_{ij}$

El cálculo de los coeficientes  $\phi_{ji}$  mediante la ecuación (A3.13.2.2) y los datos de las tablas A3.XX, A3.XXIII a A3.XXIV y A3.XXIV.bis, se tabula a continuación:

	$\phi_{21}$	$\phi_{31}$	$\phi_{32}$	$\phi_{41}$	$\phi_{42}$	$\phi_{43}$	$\phi_{51}$	$\phi_{52}$
<b>Destilado</b>	0,975	0,974	0,999	0,968	0,992	0,993	0,950	0,974
<b>Plato alimentación</b>	0,975	0,974	0,999	0,968	0,992	0,993	0,950	0,974
<b>Residuo</b>	0,975	0,974	0,999	0,968	0,992	0,993	0,950	0,974

Tabla. A3.XXV. Determinación de los  $\phi_{ji}$

	$\phi_{53}$	$\phi_{54}$	$\phi_{61}$	$\phi_{62}$	$\phi_{63}$	$\phi_{64}$	$\phi_{65}$
<b>Destilado</b>	0,975	0,982	0,749	0,769	0,770	0,775	0,790
<b>Plato alimentación</b>	0,975	0,982	0,749	0,769	0,769	0,775	0,790
<b>Residuo</b>	0,975	0,982	0,749	0,769	0,769	0,775	0,790

Tabla. A3.XXV.bis. Determinación de los  $\phi_{ji}$

Finalmente, el cálculo de las viscosidades de la fase vapor, haciendo uso de las tablas A3.V, A3.XXIII, A3.XXIV y A3.XXIV.bis y A3.XV y A3.XV.bis, por aplicación del desarrollo de la ecuación (A3.13.1), (cambiando unidades); queda recogido en la tabla siguiente:

	$\mu_v$ (cP)
<b>Destilado</b>	0,0079
<b>Plato alimentación</b>	0,0080
<b>Residuo</b>	0,0081

Tabla. A3.XXVI. Estimación de las viscosidades de fase vapor

### A3.C1.2.5. Tensión superficial de corrientes

Se empleará la correlación, tomada del libro de *Reid*, de *Macleod-Sugden* para la determinación de tensiones superficiales de mezclas no acuosas, la única correlación disponible para la estimación de mezclas donde uno de los componentes es polar:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

$$(A3.14) \left\{ \begin{array}{l} \sigma (\text{dyn/cm}) = \left[ \sum_{i=1}^n [P_i] (\rho_L x_i - \rho_V y_i) \right]^4 \text{ Correlación de Macleod-Sugden} \\ \sigma = [P_1](\rho_L x_1 - \rho_V y_1) + \dots + [P_6](\rho_L x_6 - \rho_V y_6); \text{ con } \rho_L, \rho_V \text{ en mol/cm}^3 \end{array} \right.$$

Donde el único término no dilucidado con anterioridad es  $[P_i]$ , el “parachor” de cada sustancia. Se trata de un término de unidades  $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{1/4} / \text{s}^{1/2}$ , relativo a la tensión superficial e inmanente a cada especie. Su puede determinar mediante un método de contribución de grupos denominado de *Sugden*. En la siguiente tabla se listan los grupos contribuyentes de cada especie, su número y el parachor final, en las unidades indicadas, calculado como suma de las contribuciones individuales\*:

Componente	Grupos	Contribución	Número	$[P_i]$
1	Enlace etilénico terminal	19,1	2	167,2
	C	9,0	4	
	H	15,5	6	
2	CH <sub>3</sub>	55,5	2	177,7
	Enlaces etilénicos 2,3	17,7	1	
	C	9,0	2	
	H	15,5	2	
3	CH <sub>3</sub>	55,5	1	179,1
	CH <sub>2</sub> en $-(\text{CH}_2)_n$ ( $n < 12$ )	40,0	1	
	Enlace etilénico terminal	19,1	1	
	C	9,0	2	
	H	15,5	3	
4	CH <sub>3</sub>	55,5	2	177,7
	Enlaces etilénicos 2,3	17,7	1	
	C	9,0	2	
	H	15,5	2	
5	CH <sub>3</sub>	55,5	3	191
	C	9,0	1	
	H	15,5	1	
6	Enlaces etilénicos 2,3	17,7	4	203,9
	>O	20,0	1	
	CHO	66	1	
	C	9,0	4	
	H	15,5	3	

Tabla. A3.XXVII. Determinación de parachors por contribución de grupos

\* Las contribuciones de grupos se han tomado de la tabla “Table 11-3” del libro de Reid.

Con lo anterior, se está en condiciones de estimar la tensión superficial de cada corriente, haciendo uso de los datos ya tabulados en A3.IV, A3.V, A3.VIII, A3.XIX y A3.XXVII; por aplicación de la ecuación (A3.14):

	$\sigma$ (dyn/cm)
Destilado	10,893
Plato alimentación	15,742
Residuo	18,033

Tabla. A3.XXVIII. Estimación de las tensiones superficiales

### A3.C1.2.6. Difusividad del clave ligero en fase líquida

El episodio de determinación de propiedades concluye con la estimación de la difusividad del clave ligero en fase líquida. Tal como se menciona en la primera sección de este capítulo, el clave ligero, a la sazón, es el componente 1-buteno. La estimación empleará la ecuación del método de *Wilke-Chang* modificada por *Perkins* y *Geankoplis*, tomada del libro de *Reid*, para difusión de un componente en una mezcla líquida:

$$(A3.15) \left\{ \begin{array}{l} \mathcal{D}_{3,m} (\text{cm}^2/\text{s}) = 7,4 \cdot 10^{-8} \frac{T_L \sqrt{\varphi PM}}{\mu_L V_{b3}^{0,6}} \quad (1) \\ \varphi PM = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 3}}^n x_j \varphi_j PM_j = x_1 \varphi_1 PM_1 + x_2 \varphi_2 PM_2 + x_4 \varphi_4 PM_4 + \dots + x_6 \varphi_6 PM_6 \quad (2) \\ \text{con } T_L \text{ en K, } PM \text{ en g/mol, } \mu_L \text{ en cP y } V_{b3} \text{ en cm}^3/\text{mol} \end{array} \right.$$

Donde  $\mathcal{D}_{3,m}$ , es la difusividad del clave ligero, (1-buteno), en la mezcla líquida. La ecuación requiere valores de  $\varphi$  y de  $V_{b3}$ . El resto de magnitudes y propiedades han sido estimadas en apartados anteriores. En el sumatorio (A3.15.2), no se considera la contribución del clave ligero.

Por una parte,  $\varphi$ , corresponde al factor de asociación de los distintos componentes. Se recomienda una serie de valores para distintos solventes entre los que no se encuentran los componentes invo-

lucrados. Para este caso, el método prevé emplear el valor de la unidad, por lo que  $\varphi_j = 1$ .

Por otra parte,  $V_{b3}$ , es el volumen molar del clave ligero a su temperatura de ebullición. Para estimar esta propiedad será necesario recurrir a la expresión de *Tyn y Calus*, en función del volumen crítico, tomada del libro de *Reid*:

$$V_b = 0,285V_c^{1,048} \text{ Método de Tyn y Calus (A3.16)}$$

Presentadas las ecuaciones, puede procederse al desarrollo del cálculo. Haciendo uso de los datos consignados en la Tabla A3.VI, aplicando (A3.16) y cambiando unidades se determinan:

$V_{b3} \text{ (cm}^3\text{/mol)}$	63,871
------------------------------------	--------

Tabla. A3.XXIX. Volumen molar del clave ligero a su temperatura de ebullición

Empleando los datos tabulados en A3.IV, A3.XX, A3.XII y A3.XXIX y aplicando (A3.15.2) y (A3.15.1) sucesivamente, se estiman las difusividades requeridas para cada corriente:

	$\varphi_{PM}$	$D_{3m} \text{ (cm}^2\text{/s)}$
<b>Destilado</b>	44,741	$7,202 \cdot 10^{-5}$
<b>Plato alimentación</b>	56,560	$5,011 \cdot 10^{-5}$
<b>Residuo</b>	61,866	$4,457 \cdot 10^{-5}$

Tabla. A3.XXX. Difusividades del clave ligero en fase líquida

### **A3.C1.3. Diseño hidráulico**

El diseño hidráulico de columna tiene por objeto el dimensionamiento de la misma, esto es, la obtención del diámetro de platos, sus áreas características, disposición de sus elementos, (válvulas, campanas o perforaciones), pérdidas de carga, eficacia, tipo y pasos y un largo etcétera que se desgranará en la presente sección.

El primer aspecto que debe decidirse es el tipo de plato que se empleará. Por simplicidad de diseño, disponibilidad de ecuaciones

---

suficientes en la bibliografía y coste económico más asequible, los platos de utilidad en este diseño serán: **Platos perforados**.

Son estos los platos de uso más extendido en el diseño de columnas de destilación y, sólo en el caso de que los requerimientos hidráulicos de los fluidos en juego superasen las prestaciones de los platos perforados, se plantearía la posibilidad de diseñar otro tipo de etapa de separación.

Dilucidado este primer aspecto se efectuará el siguiente procedimiento de cálculo:

- Recopilación y conversión de datos y propiedades.
- Determinación gráfica del número de pasos por columna.
- Estimación de dimensiones previas.
- Fijación de los límites de operación.
- Cálculo reiterado de áreas de columna y otras dimensiones.
- Verificaciones de las magnitudes calculadas con los límites de operación.
- Estimación de las pérdidas de carga.

Se estudiará la hidráulica de la columna en tres zonas diferenciadas y para las que previamente se han estimado sus propiedades físicas:

- Plato primero o de destilado.
- Plato de alimentación.
- Plato último o de residuo.

A lo que cabe establecer el siguiente matiz. Dado que el método FUG no proporciona un perfil de composiciones a lo largo de la columna, no se tendrá en cuenta el hecho de que el último plato de columna corresponde al rehervidor o calderín, y se efectuarán los cálculos para diseño hidráulico considerando esta última etapa de equilibrio dentro de la columna.

Tal simplificación ahorra el esfuerzo de determinar las composiciones en el último plato real de columna y es válida por dos motivos. En primer lugar, porque las diferencias de composición de las corrientes que abandonan el último plato real de columna y el rehervidor, deben ser muy similares, a tenor de la tendencia de los datos de equilibrio de fases generados. En segunda instancia, y aunque la conjetura anterior no fuese correcta, las condiciones en el escenario sin rehervidor, (esto es, considerándolo una etapa más de equilibrio de la columna), son más restrictivas que en último plato real, (la temperatura sigue un perfil creciente en sentido descendente de la columna, puesto que la composición del líquido es cada vez más rica en componentes menos volátiles, que hierven a mayor temperatura). De esta forma, los cálculos para un caso más severo cubren los requerimientos del último plato real de columna.

El plato de alimentación es un punto crítico de la columna, y por ello se estudia su funcionamiento hidráulico, ya que supone la inserción de una corriente líquida a la operación, (la alimentación), lo que modifica ostensiblemente las condiciones de funcionamiento de la operación. Asimismo, se estudia el funcionamiento del plato de destilado, o primer plato de columna, que, pese a soportar *a priori* condiciones de funcionamiento más benignas que, por ejemplo, el primer plato de la sección de rectificación; es el plato que recibe el reflujo y, por ende está sometido a un choque de fluidos severo.

Dado que los platos seleccionados soportan las condiciones más exigentes, los datos arrojados por dichos puntos de operación, permitirán caracterizar las distintas zonas de columna, esto es, permitirán decidir si debe construirse la torre con distintos diámetros, además de, junto a la eficacia global; decidir si la altura final de la torre requiere segregar el tren de separación en varias columnas.

### A3.C1.3.1. Recopilación y conversión de datos y propiedades

En este primer apartado, se consignarán en tablas los valores de las propiedades involucradas en los cálculos, que se realizarán en el siguiente y sucesivos apartados. Todos estos datos han sido dados en tablas correspondientes a la sección anterior, a excepción del peso molecular promedio, que responde a esta regla:

$$(A3.17) \begin{cases} PM_L = \sum_{i=1}^n x_i PM_i = x_1 PM_1 + \dots + x_6 PM_6 & (1) \\ PM_V = \sum_{i=1}^n y_i PM_i = y_1 PM_1 + \dots + y_6 PM_6 & (2) \end{cases}$$

Donde  $PM_L$  y  $PM_V$  son los pesos moleculares en g/mol, ponderados a sus respectivas composiciones, del líquido y el vapor.

Tomando datos de las tablas A3.VIII, A3.XIX, A3.III a A3.V, A3.XII, A3.XXVI y A3.XXVIII y aplicando (A3.17) sobre A3.XX, se recopilan las siguientes tablas:

Propiedades y composición del destilado			
$\rho_L$ (mol/L)	10,200	$\rho_L$ (kg/m <sup>3</sup> )	574,233
$\rho_V$ (mol/L)	0,066	$\rho_V$ (kg/m <sup>3</sup> )	3,728
L (kmol/h)	2008,347	$\mu_L$ (cP)	0,169
V (kmol/h)	2598,169	$\mu_V$ (cP)	0,008
(L/V)	0,773	$\sigma$ (dyn/cm)	10,893
$x_1$	0,011	$y_1$	0,011
$x_2$	0,677	$y_2$	0,677
$x_3$	0,206	$y_3$	0,206
$x_4$	0	$y_4$	0
$x_5$	0,106	$y_5$	0,106
$x_6$	0	$y_6$	0
<b>PM (g/mol) (líquido)</b>		<b>PM (g/mol) (vapor)</b>	
56,298		56,298	

Tabla. A3.XXXI. Propiedades y composición de la corriente del primer plato

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Propiedades y composición de la corriente del plato de alimentación			
$\rho_L$ (mol/L)	11,098	$\rho_L$ (kg/m <sup>3</sup> )	707,206
$\rho_V$ (mol/L)	0,037	$\rho_V$ (kg/m <sup>3</sup> )	2,035
L (kmol/h)	3911,830	$\mu_L$ (cP)	0,276
V (kmol/h)	2598,169	$\mu_V$ (cP)	0,008
(L/V)	1,506	$\sigma$ (dyn/cm)	15,742
$x_1$	0,349	$y_1$	0,422
$x_2$	0,210	$y_2$	0,285
$x_3$	0,128	$y_3$	0,165
$x_4$	0,074	$y_4$	0,071
$x_5$	0,033	$y_5$	0,056
$x_6$	0,206	$y_6$	0,001
PM (g/mol) (líquido)		PM (g/mol) (vapor)	
63,722		55,395	

Tabla. A3.XXXII. Propiedades y composición de la corriente del plato de alimentación

Propiedades y composición de la corriente del último plato			
$\rho_L$ (mol/L)	11,488	$\rho_L$ (kg/m <sup>3</sup> )	770,351
$\rho_V$ (mol/L)	0,069	$\rho_V$ (kg/m <sup>3</sup> )	3,791
L (kmol/h)	3911,830	$\mu_L$ (cP)	0,328
V (kmol/h)	2598,169	$\mu_V$ (cP)	0,008
(L/V)	1,506	$\sigma$ (dyn/cm)	18,033
$x_1$	0,501	$y_1$	0,711
$x_2$	0	$y_2$	0
$x_3$	0,092	$y_3$	0,154
$x_4$	0,108	$y_4$	0,134
$x_5$	0	$y_5$	0
$x_6$	0,299	$y_6$	0,001
M (g/mol) (líquido)		M (g/mol) (vapor)	
67,056		54,703	

Tabla. A3.XXXIII. Propiedades y composición de la corriente del último plato

Las densidades en unidades SI se han obtenido multiplicando las molares por los pesos moleculares promedio.

### A3.C1.3.2. Determinación gráfica del número de pasos por columna

El fundamento del contacto en cada plato radica en lograr la mayor transferencia de materia de las corrientes, de modo que cuando el líquido y el vapor abandonan el plato, dicha velocidad de transferencia tienda a cero, por lo que las corrientes están en equilibrio y la eficacia separadora de la etapa se ha maximizado.

Desde un punto de vista más operativo, el criterio anterior halla su concreción en la disposición del flujo en el plato. El vapor debe ascender por las perforaciones de cada etapa de equilibrio, con una presión suficiente, entendiéndose por suficiente aquella, que ni es tan baja que permite el derrame o lloriqueo del líquido por los orificios, ni es tan alta que ejerce justo el efecto contrario: arrastra líquido a la etapa superior, bloqueando la columna y posibilitando la inundación; así como formando excesiva espuma en el contacto con el líquido.

Por consiguiente, la presión de vapor deberá superar la pérdida de carga que le supone su paso por columna, mientras que el líquido, deberá seguir una circulación transversal a través de los platos, garantizándose así, un flujo cruzado entre el líquido y el vapor.

El flujo del líquido, por su parte, se dirige a través de la columna, básicamente, gracias a la disposición de vertederos y rebosaderos. Los primeros permiten el acceso del líquido al área perforada del plato, mientras que los segundos, consisten en presas que acumulan un cierto nivel de líquido, que, una vez superado, permiten el flujo por gravedad al siguiente plato, siendo de esta manera, su vertedero.

La diferencia conceptual entre vertedero y rebosadero queda referida en el párrafo anterior, si bien, en adelante se nombrarán indistintamente como vertederos, a efectos prácticos, a no ser que se precise enfatizar en la diferencia establecida.

El nivel de líquido en el plato, que, intuitivamente viene dado por la altura de la presa, es un parámetro fundamental en el diseño

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

de los platos. Teóricamente, el nivel de líquido sobre el plato debería maximizarse, toda vez que una capa de líquido de mayor grosor posibilitaría una transferencia de materia tanto mejor, con lo que se aseguraría la premisa de idealidad en la separación, por la que las corrientes abandonan el plato en equilibrio. Operativamente, un nivel excesivo es la base para el lloriqueo, puesto que aumenta la pérdida de carga del vapor y puede impedir su normal flujo. Un defecto de nivel puede suponer la formación de espumas y arrastre de líquido con el vapor y, en el caso extremo, el secado del plato con la consiguiente ineficiencia en la separación, así como un eventual bloqueo por vapor de la torre que la llevaría a la inundación, por citar sólo dos inconvenientes.

El problema en lograr un nivel de líquido adecuado, surge cuando se tratan grandes caudales de fluido, como es el caso en las unidades de separación que se manejan en este proyecto. Es por ello que, a fin de evitar gradientes de nivel de líquido a lo largo del plato, se hace preciso dirigir el flujo a través de varios vertederos, generando más de un paso de líquido a través del plato. Al segregar el flujo del líquido de esta manera, se logra mantener homogéneo el nivel de líquido en los platos sin perjuicio del resto de los parámetros.

Para decidir el número de pasos por columna puede emplearse una gráfica\* que liga el flujo del líquido en galones estadounidenses por minuto (gpm) con el diámetro en pies de la columna. En las siguientes tablas se listan las variables convertidas a las unidades requeridas:

<b>Determinación de pasos: Plato de destilado</b>			
<b><math>Q_L</math> (m<sup>3</sup>/s)</b>	0,055	<b><math>Q_L</math> (gal (US)/min)</b>	866,925
<b>T (m)</b>	5	<b>T (ft)</b>	16,404
	<b>Nº de pasos (p)</b>		<b>2</b>

Tabla. A3.XXXIV. Determinación de los pasos en la zona de rectificación

\* Operaciones de separación por etapas de equilibrio en Ingeniería Química. E. J. Henley, H. D. Seader. Reverté, año 2000.

Determinación de pasos: Plato de alimentación			
$Q_L$ (m <sup>3</sup> /s)	0,098	$Q_L$ (gal (US)/min)	1551,890
T (m)	6,5	T (ft)	21,325
Nº de pasos (p)		3	

Tabla. A3.XXXV. Determinación de los pasos por el plato de alimentación

Determinación de pasos: Plato de residuo			
$Q_L$ (m <sup>3</sup> /s)	0,095	$Q_L$ (gal (US)/min)	1499,206
T (m)	5,5	T (ft)	18,045
Nº de pasos (p)		3	

Tabla. A3.XXXVI. Determinación de los pasos por el plato de residuo

Donde el caudal de líquido,  $Q_L$ , se ha transformado de términos molares, como venía dado en las tablas A3.XXXI a A3.XXXIII, a términos volumétricos teniendo en cuenta:

$$(A3.18) \left\{ \begin{array}{l} Q_L \left( \frac{\text{Volumen}}{\text{Tiempo}} \right) = \frac{L \left( \frac{\text{mol}}{\text{Tiempo}} \right)}{\rho_L \left( \frac{\text{mol}}{\text{Volumen}} \right)} \quad (1) \\ Q_V \left( \frac{\text{Volumen}}{\text{Tiempo}} \right) = \frac{V \left( \frac{\text{mol}}{\text{Tiempo}} \right)}{\rho_L \left( \frac{\text{mol}}{\text{Volumen}} \right)} \quad (2) \end{array} \right.$$

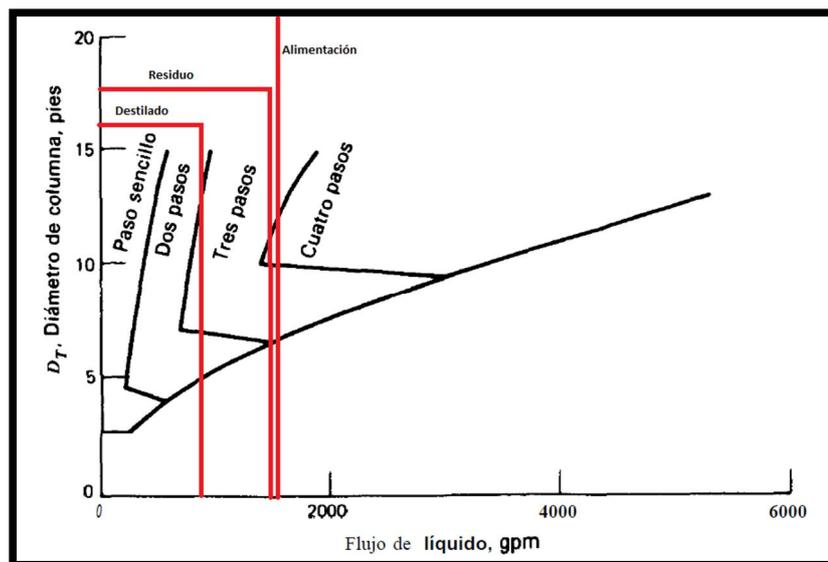


Figura. A3.1. Estimación del número de pasos según recomendaciones de la Koch Engineering Company. (E. J. Henley, J. D. Seader, 1999)

El diámetro de columna se ha tomado de la reiteración del cálculo de áreas, que se mostrará en apartados ulteriores. Finalmente, el número de pasos se ha decidido según la gráfica de la Figura A3.1. Pese a exceder la escala de la gráfica, el número de pasos para el plato de alimentación se ha extrapolado, como estimación que deberá verificar los distintos apartados de funcionamiento hidráulico que sucederán al presente.

### A3.C1.3.3. Estimación de dimensiones previas

Como se especificó al inicio de la presente sección, los platos seleccionados para el desempeño de la operación en cuestión, son platos perforados. Las dimensiones previas requeridas para el cálculo de las distintas áreas y pérdidas de carga son las que siguen:

- Diámetro de las perforaciones, ( $d_0$ ).
- Separación y distribución de las perforaciones: pitch, ( $p'$ ).
- Razón de espesor del plato a diámetro de orificio, ( $e/d_0$ ).
- Espaciado entre platos, ( $t$ ).
- Razón de área de perforaciones a área activa, ( $A_0/A_a$ ).

Según artículos de investigación consultados\*, está probado que para un diámetro de perforaciones menor se tiene una buena mezcla entre fases mejorándose de esta forma la separación. De esta forma y atendiendo a la Figura A3.2.

Considerando que el material seleccionado es acero al carbono, (por los motivos que se argumentarán en los capítulos de diseño mecánico), el menor diámetro para el que se dispone de razón  $e/d_0$  es de 9 mm, siendo éste, por consiguiente el diámetro seleccionado.

---

\* Simulación del comportamiento hidráulico en platos perforados para la destilación de mezclas binarias mediante CFD. *M. A. Rodríguez-Ángeles, A. R. Uribe Ramírez*. Revista Enlace Químico, n° 10, marzo 2008.

Diámetro de orificio		Espesor de plato/diámetro de orificio	
mm	in	Acero inoxidable	Acero al carbono
3,0	1/8	0,65	
4,5	3/16	0,43	
6,0	1/4	0,32	
9,0	3/8	0,22	0,50
12,0	1/2	0,16	0,38
15,0	5/8	0,17	0,30
18,0	3/4	0,11	0,25

Figura. A3.2. Razón  $e/d_0$  para platos perforados. (R. E. Treybal, 1990)

La relación  $e/d_0$  correspondiente es 0,50.

Con el diámetro de las perforaciones decidido, debe plantearse cuál es la distribución oportuna de las mismas. Según criterios de diseño de torres de platos consultadas en el libro de *Treybal*, tal distribución corresponde a aquella donde las perforaciones se colocan en los vértices de triángulos equiláteros, disposición ésta denominada al tresbolillo, que se logra perforando el área activa del plato en filas de orificios equidistantes, que estarán desfasadas, una a una, media distancia entre orificios, de modo que coincidan las filas alternas.

Usualmente, la distancia entre centros de orificios, también conocida como pitch, ( $p'$ ), debe estar comprendida entre 2,5 y 5 veces el diámetro de los mismos. Como valor intermedio, se tomará 4 veces el diámetro de orificio. Así:

$$p' = 4d_0 \text{ (A3.19)}$$

Ergo:

$$p' = 4 \cdot 9 = 36 \text{ mm}$$

El espaciado entre platos es uno de los parámetros económicos de mayor peso en la toma de decisiones vinculada al diseño de las columnas de platos. Un espaciado elevado aumenta la altura de la

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

unidad de separación, si bien mejora las condiciones de flujo, lo que se traduce en una disminución del diámetro de la columna. A la sazón, atendiendo a la bibliografía, se dispone de la siguiente tabla:

Diámetro de la torre, $T$	Espaciamiento entre platos, $t$
m	m
Menos de 1	0,50
1-3	0,60
3-4	0,75
4-8	0,90

Figura. A3.3. Espaciado de platos recomendado para distintos diámetros de torre.  
(R. E. Treybal, 1990)

Para el diámetro mínimo, (correspondiente a la zona de rectificación), tomado de la tabla A3.XXXIV, el espaciado requerido es el máximo, de 0,90 m. Éste será por tanto el espaciado entre platos para toda la columna.

Por último, para una disposición al tresbolillo, la bibliografía, (libro de *Treybal*), recomienda para la razón área de orificios a área activa la siguiente expresión:

$$\frac{A_0}{A_a} = 0,907 \left( \frac{d_0}{p'} \right)^2 \quad (A3.20)$$

La siguiente tabla recoge todos los valores calculados en este apartado, así como la aplicación de (A3.20), válidos para las tres zonas de columna:

Dimensiones previas			
$d_0$ (mm)	9	$p'$ (mm)	36
$e/d_0$	0,5	$t$ (m)	0,9
	$A_0/A_a$	0,057	

Tabla A3.XXXVII. Dimensiones previas para las distintas zonas de columna

#### A3.C1.3.4. Fijación de los límites de operación

Como se especificó en apartados anteriores, la velocidad del vapor debe mantenerse acotada entre dos límites. Si se excede el límite superior, se incurrirá en el riesgo de inundación, mientras que si la velocidad no alcanza el límite inferior, el líquido vencerá la presión del vapor y derramará por los orificios, desperdiciándose de este modo área y tiempo de contacto, (el plato se diseña para que el líquido lo transite en contacto con el vapor), con la consiguiente ineficiencia en la separación de componentes deseada, por no mencionar los inconvenientes de una operación fuera de límites hidráulicos.

En este apartado se determinará el límite superior, ya que la velocidad mínima, también conocida como velocidad de lloriqueo, precisa de ciertos datos aún no dilucidados, lo que obliga a posponer su cálculo a posteriores apartados.

La velocidad de inundación, límite superior para el flujo del vapor, viene dada a partir de las dos siguientes expresiones\* :

$$v_F(\text{m/s}) = C_F (\text{m/s}) \sqrt{\frac{\rho_L - \rho_V}{\rho_V}} \quad (\text{A3.21})$$

$$(A3.22) \left\{ \begin{array}{l} C_F(\text{m/s}) = \left( \alpha \log \frac{1}{PF} + \beta \right) \left( \frac{\sigma}{0,020} \right)^{0,2} \quad (1) \\ (2) \left\{ \begin{array}{ll} \alpha(\text{m}) = 0,0744 \cdot t + 0,01173 & A_0/A_a \geq 0,1 \\ \alpha(\text{m}) = (0,0744 \cdot t + 0,01173) \left( 5 \frac{A_0}{A_a} + 0,5 \right) & A_0/A_a < 0,1 \end{array} \right. \\ (3) \left\{ \begin{array}{ll} \beta(\text{m}) = 0,0304 \cdot t + 0,015 & A_0/A_a \geq 0,1 \\ \beta(\text{m}) = (0,0304 \cdot t + 0,015) \left( 5 \frac{A_0}{A_a} + 0,5 \right) & A_0/A_a < 0,1 \end{array} \right. \\ PF = \left( \frac{L}{V} \right) \sqrt{\frac{\rho_V}{\rho_L}} \quad (4) \end{array} \right.$$

\* Tomadas del libro "Operaciones de transferencia de masa". R. E. Treybal. McGraw-Hill. 2ª Edición.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

La velocidad  $v_f$  precisa las densidades del líquido y el vapor.  $C_F$  es el coeficiente de inundación, que para platos perforados adquiere la forma de la expresión dada por (A3.22).

Se requieren datos de tensión superficial, (en unidades SI, N/m), densidades de líquido y vapor y sus caudales, razón de área de perforaciones a área activa y espaciado de platos. Tales datos, se encuentran en las tablas A3.XXXVII y A3.XXXI a A3.XXXIII. Aplicando (A3.22.2), (A3.22.3), (A3.22.4), (A3.22.1) y (A3.21) sucesivamente, se obtiene el límite superior de flujo:

<b>Límite superior de operación: Zona de rectificación</b>			
<b>PF</b>	0,063	<b><math>\alpha</math> (m)</b>	0,062
	<b>0,1</b>	<b><math>\beta</math> (m)</b>	0,033
<b><math>C_F</math> (m/s)</b>	0,084	<b><math>v_f</math> (m/s)</b>	<b>1,039</b>
<b>% permisible <math>v_f</math></b>	78	<b><math>v</math> (m/s)</b>	<b>0,810</b>

Tabla. A3.XXXVIII. Límite superior de operación para la zona de rectificación

<b>Límite superior de operación: Plato de alimentación</b>			
<b>PF</b>	0,087	<b><math>\alpha</math> (m)</b>	0,062
	<b>0,1</b>	<b><math>\beta</math> (m)</b>	0,033
<b><math>C_F</math> (m/s)</b>	0,090	<b><math>v_f</math> (m/s)</b>	<b>1,569</b>
<b>% permisible <math>v_f</math></b>	78	<b><math>v</math> (m/s)</b>	<b>1,224</b>

Tabla. A3.XXXIX. Límite superior de operación para el plato de alimentación

<b>Límite superior de operación: Zona de agotamiento</b>			
<b>PF</b>	0,117	<b><math>\alpha</math> (m)</b>	0,062
	<b>0,117</b>	<b><math>\beta</math> (m)</b>	0,033
<b><math>C_F</math> (m/s)</b>	0,089	<b><math>v_f</math> (m/s)</b>	<b>1,140</b>
<b>% permisible <math>v_f</math></b>	78	<b><math>v</math> (m/s)</b>	<b>0,889</b>

Tabla. A3.XL. Límite superior de operación para la zona de agotamiento

A lo que cabe añadir las siguientes matizaciones. El parámetro de flujo es un número adimensional empleado en el diseño hidráulico de columnas de platos. Da idea del rango de operación en el que se encuentra la columna. Como criterio de cálculo, se tomará un PF

igual a 0,1 siempre que al aplicar (A3.22.4) el resultado sea inferior a dicho valor.

Los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  deben corregirse según la segunda ecuación de las llaves 2 y 3 de (A3.22), cuando la razón de área de perforaciones a área activa es menor de 0,1 como es el caso.

En las tablas A3.XXXVIII a A3.XL, se ha incluido también la velocidad de flujo de vapor sobre la que se establece la base para el cálculo posterior. Ésta se define a partir del porcentaje permisible de la velocidad de inundación. Normalmente se elige un valor comprendido en la horquilla 80-85% de la velocidad de inundación, si se conoce que los componentes en juego no forman espumas. Por seguridad se ha tomado un valor del 78% para las tres zonas, ya que se desconoce este hecho. De esta forma, se ha calculado:

$$v = 0,78 \cdot v_F \quad (A3.23)$$

#### A3.C1.3.5. Cálculo reiterado de áreas de columna y otras dimensiones

La descripción de los platos empleados en cada zona requiere el cálculo de distintas áreas que conviene enumerar a continuación.

- Área total o de plato, ( $A_t$ ).
- Área de vertederos, ( $A_v$ ).
- Área neta, ( $A_n$ ).
- Área activa o de burbujeo, ( $A_a$ ).
- Área de vigas, ( $A_{vig}$ ).
- Área de perforaciones, ( $A_0$ ).

Alguna de ellas han sido empleadas anteriormente y, llegados a este punto se hace preciso describirlas con mayor detalle.

El área total o de plato corresponde a la superficie ocupada por el plato y que incluye a las demás. Considerando el plato una superficie circular, esta área se expresa según:

$$A_t = \pi \frac{T^2}{4} \quad (A3.24)$$

Donde T, es el diámetro de la columna, (definido por el del plato).

Los platos se construyen provistos de una serie de vertederos que garantizan el adecuado flujo de líquido a través de estos. Dependiendo del número de pasos por plato consignado en apartados anteriores, se instalará el número oportuno de vertederos. En todo caso, el área de vertederos está relacionada con el área de plato, según tablas, del modo en que se expondrá más adelante.

El área neta corresponde al área de plato restante al eliminar la superficie que en éste ocupan los rebosaderos: aunque en los vertederos no se produce transferencia de materia, se considera que el área del plato que recibe el líquido de la etapa anterior suma al área neta. Genéricamente se calcula según:

$$A_n = A_t - p \cdot A_v \quad (A3.25)$$

Siendo p el número de pasos dado en las tablas de A3.XXXIV a A3.XXXVI.

El área activa o de burbujeo es la superficie donde se encuentran las perforaciones y a través de la que la transferencia de materia se hace efectiva. Normalmente los platos contienen una zona llamada de remanso, situada entre la zona de vertederos y el área activa, dedicada a procurar un flujo de líquido homogéneo a su ingreso al área de burbujeo, (zona de distribución) y tras su salida, (zona de desprendimiento). La superficie ocupada por esta zona, amén del área de todos los vertederos, debe ser restada al área total, a fin de hallar el área de burbujeo:

$$A_a = A_t - (p + 1) \cdot A_v - 0,15A_t \quad (A3.26)$$

En este caso, el área de vertederos multiplicada por el número de pasos más la unidad representa las áreas de todos los vertederos del plato. El tercer sumando corresponde al área de la zona de remanso que, según la bibliografía consultada, debe estimarse entre un 10 y un 20% del área total, (a la sazón se ha tomado un 15% como valor típico). Este término incluye también el área de los anillos de soporte de cada plato. Se tomará un 5% para cada una de las zonas de remanso (distribución y desprendimiento) y el 5% restante para el anillo de soporte.

Dentro del área activa, para platos de gran diámetro, como es el caso, se preverá también la instalación de pasos de hombre, (trampillas de apertura manual que permiten el acceso entre plato y plato). Este paso no resta área de burbujeo, ya que la rejilla se encuentra perforada respetando el patrón del resto del plato y en operación normal se encuentra cerrada.

El área de vigas corresponde a la que resulta de restar, al área neta, la activa.

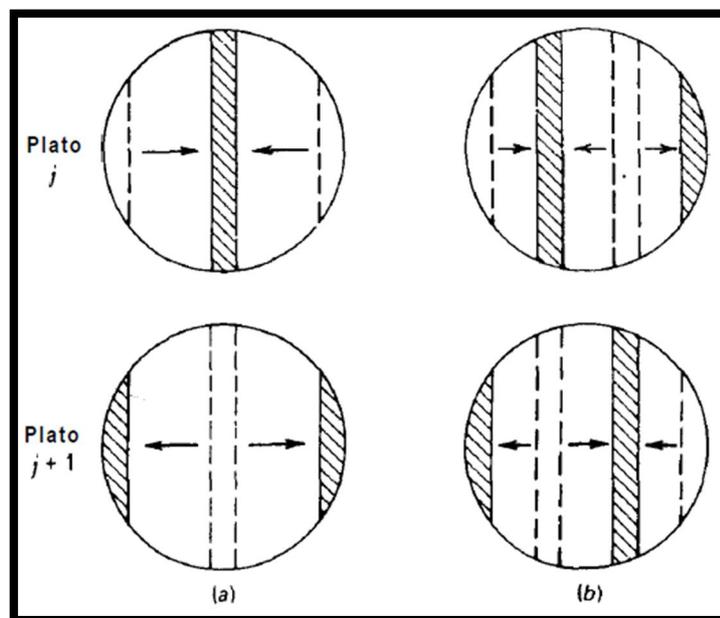


Figura. A3.4. Disposición alternativa de los platos. (a) Dos pasos. (b) Tres pasos.  
(E. J. Henley, J. D. Seader, 1999)

Los platos se sostienen mediante dos vigas transversales al flujo de líquido, (ergo paralelas a los vertederos), y una longitudinal, paralela al flujo de líquido. Dado que los platos requieren paso múltiple, la distribución de los mismos consistirá, para los platos de dos pasos, en etapas con un vertedero central que vierten sobre otras sin vertedero central y con dos laterales, colocadas de forma alterna. De la misma forma, para los platos de tres pasos, la etapa superior contiene dos vertederos, uno lateral y otro descentrado a un lado, que vierten a otra etapa, colocada alternativamente, sobre la que se disponen los vertederos en el lateral y el lado contrarios. La Figura A3.4 ilustra lo descrito.

Las vigas transversales al flujo de líquido se dispondrán paralelamente a ambos lados del vertedero central y en los lados internos de los vertederos laterales, respectivamente, para platos de dos pasos. Para el caso de tres pasos, se colocará una paralela al lado interno de los vertederos descentrados y otra paralela al lado interno de los vertederos laterales. Estas vigas se sostienen en las inserciones practicadas en el anillo de soporte de cada plato. Las vigas longitudinales se colocan centradamente bajo cada plato y soldadas a la carcasa de la columna.

En todo caso, el área de las vigas se calcula según:

$$A_{vig} = A_n - A_a \quad (A3.27)$$

Por último, el área de perforaciones corresponde a la superficie ocupada por los orificios practicados mediante taladros en la zona de burbujeo. El plato se colocará de modo que la dirección de los taladros apunte hacia arriba, de modo que se minimicen la pérdida de carga del vapor y se dificulte el lloriqueo.

Una vez dilucidada el área activa y, dada en la Tabla A3.XXXVII, la razón de área de perforaciones a área activa; puede determinarse el valor de esta última área, multiplicando el valor conocido del área activa por la razón mencionada.

Otros parámetros de interés al diseño hidráulico de la columna son los que siguen:

- Longitud del vertedero, ( $W$ ).
- Distancia del centro de la columna a los vertederos, ( $x$ ).
- Distancia recorrida por el líquido entre los vertederos, ( $Z$ ).
- Espesor del plato, ( $e$ ).
- Número de orificios, ( $o$ ).

La longitud del vertedero,  $W$ , es la distancia, que para los vertederos laterales, supone la cuerda correspondiente al arco que comprende la presa, véase la siguiente figura:

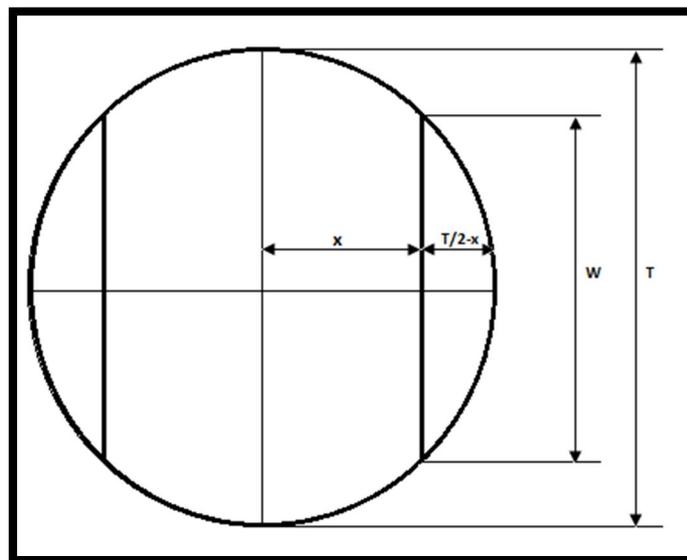


Figura. A3.5. Dimensiones de plato y vertedero. (Elaboración propia)

La longitud  $W$  está ligada al diámetro  $T$  de la columna, según la siguiente relación tabular consultada en la bibliografía:

Longitud del derramadero, $W$	Distancia desde el centro de la torre $x$
$0,55T$	$0,4181T$
$0,60T$	$0,3993T$
$0,65T$	$0,2516T$
$0,70T$	$0,3562T$
$0,75T$	$0,3296T$
$0,80T$	$0,1991T$

Figura. A3.6. Relaciones de  $W$  y  $x$  con el diámetro  $T$ . (R. E. Treybal, 1990)

De la misma forma,  $x$ , la distancia desde el centro de la columna a los vertederos encuentra relación tabular con el diámetro  $T$ , según la Figura A3.6. Esta distancia hace referencia exclusivamente a la que existe entre los vertederos laterales y el centro del plato. Los vertederos descentrados se localizarán a un tercio, (o dos tercios para los platos alternativos), del diámetro del plato.

El camino,  $Z$ , por el que discurre el líquido en el plato, supone la distancia que recorre sobre éste, descontando el ancho de los vertederos. Por consiguiente, y atendiendo a la Figura A3.4, corresponderá al doble de la distancia del centro a los vertederos laterales,  $2x$  menos la anchura de un vertedero para los platos de doble paso, que corresponde al vertedero central; y dos vertederos para los platos de triple paso, que corresponden a los vertederos descentrados. En cualquier caso, tomando idéntica anchura para todos los vertederos, y haciéndola coincidir con la flecha correspondiente al arco que comprende la presa, dicha anchura se toma como  $T/2-x$ , tal como aparece en la Figura A3.5. De esta forma, se tiene:

$$(A3.28) \begin{cases} Z = 2x \text{ Platos de paso sencillo (1)} \\ Z = 2x - \left(\frac{T}{2} - x\right) = 3x - \frac{T}{2} \text{ Platos de doble paso (2)} \\ Z = 2x - 2\left(\frac{T}{2} - x\right) = 4x - T \text{ Platos de triple paso (3)} \end{cases}$$

A los platos sencillos no es preciso descontarles vertederos, puesto que sólo cuentan con laterales.

El espesor,  $e$ , del plato ya se había ligado anteriormente al diámetro de orificio, según se puede apreciar en la Figura A3.2. De modo que multiplicando tal relación por el diámetro de orificio, también determinado en apartados anteriores, se tendrá el espesor requerido tanto para el plato como para su anillo de soporte correspondiente.

Finalmente, el número de orificios por plato se determina a partir de datos ya definidos en este apartado y anteriores según:

$$o = \frac{A_0}{\pi \frac{d_0^2}{4}} \quad (A3.29)$$

Donde el denominador es el área de un orificio individual.

Con todas las magnitudes presentadas, el procedimiento de cálculo es el que sigue:

- Se halla el caudal de vapor en cada región de columna, empleando los datos consignados en las tablas A3.XXXI a A3.XXXIII y aplicando (A3.18.2). (Será necesario convertir a unidades SI).
- Se calcula el área neta en una primera aproximación teniendo en cuenta:  $A_n = \frac{Q_v}{v}$  (A3.30), con  $Q_v$  el caudal de vapor en  $m^3/s$  y  $v$ , la velocidad admisible del vapor en  $m/s$ , tomada de las tablas A3.XXXVIII a A3.XL.
- Se seleccionan las relaciones  $W/T$  y  $x/T$  de la Figura A3.6.
- Se calcula la razón  $A_v/A_t$  empleando la siguiente expresión, tomada del libro de *Treybal*:

$$(A3.31) \left\{ \begin{array}{l} \frac{A_v}{A_t} = \frac{\arcsen\left(\frac{W}{T}\right) \cdot \frac{180}{\pi} - \frac{W}{T} \sqrt{1 - \left(\frac{W}{T}\right)^2}}{180} \\ \text{con } \arcsen\left(\frac{W}{T}\right) \text{ en rad} \end{array} \right.$$

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

- Se determina el área de torre: Si se divide (A3.25) por  $A_t$  y se despeja en función de la relación dada por (A3.31), se obtendrá:

$$A_t = \frac{A_n}{1 - p \frac{A_v}{A_t}} \quad (A3.32)$$

- Con el área de la torre disponible, puede despejarse el diámetro de (A3.24). La ecuación resultante es la que sigue:

$$T = \sqrt{\frac{4A_t}{\pi}} \quad (A3.33)$$

- En función del diámetro obtenido, se selecciona el valor comercial que se requerirá: el menor posible que verifique las comprobaciones hidráulicas y de pérdidas de carga que se presentan en apartados ulteriores.

El procedimiento descrito se recoge en las siguientes tablas para cada zona de columna.

Cálculo previo: Zona de rectificación			
$Q_v$ (m <sup>3</sup> /s)	10,898	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	13,449
$W/T$	0,7	$A_v/A_t$	0,088
$x/T$	0,3562	$A_t$ (m <sup>2</sup> )	16,309
$T$ (m)	4,557	$T$ (m)	5

Tabla. A3.XLI. Cálculo previo de áreas para la zona de rectificación

Cálculo previo: Plato de alimentación			
$Q_v$ (m <sup>3</sup> /s)	19,644	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	16,056
$W/T$	0,7	$A_v/A_t$	0,088
$x/T$	0,3562	$A_t$ (m <sup>2</sup> )	21,787
$T$ (m)	5,267	$T$ (m)	6,5

Tabla. A3.XLII. Cálculo previo de áreas para el plato de alimentación

Cálculo previo: Zona de agotamiento			
$Q_v$ (m <sup>3</sup> /s)	10,413	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	11,714
$W/T$	0,7	$A_v/A_t$	0,088
$x/T$	0,3562	$A_t$ (m <sup>2</sup> )	15,896
$T$ (m)	4,499	$T$ (m)	5,5

Tabla. A3.XLIII. Cálculo previo de áreas para la zona de agotamiento

Una vez decidido el diámetro de columna, debe reiterarse el cálculo del área total y neta, así como determinarse las distintas dimensiones detalladas en este apartado. El procedimiento es el siguiente:

- Se recalcula el área total empleando los diámetros T seleccionados, dados en las tablas A3.XLI a A3.XLIII, y aplicando (A3.24).
- Se determina el área de vertederos multiplicando el área total recalculada por la relación  $A_v/A_t$ , dada en las mismas tablas del guión anterior.
- Se recalcula el área neta por aplicación de (A3.25) y empleando los datos calculados en los guiones anteriores y el número de pasos según tablas A3.XXXIV a A3.XXXVI.
- Se determina el área activa aplicando (A3.26) a los datos recalculados y al número de pasos.
- Se determina el área de las vigas por aplicación de (A3.27) a los datos obtenidos en estos guiones.
- Se determina el área de las perforaciones multiplicando el área activa, recién calculada, por la razón de área de perforaciones a área activa recogida en la Tabla A3.XXXVII.
- Se obtiene W, multiplicando la relación W/T seleccionada por el diámetro T comercial. Los datos se encuentran en las tablas A3.XLI a A3.XLIII.
- Se obtiene x, de forma similar, multiplicando la relación x/T seleccionada por el diámetro T comercial. Los datos se encuentran de nuevo en las tablas A3.XLI a A3.XLIII.
- Se obtiene Z, aplicando (A3.28) a los datos dilucidados en los dos guiones anteriores, según el número de pasos.
- Se obtiene e, multiplicando el diámetro de orificio consignado en la Tabla A3.XXXVII por la razón de espesor de plato a diámetro de orificio, dada en la misma tabla.
- Se obtiene o, por aplicación de (A3.29) a los datos de guiones anteriores.

Los resultados obtenidos al seguir el procedimiento anterior se consignan en las siguientes tablas:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

<b>Áreas y otras dimensiones: Zona de rectificación</b>			
$A_t$ (m <sup>2</sup> )	19,635	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	16,191
$A_v$ (m <sup>2</sup> )	1,722	$A_a$ (m <sup>2</sup> )	11,524
$A_{vig}$ (m <sup>2</sup> )	4,667	$A_o$ (m <sup>2</sup> )	0,653
W (m)	3,5	x (m)	1,7810
Z (m)	2,8430	e (m)	0,0045
	o		10269

Tabla. A3.XLIV. Cálculo de áreas y dimensiones para la zona de rectificación

<b>Áreas y otras dimensiones: Plato de alimentación</b>			
$A_t$ (m <sup>2</sup> )	33,183	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	24,453
$A_v$ (m <sup>2</sup> )	2,910	$A_a$ (m <sup>2</sup> )	16,566
$A_{vig}$ (m <sup>2</sup> )	7,887	$A_o$ (m <sup>2</sup> )	0,939
W (m)	4,55	x (m)	2,3150
Z (m)	2,7610	e (m)	0,0045
	o		14761

Tabla. A3.XLV. Cálculo de áreas y dimensiones para el plato de alimentación

<b>Áreas y otras dimensiones: Zona de agotamiento</b>			
$A_t$ (m <sup>2</sup> )	23,758	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	17,508
$A_v$ (m <sup>2</sup> )	2,083	$A_a$ (m <sup>2</sup> )	11,861
$A_{vig}$ (m <sup>2</sup> )	5,647	$A_o$ (m <sup>2</sup> )	0,672
W (m)	3,85	x (m)	1,9590
Z (m)	2,3360	e (m)	0,0045
	o		10569

Tabla. A3.XLVI. Cálculo de áreas y dimensiones para la zona de agotamiento

### A3.C1.3.6. Verificaciones de las magnitudes calculadas con los límites de operación

Con la columna dimensionada, esto es, determinados en apartados precedentes tanto el diámetro de columna, como las distintas dimensiones de los platos y el espaciado de los mismos, se hace preciso constatar si el funcionamiento hidráulico es acorde a los límites fijados.

A este fin se dedica el presente apartado donde se realizarán las siguientes verificaciones:

- Verificación de inundación.
- Verificación de derrame o lloriqueo.
- Verificación de descarga.
- Verificación de arrastre fraccional.
- Verificación de máxima carga en vertederos.

La velocidad de inundación se ha calculado previamente en el apartado de fijación de los límites de operación. Asimismo, en dicho apartado se estipuló la velocidad máxima permisible, atendiendo al criterio de formación de espumas. Toda vez que las áreas han sido calculadas en base al diámetro comercial seleccionado, será preciso determinar la velocidad real de flujo del vapor en el plato,  $v_v$ , con los nuevos datos. Para ello, tomando el caudal de vapor de las tablas A3.XLI a A3.XLIII y el área neta recalculada en las tablas A3.XLIV a A3.XLVI, se aplica:

$$v_v = \frac{Q_v}{A_n} \quad (A3.34)$$

Donde si esta velocidad real de flujo del vapor es inferior a la permisible,  $v$ , dada en las tablas A3.XXXVIII a A3.XL, se habrá verificado el extremo superior de operación.

La verificación de lloriqueo requerirá el cálculo de la velocidad mínima admisible, que quedó postergada en apartados anteriores, a falta de distintos parámetros ya disponibles. Para la operación en platos perforados, el libro de *Treybal* propone:

$$v_{vm} (m/s) = 0,0229 \frac{\sigma g_c}{\mu_v} \left[ \frac{\mu_v^2}{\rho_v \sigma g_c d_0} \frac{\rho_L}{\rho_v} \right]^{0,379} \left( \frac{e}{d_0} \right)^{0,293} \left( \frac{2A_a d_0}{(p')^3 \sqrt{3}} \right)^{\frac{2,8}{(z/d_0)^{0,724}}} \quad (A3.35)$$

Donde todas las variables ya han sido dadas en las tablas A3.XXXI a A3.XXXIII, A3.XXXVII y A3.XLIV a A3.XLVI. Por su parte,

el factor  $g_c$ , se introduce como factor de conversión cuando se trabaja con el sistema técnico de unidades europeo o anglosajón. A la sazón, introduciendo todas las variables en las unidades SI que se han ido especificando, no es precisa la conversión, por lo que  $g_c$  adquiere el valor de la unidad. Asimismo, tal como indica la expresión (A3.35), se obtendrá una velocidad en unidades SI.

El criterio de verificación de lloriqueo, consiste en corroborar que la velocidad del vapor a través de las perforaciones,  $v_0$ , es superior a la velocidad de lloriqueo dada por (A3.35). De esta forma, puede asegurarse que el vapor asciende con la presión suficiente para limitar, cuando no evitar, un efecto inaceptable de derrame de líquido a través de las perforaciones. Por su parte, la mencionada velocidad del vapor a través de las perforaciones se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$v_0 = \frac{Q_v}{A_0} \quad (A3.36)$$

Cuyas variables han sido ya consignadas en las tablas A3.XLI a A3.XLIII y A3.XLIV a A3.XLVI.

La verificación del problema de descarga viene a prevenir dificultades en el desprendimiento del vapor que haya arrastrado el líquido, previa deposición en el plato subsiguiente. Si la velocidad del líquido en el vertedero supera el valor de 0,12 m/s, deberán replantearse las dimensiones del vertedero, ya que podría producirse arrastre de vapor debido al trasiego del líquido, lo que eventualmente supondría un aumento de la volatilidad del líquido, que comprometería no sólo el rendimiento de la separación, sino la seguridad del equipo.

El problema de descarga es mencionado en la bibliografía\* por varios autores y el valor de 0,12 m/s es de carácter heurístico, basa-

---

\* Véase Chemical Engineering Design. G. Towler, R. Sinnott. Butterworth-Heinemann, año 2008.

do en la experiencia en el diseño de columnas de destilación de platos perforados.

A fin de efectuar la comprobación, procede calcular la velocidad del líquido a través del vertedero,  $v_{Lv}$ , y constatar que su valor no supere los 0,12 m/s. La velocidad del líquido a través de vertederos viene dada por:

$$v_{Lv} = \frac{Q_L}{A_v} \quad (A3.37)$$

Magnitudes que han sido dadas en las tablas A3.XXXIV a A3.XXXVI y A3.XLIV a A3.XLVI.

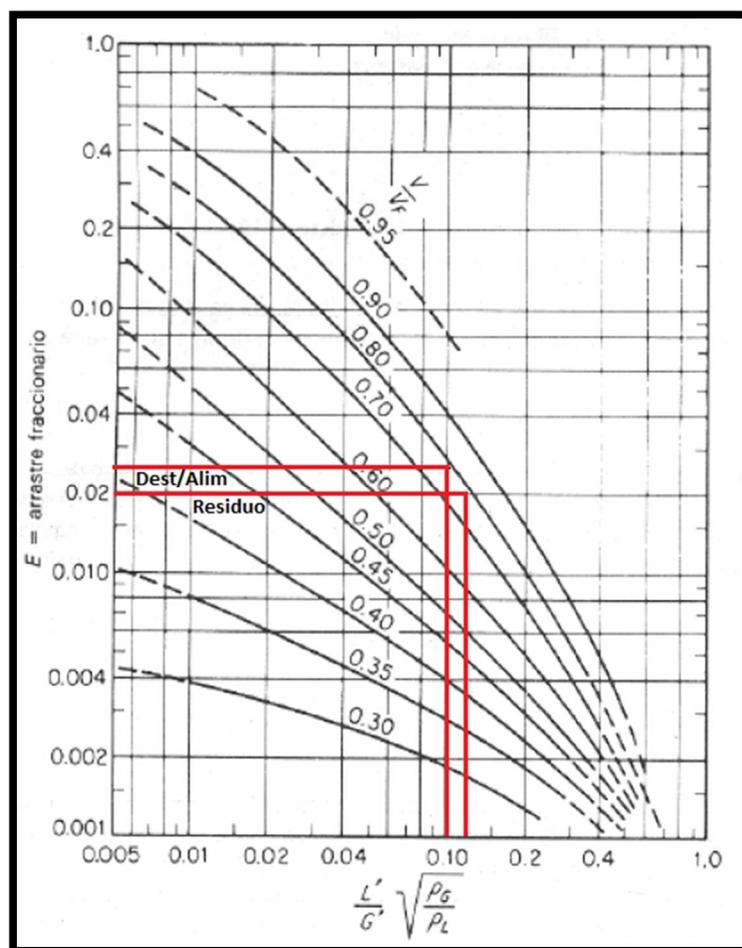


Figura. A3.7. Verificación de arrastre fraccional. (R. E. Treybal, 1990)

La verificación de arrastre fraccional está relacionada con la formación de espumas. Cuando la velocidad del vapor es excesiva, se produce el efecto contrario al descrito en el problema de descarga: la formación de espumas ocasiona que gotas pulverizadas de líquido pueden ser arrastradas por el vapor.

De la misma forma, para sistemas formadores de espumas, también puede producirse el arrastre de dichas espumas, lo que supondría un aumento anómalo del nivel de líquido en los platos, favoreciéndose la inundación.

En este caso, la comprobación pertinente es de carácter gráfico, véase Figura A3.7: Se representa en abscisas el parámetro de flujo, dado en las tablas A3.XXXVIII a A3.XL, frente al arrastre porcentual de líquido en ordenadas a distintas velocidades permitidas de vapor.

El procedimiento consiste en leer en ordenadas el valor de arrastre fraccional, correspondiente a los parámetros de flujo de las distintas zonas analizadas en el presente diseño hidráulico. Se efectuará la lectura de la intersección del valor de abscisas con la curva del 78%. Dicha curva corresponde al tanto por ciento permitido de velocidad ascensional del vapor, para sistemas cuyo carácter formador de espumas es ignorado, tal y como se detalló en el apartado de fijación de los límites de operación.

Sobre la Figura A3.7 se han trazado las lecturas de las tres zonas de columna. A la sazón, el parámetro de flujo es coincidente en las zonas del plato primero y de alimentación, por lo que el arrastre fraccional leído es idéntico. El otro caso corresponde a la última etapa de la columna.

Según la bibliografía consultada, todo arrastre que supere el 10% de líquido debe considerarse intolerable. Como se desprende de la Figura A3.7, no es el caso, por lo que la verificación de arrastre fraccional queda satisfecha.

Para cerrar el apartado de verificaciones, es preciso comprobar que la carga sobre vertederos se ajuste a las recomendaciones de diseño obtenidas de la bibliografía.

La carga de líquido sobre vertederos,  $Q_{Lv}$ , con unidades de volumen por unidad de tiempo y longitud, consiste en la razón entre el caudal de líquido que trasiega el plato,  $Q_L$ , dado en las tablas A3.XXXIV a A3.XXXVI, y la longitud de vertederos,  $W$ , dada en las tablas A3.XLIV a A3.XLVI. Esto es:

$$Q_{Lv} = \frac{Q_L}{W} \quad (A3.38)$$

Este parámetro de diseño viene a confirmar la acertada decisión en la selección de pasos de líquido a través de los platos. Si este criterio no es satisfecho, sería preciso modificar, bien el espaciado entre platos, bien el número de pasos.

En este caso, dado que el espaciado elegido es elevado, por exigencias de diseño, no es factible una modificación de dicho espaciado, por lo que la satisfacción de este criterio es crucial para justificar la decisión sobre el número de pasos de líquido.

Si la carga sobre vertederos es excesiva, en resumidas cuentas, puede decirse que el plato no evacúa a ritmo adecuado, lo que compromete el buen desempeño hidráulico de la columna, ya que se favorecería el retroceso del líquido. Como se viene expresando, sólo un aumento del espaciado podría disminuir la carga de vertederos, o bien, el reparto de dicha carga de líquido sobre un mayor número de vertederos, esto es, el aumento de los pasos por plato.

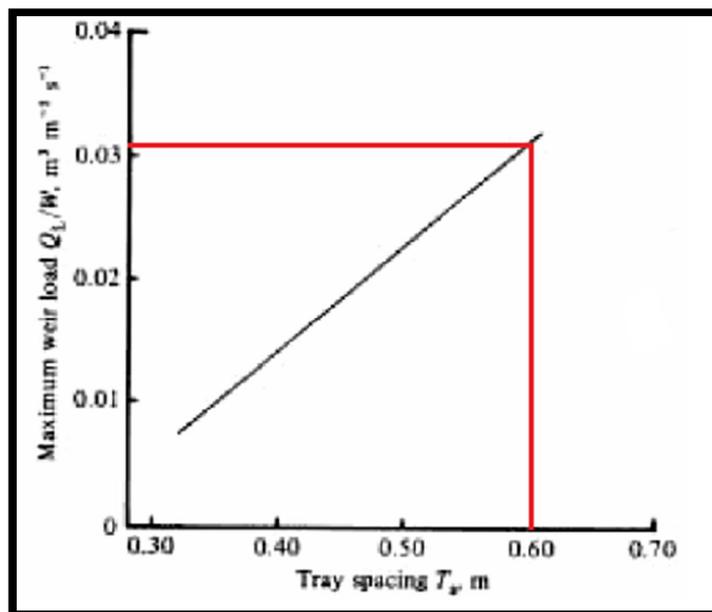


Figura. A3.8. Máxima carga permisible sobre vertederos. (R. E. Treybal, 1990)

La comprobación en este caso requiere, como en el anterior, la aplicación de una gráfica, a la sazón, la proporcionada en la Figura A3.8.

Como queda recogido en la tabla A3.XXXVII, el espaciado aplicado es de 0,9 m. Dado que la figura disponible no ofrece datos más allá de un espaciado de 0,60 m, y que esta situación es más restrictiva que un espaciado mayor, como es el caso; se acepta que una carga de líquido sobre vertederos inferior a  $0,030 m^3/m\cdot s$ , es satisfactoria.

Como se mencionaba anteriormente, el espaciado es un parámetro que no podrá modificarse ni por reducción, por motivos de seguridad; ni por aumento, por motivos económicos. Es por esto, que la única variable sobre la que se dispondría de libertad, es el número de pasos.

Una vez se ha detallado el fundamento teórico de las verificaciones de rigor, se practican los cálculos pertinentes y se comprueba

que se satisfacen las condiciones descritas. A este fin se sigue el procedimiento que se presenta a renglón seguido.

- Se calculan las distintas magnitudes requeridas:  $v_v$ , aplicando (A3.34);  $v_{vm}$  y  $v_0$ , aplicando, respectivamente, (A3.35) y (A3.36);  $v_{Lv}$  aplicando (A3.37) y  $Q_{Lv}$ , aplicando (A3.38). Los datos que precisan las distintas ecuaciones se han indicado *ut supra*.
- Se cotejan las magnitudes recién obtenidas con los valores de las variables límite consignadas en este apartado:  $v_v$  menor que  $v$ ,  $v_{vm}$  menor que  $v_0$ ,  $v_{Lv}$  menor que 0,12 m/s,  $Q_{Lv}$  menor que 0,030 m<sup>3</sup>/m·s.
- Se verifica gráficamente que el arrastre fraccional, para el parámetro de flujo correspondiente, es inferior al 10%, para la curva de velocidad permitida del 78%.

Se aplica este procedimiento a las distintas zonas de columna y se decide si el proceso de cálculo ha sido correcto hasta el presente punto.

<b>Verificaciones: Zona de rectificación</b>					
<b>Inundación</b>	$v_v$ (m/s)	<b>0,673</b>	$v$ (m/s)	<b>0,810</b>	<b>Verificado</b>
<b>Lloriqueo</b>	$v_{vm}$ (m/s)	<b>0,667</b>	$v_0$ (m/s)	<b>16,682</b>	<b>Verificado</b>
<b>Descarga</b>	$v_{Lv}$ (m/s)	<b>0,032</b>	<b>Arrastre fraccional</b>	<b>0,026</b>	<b>Verificados</b>
<b>Máx. carga en vertedero</b>	$Q_{Lv}$ (m <sup>3</sup> /m·s)			<b>0,016</b>	<b>Verificado</b>

Tabla. A3.XLVII. Verificaciones para la zona de rectificación

<b>Verificaciones: Plato de alimentación</b>					
<b>Inundación</b>	$v_v$ (m/s)	<b>0,803</b>	$v$ (m/s)	<b>1,224</b>	<b>Verificado</b>
<b>Lloriqueo</b>	$v_{vm}$ (m/s)	<b>1,462</b>	$v_0$ (m/s)	<b>20,919</b>	<b>Verificado</b>
<b>Descarga</b>	$v_{Lv}$ (m/s)	<b>0,034</b>	<b>Arrastre fraccional</b>	<b>0,026</b>	<b>Verificados</b>
<b>Máx. carga en vertedero</b>	$Q_{Lv}$ (m <sup>3</sup> /m·s)			<b>0,022</b>	<b>Verificado</b>

Tabla. A3.XLVIII. Verificaciones para el plato de alimentación

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Verificaciones: Zona de agotamiento					
Inundación	$v_v$ (m/s)	0,595	$v$ (m/s)	0,889	Verificado
Lloriqueo	$v_{vm}$ (m/s)	1,054	$v_0$ (m/s)	15,487	Verificado
Descarga	$v_{Lv}$ (m/s)	0,045	Arrastre fraccional	0,02	Verificados
Máx. carga en vertedero	$Q_{Lv}$ (m <sup>3</sup> /m-s)			0,025	Verificado

Tabla. A3.XLIX. Verificaciones para la zona de agotamiento

Dado que todas las verificaciones se han satisfecho, puede procederse a calcular el último y no menos trascendente aspecto del diseño hidráulico: las pérdidas de carga por plato.

### A3.C1.3.7. Estimación de las pérdidas de carga

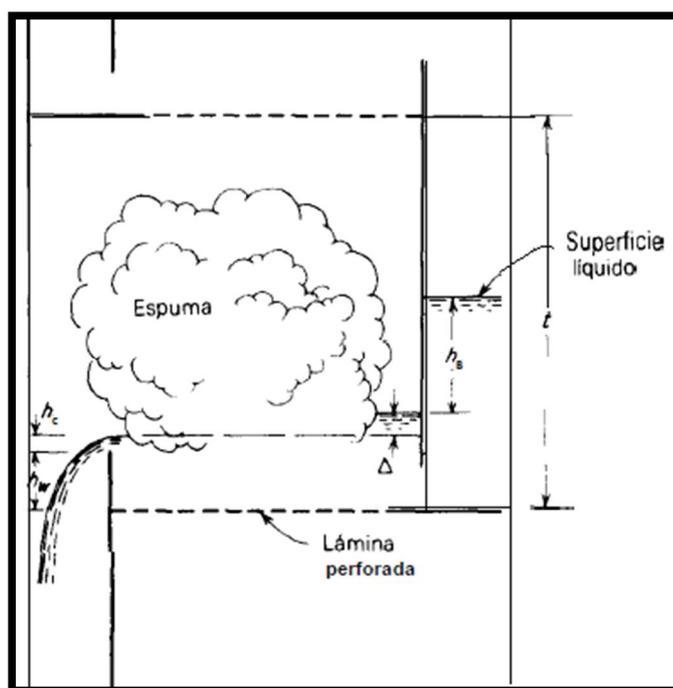


Figura. A3.9. Esquema de las distintas alturas de líquido sobre un plato.  
(R. E. Treybal, 1990)

Debido a la caída de presión que experimenta el líquido a su paso por el plato, motivada por los diferentes niveles de éste en el plato y el vertedero, es de esperar un cierto retroceso de líquido que, de estimarse excesivo, podría comprometer el adecuado funciona-

miento hidráulico de la columna, siendo causa de una eventual inundación.

Es por este motivo, que la estimación de la pérdida de carga en el plato, requerirá evaluar una serie de alturas involucradas en el traspase del líquido. Dichas alturas se han mostrado en la Figura A3.9.

En ésta se distingue  $h_w$ , la altura de la presa sobre el vertedero,  $h_c$ , la altura de la cresta del líquido sobre la presa,  $\Delta$ , el gradiente de nivel de líquido a su paso por el plato, desde su ingreso en el mismo hasta que lo abandona y  $h_B$ , el nivel de retroceso del líquido en el vertedero, sobre el nivel en el plato.

Un diseño seguro implica que la altura de líquido no supere la mitad del espaciado entre platos, de esta forma:

$$h_w + h_c + h_B + \Delta \leq \frac{t}{2} \quad (A3.39)$$

Por consiguiente, debe estimarse el valor de cada una de las alturas y evaluar si se satisface la desigualdad dada por (A3.39), lo que se efectuará aplicando expresiones proporcionadas por el libro de *Treybal*.

Como es preceptivo, ha de indicarse que todas las alturas se expresan en unidades de longitud SI.

El nivel  $h_w$  corresponde a la altura de la presa sobre el vertedero. Como criterio de diseño se toma:

$$h_w = \frac{t}{10} \quad (A3.40)$$

Por su parte,  $h_c$ , el nivel de líquido sobre la presa, puede estimarse haciendo uso de la siguiente expresión para presas rectangulares con bordes rectos:

$$\frac{Q_L}{W_{ef}} = 1,839 \cdot h_c^{3/2} \text{ Ecuación de Francis (A3.41)}$$

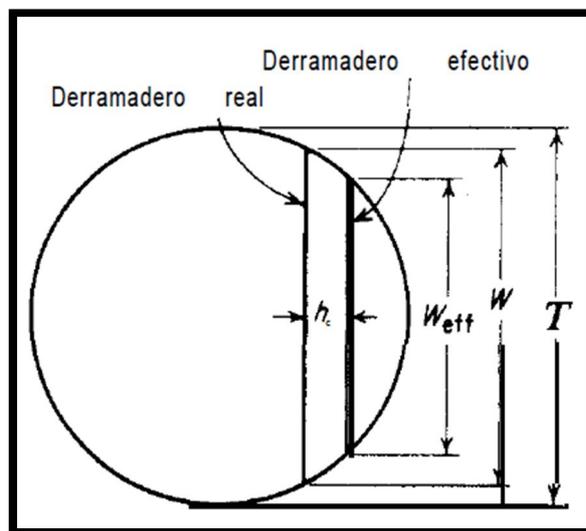


Figura. A3.10. Longitud efectiva del vertedero. (R. E. Treybal, 1990)

Donde  $Q_L$  es el caudal de líquido dado en las tablas A3.XXXIV a A3.XXXVI y  $W_{ef}$  es la longitud efectiva de vertederos. Ya que no puede tomarse todo el vertedero como útil, dado que la geometría circular del plato impide que el vertedero sea efectivo a todo su ancho; la ecuación de *Francis* prevé este hecho introduciendo la longitud efectiva, como factor de corrección, que coincide con la longitud de la cuerda del arco que comprendería la presa, si se acortase el ancho del vertedero una distancia igual a  $h_c$ . Se muestra gráficamente en la siguiente Figura A3.10.

La ecuación de *Francis* puede reordenarse, al despejar en función de  $h_c$  y multiplicar y dividir convenientemente por la longitud de vertederos,  $W$ , dando lugar a la expresión siguiente:

$$h_c = 0,666 \cdot \left(\frac{Q_L}{W}\right)^{2/3} \left(\frac{W}{W_{ef}}\right)^{2/3} \text{ (A3.42)}$$

Que aplicada junto a la siguiente relación geométrica que puede establecerse entre  $W$  y  $W_{ef}$ :

$$\frac{W_{ef}}{W} = \sqrt{\left(\frac{T}{W}\right)^2 - \left\{ \sqrt{\left[\left(\frac{T}{W}\right)^2 - 1}\right] + \frac{2h_c T}{T W} \right\}^2} \quad (A3.43)$$

Aboca el cálculo de la altura de la cresta del líquido sobre la presa, a un proceso iterativo. Como puede apreciarse, (A3.43) depende de  $h_c$ , que es justo la variable que pretende dilucidar (A3.42). De esta forma se procederá como sigue:

- Suponer un valor inicial para  $h_c$
- Calcular  $W_{ef}/W$  aplicando (A3.43), haciendo uso de los datos dados en las tablas A3.XLI a A3.XLVI y el valor de  $h_c$  supuesto.
- Se introduce  $W/W_{ef}$  supuesto en base a  $h_c$  inicial en (A3.42), junto con el caudal de líquido dado en las tablas A3.XXXIV a A3.XXXVI. Se obtiene  $h_c$  calculado.
- Se cotejan los valores de  $h_c$  calculado con  $h_c$  inicial y caso de coincidir razonablemente, se ha dilucidado  $h_c$ . Caso contrario se empleará  $h_c$  calculado sucesivamente tal como se indica desde el guión segundo, hasta alcanzar la convergencia.

Debe añadirse, que en la ecuación de *Francis*, y por ende en (A3.43), (que no es más que una operación de aquélla), deberán introducirse las variables en unidades SI, dado que el coeficiente numérico responde a un ajuste empírico realizado con datos de laboratorio expresados en tales unidades. Se especifica esto con intención aclaratoria, toda vez que durante el desarrollo de este anexo, continuamente se remite a las tablas, de donde se han tomado las distintas variables en las unidades mencionadas en las mismas, de modo que pueda abreviarse la descripción término a término de las distintas ecuaciones.

Debe indicarse asimismo, la recomendación señalada en la bibliografía, que indica que la cresta mínima de líquido sobre la altura de la presa ha de ser de 10 mm. Como podrá comprobarse en las tablas de cálculo que se presentarán como muestra de resultados de los cálculos del presente apartado, tal recomendación de diseño será debidamente satisfecha.

Finalmente,  $h_B$ , el retroceso del líquido hacia el vertedero del que parte sobre el nivel del plato, requiere distintas consideraciones que se presentan a continuación. Se estima que  $h_B$  es el resultado de la contribución de dos pérdidas de carga:

$$h_B = h_E + h_{VAP} \quad (A3.44)$$

Donde  $h_E$  la pérdida de carga que experimenta el líquido cuando ingresa en el plato procedente del vertedero. Por su parte,  $h_{VAP}$  hace referencia al total de caídas de presión que experimenta el gas, en su recorrido ascensional a través de las perforaciones.

El segundo sumando, a su vez se desglosa en el siguiente sumatorio:

$$h_{VAP} = h_D + h_L + h_R \quad (A3.45)$$

Donde  $h_D$  corresponde a la caída de presión a plato seco,  $h_L$ , a la que experimenta el gas al espumar por contacto con el líquido y  $h_R$ , a la pérdida de carga residual sufrida por el gas al vencer la tensión superficial del líquido.

Presentadas todas las pérdidas de carga que supone el flujo de fluidos en la columna, se desarrollarán aquéllas que aún no han sido descritas y se cerrará el apartado verificando si se satisface la desigualdad dada por (A3.39).

La pérdida de carga en el plato seco,  $h_D$ , supone determinar la pérdida de presión que se produce a la entrada de las perforaciones,

en el tubo que, por el espesor del plato, suponen las mismas, así como la pérdida a la salida. Es de aplicación la expresión siguiente:

$$h_D = \frac{v_0^2 \rho_V}{2g\rho_L} C_0 \left[ 0,40 \left( 1,25 - \frac{A_0}{A_n} \right) + \frac{4fe}{d_0} + \left( 1 - \frac{A_0}{A_n} \right)^2 \right] \quad (A3.46)$$

Donde  $v_0$  es la velocidad del gas a través de los orificios, dada por (A3.36),  $g$  es la aceleración de la gravedad sobre la superficie de la tierra,  $C_0$  es el factor de orificio dependiente del espesor del plato y el diámetro de los mismos y  $f$  es el factor de fricción de *Fanning*. Más desarrolladamente:

$$(A3.47) \left\{ \begin{array}{l} g = 9,80665 \text{ m/s}^2 \quad (1) \\ C_0 = 1,09 \left( \frac{d_0}{e} \right)^{0,25} \quad (2) \\ f \rightarrow \text{Figura A3.11, } Re_0 = \frac{\rho_V v_0 d_0}{\mu_V}, \text{ Tubos lisos } (3) \end{array} \right.$$

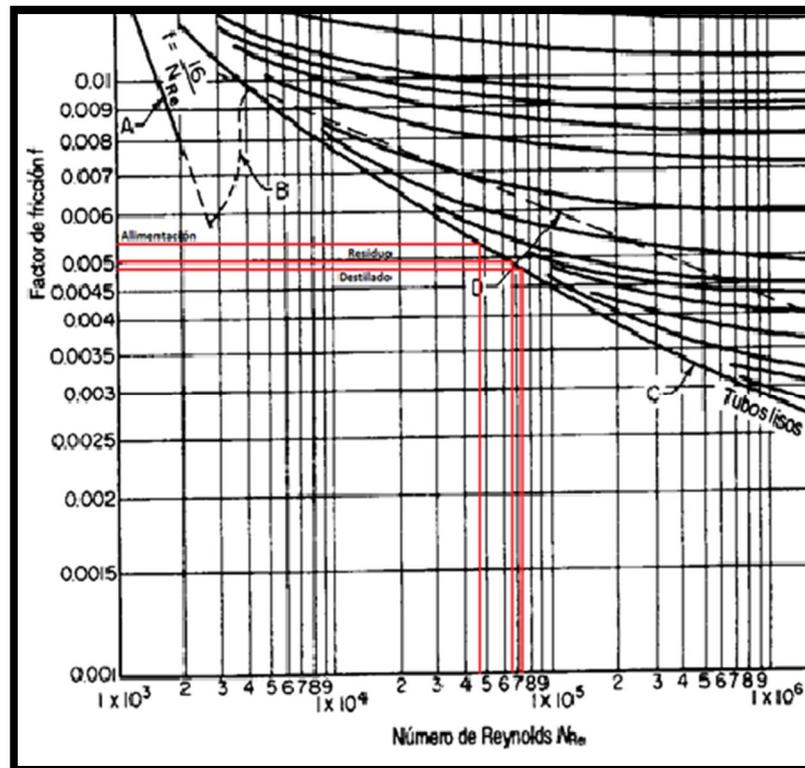


Figura. A3.11. Gráfico de *Moody*.

(Manual del Ingeniero Químico. *R. H. Perry, D. W. Green, J. O. Maloney, 6ª Edición*)

El factor de *Fanning* debe leerse sobre un gráfico de *Moody*: sobre la curva de tubos lisos, (así se consideran los tubos formados por los orificios), se lee  $f$  para el Reynolds de orificio,  $Re_0$  correspondiente, que caracteriza el régimen de flujo del vapor en el plato. Conviene redundar en la importancia de introducir las variables en unidades SI.

En el plato, el líquido tiende a espumar cuando el vapor lo atraviesa a su paso por las perforaciones. Se ha indicado a lo largo de esta sección el hecho de que la espuma perjudica el funcionamiento hidráulico de la columna. Conviene matizar este principio llegados a este punto. La formación de espuma es normal en la interfase vapor-líquido, lo que resulta nocivo es el hecho de que la espuma ascienda al siguiente plato arrastrando líquido y posibilitando la inundación. Por consiguiente el vapor ha de escapar a la espuma antes de arrastrar gotas pulverizadas a la siguiente etapa. La profundidad equivalente de líquido claro,  $h_L$ , es una estimación de la altura equivalente del líquido y la espuma si ésta coalesciera. De esta forma, la pérdida de carga a plato húmedo,  $h_L$ , viene dada por la expresión que sigue:

$$h_L = 6,10 \cdot 10^{-3} + 0,725h_w - 0,238h_w v_a \rho_V^{0,5} + 1,225 \frac{Q_L}{z} \quad (A3.48)$$

Donde  $h_w$  ya se ha presentado con anterioridad y corresponde a la altura de la presa,  $v_a$  es la velocidad del vapor a través del área activa del plato y  $z$ , el ancho del flujo promedio. Las unidades coherentes con esta expresión han de expresarse en SI. Se desarrollan las nuevas variables a continuación:

$$(A3.49) \left\{ \begin{array}{l} v_a = \frac{Q_V}{A_a} \quad (1) \\ z = \frac{T + W}{2} \quad (2) \end{array} \right.$$

Debido a la tensión superficial del líquido, aún debe estimarse una pérdida de carga residual del gas al atravesarlo. La bibliografía

propone la siguiente expresión deducida a partir de la ecuación de *Laplace-Young*:

$$h_R = \frac{6\sigma g_c}{\rho_L d_0 g} \quad (A3.50)$$

Donde no se ha introducido ninguna variable no expuesta con anterioridad. Trabajando en unidades SI,  $g_c$  adquiere valor unitario.

Para rematar el apartado, resta presentar la expresión apropiada para la estimación de  $h_E$ . Esta caída de presión se debe al ingreso del líquido en el plato: el bajante supone un accidente brusco en la conducción del líquido, que implica una pérdida de carga estimable según la expresión que sigue:

$$h_E = \frac{3}{2g} \left( \frac{Q_L}{A_{da}} \right)^2 \quad (A3.51)$$

La única variable no aparecida anteriormente es  $A_{da}$ . Se trata ésta de un área decidida entre dos:  $A_v$ , el área de vertederos y  $A_L$ , el área libre entre el vertedero y el plato, tomándose la menor de éstas como  $A_{da}$ . Según criterios de diseño de la presa se toma:

$$A_L = (h_w - 0,025)W \quad (A3.52)$$

De modo que:

$$A_{da} \neq A_v \Leftrightarrow A_v > A_L \Rightarrow A_{da} = A_L \quad (A3.53)$$

Una vez descritas mediante ecuaciones todas las pérdidas de carga presentes en el plato, puede acometerse la verificación requerida. Si bien, es preciso efectuar una puntualización previa.

De la desigualdad (A3.39), resta un término por dilucidar: el gradiente de nivel del líquido a través del plato,  $\Delta$ . La bibliografía propone distintas correlaciones para la estimación de dicho gradiente, sin embargo también menciona que lo más usual para platos perforados es despreciarlo. Normalmente, la verificación del gradiente

de nivel del líquido procede en platos de válvulas y con un elevado paso de líquido, Z. En este caso, pese al gran diámetro del plato, ergo elevado paso de líquido, se desprejará la contribución del gradiente de nivel de líquido, ya que, como se aseveró en el apartado de decisión del número de pasos de líquido por plato, la introducción del paso múltiple en los platos es condición garante de homogeneidad de nivel del líquido.

De este modo, la verificación final del presente apartado, considerado lo anterior y modificando (A3.39), resulta:

$$h_w + h_c + h_B \leq \frac{t}{2} \quad (A3.54)$$

Se presenta el procedimiento de cálculos justificativos:

- Cálculo de  $h_w$ : Se aplica (A3.40) al espaciado de platos dado en la tabla A3.XXXVII.
- Cálculo de  $h_c$ : Se sigue el ciclo iterativo descrito con anterioridad.
- Cálculo de  $h_B$ : Precisa el cálculo de  $h_{VAP}$  y  $h_E$ . A su vez,  $h_{VAP}$  comprende  $h_D$ ,  $h_L$  y  $h_R$ . Una vez calculados todos, como se indica a continuación, se aplica (A3.45).
  - o Cálculo de  $h_D$ : Se obtiene  $Re_o$  y  $f$ , aplicando (A3.47.3) y haciendo uso de la Figura A3.11. Los datos para ello, vienen dados en las tablas A3.XXXI a A3.XXXIII, A3.XLVII a A3.XLIX y A3.XXXVII. Obtenido  $f$ , se calcula  $C_o$ , aplicando (A3.47.2) a datos de A3.XXXVII. Con lo anterior, (A3.47.1) y los datos dados en las tablas A3.XXXI a A3.XXXIII, A3.XXXVII y A3.XLIV a A3.XLVI; se aplica (A3.46).
  - o Cálculo de  $h_L$ : Se aplica (A3.49.1) y (A3.49.2) a los datos dados en las tablas A3.XLI a A3.XLVI. Con esto,  $h_w$  calculado en el primer guión y los datos dados en las tablas A3.XXXI a A3.XXXVI, se aplica (A3.48).

- Cálculo de  $h_R$ : Se aplica (A3.50) a los datos (A3.47.1) y los consignados en las tablas A3.XXXI a A3.XXXIII y A3.XXXVII.
- Cálculo de  $h_E$ : Debe decidirse el valor de  $A_{da}$ . Se aplica (A3.52) a  $h_w$  y a  $W$  dada en las tablas A3.XLIV a A3.XLVI. Se decide según (A3.53), atendiendo a  $A_v$ , dada en las mismas tablas. Se aplica (A3.51) a  $g$  dada en (A3.47.1), al caudal de líquido dado en las tablas A3.XXXIV a A3.XXXVI y a  $A_{da}$  dilucidada.
- Se verifica (A3.54).

Las siguientes tablas muestran los resultados derivados de la aplicación del procedimiento.

Pérdidas de carga: Zona de rectificación			
$h_w$ (m)	0,09	$W_{ef}/W$	0,975
	$h_{ccalc}$ (m)	0,042	
$C_0$	1,296	$v_0$ (m/s)	16,682
$Re_0$	$7,13 \cdot 10^4$	$f$	0,0048
$4f$	0,0192	$h_D$ (m)	0,252
$v_a$ (m/s)	0,946	$z$ (m)	4,25
$h_L$ (m)	0,048	$h_R$ (m)	0,001
$A_L$ (m <sup>2</sup> )	0,228	$g$ (m/s <sup>2</sup> )	9,80665
$A_{da}$ (m <sup>2</sup> )	0,228	$h_E$ (m)	0,009
$h_{VAP}$ (m)	0,301	$h_B$ (m)	0,310
$\Delta$	0	Pérdidas (m)	0,443
<b>Verificado</b>			

Tabla. A3.L. Verificación de pérdidas de carga para la zona de rectificación

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

<b>Pérdidas de carga: Plato de alimentación</b>			
$h_w$ (m)	<b>0,09</b>	$W_{ef}/W$	0,976
	$h_{ccalc}$ (m)	<b>0,052</b>	
$C_0$	1,296	$v_0$ (m/s)	20,919
$Re_0$	$4,79 \cdot 10^4$	$f$	0,0055
$4f$	0,022	$h_D$ (m)	<b>0,177</b>
$v_a$ (m/s)	1,186	$z$ (m)	5,525
$h_L$ (m)	<b>0,057</b>	$h_R$ (m)	<b>0,002</b>
$A_L$ (m <sup>2</sup> )	0,296	$g$ (m/s <sup>2</sup> )	<b>9,80665</b>
$A_{da}$ (m <sup>2</sup> )	0,296	$h_E$ (m)	<b>0,017</b>
$h_{VAP}$ (m)	<b>0,235</b>	$h_B$ (m)	<b>0,252</b>
$\Delta$	<b>0</b>	Pérdidas (m)	<b>0,394</b>
<b>Verificado</b>			

Tabla. A3.LI. Verificación de pérdidas de carga para el plato de alimentación

<b>Pérdidas de carga: Zona de agotamiento</b>			
$h_w$ (m)	<b>0,09</b>	$W_{ef}/W$	0,968
	$h_{ccalc}$ (m)	<b>0,057</b>	
$C_0$	1,296	$v_0$ (m/s)	15,487
$Re_0$	$6,53 \cdot 10^4$	$f$	0,005
$4f$	0,02	$h_D$ (m)	<b>0,165</b>
$v_a$ (m/s)	0,878	$z$ (m)	4,675
$h_L$ (m)	<b>0,060</b>	$h_R$ (m)	<b>0,002</b>
$A_L$ (m <sup>2</sup> )	0,250	$g$ (m/s <sup>2</sup> )	<b>9,80665</b>
$A_{da}$ (m <sup>2</sup> )	0,250	$h_E$ (m)	<b>0,0218</b>
$h_{VAP}$ (m)	<b>0,226</b>	$h_B$ (m)	<b>0,248</b>
$\Delta$	<b>0</b>	Pérdidas (m)	<b>0,396</b>
<b>Verificado</b>			

Tabla. A3.LII. Verificación de pérdidas de carga para la zona de agotamiento

El nivel de la cresta del líquido sobre el vertedero,  $h_c$ , que se ha proporcionado, coincide con el valor del último  $h_c$  supuesto, a su vez coincidente con el calculado hasta la diezmillonésima.

La suma de las pérdidas, dada por (A3.54), no debe superar la mitad del espaciado asumido, a la sazón, 0,45 m. Se comprueba que no sucede en ninguna región de columna, de donde se concluye que el diseño hidráulico es el adecuado a los requerimientos.

#### **A3.C1.4. Decisiones finales de diseño hidráulico**

A lo largo de este anexo de cálculo, se ha caracterizado el flujo de líquido y vapor a través de la operación “EXTRACTIVA 1”: se ha balanceado la unidad, determinado propiedades de corrientes, dimensionado columna y platos y verificado su funcionamiento hidráulico y pérdidas de carga.

Se hace precisa una última sección que determine aspectos fundamentales de construcción de la unidad, tales como el número real de platos, la diferenciación, si procede, de diámetros según zonas de la columna, la posición del plato de alimentación, altura, etc.

Estas decisiones finales no pueden acometerse sin conocerse la eficacia de la separación, que permitirá discriminar entre platos ideales calculados según el método FUG, en los capítulos correspondientes; y los platos reales requeridos.

Se dividirá esta sección final del capítulo en tres apartados:

- Determinación de eficacia por zonas.
- Decisión final de columna.
- Evaluación de alternativas.

##### **A3.C1.4.1. Determinación de eficacia por zonas**

La eficacia global de la columna se define según la siguiente expresión:

$$E_0 = \frac{NPI}{NPR} \quad (A3.55)$$

Donde la eficacia global se expresa como la parte proporcional de platos ideales respecto a los platos necesarios para obtener la separación deseada.

El método FUG, como todos los métodos rápidos de cálculo de columnas de destilación, proporciona el número de platos ideales requeridos para la separación que se plantee. Dichos platos ideales suponen la premisa de que las corrientes de líquido y vapor que abandonan cada plato, lo hacen en equilibrio, prestando de esta forma, una separación óptima. Es sabido que las distintas dificultades de funcionamiento hidráulico, pérdidas de carga y tantas otras que se han mencionado en esta sección, imposibilitan la perfecta separación y de ahí la necesidad de definir una eficacia que permita sobredimensionar la columna a fin de obtener el rendimiento preconizado a la columna.

La ecuación (A3.55) es la expresión más grosera propuesta para el rendimiento de la separación. Existen distintos planteamientos más o menos rigurosos a la hora de obtener el rendimiento: métodos que profundizan hasta el punto de estimar el rendimiento de la separación en sectores de cada plato, hasta métodos, como el que se aplicará, que procura un valor conservador de la eficacia separadora de toda la columna, considerada ésta una caja negra.

A esta sazón, se realizarán varias estimaciones de la eficacia de la columna, de modo que pueda compararse la validez de los métodos empleados. Se estimará la eficacia global según el método gráfico de *O'Connell* y también se diferenciará por zonas, haciendo uso de la correlación de *Van Winkle et al.* Finalmente, se corregirá la más baja de las eficacias según la tabla de *Lockhart y Leggett*, que afinan la predicción conservadora del primer autor.

Es preciso mencionar, que tales métodos son de aplicación para sistemas binarios, a lo que cabe añadir las siguientes consideraciones, indicadas en la bibliografía, (libro de *Towler*), a la hora de estimar la eficacia de sistemas multicomponentes:

1. Si los componentes son similares, la eficacia estimada no ha de ser muy discrepante para un sistema multicomponente.
2. Si la eficacia estimada es alta, no es de esperar que la del sistema multicomponente sea menor.
3. Si la fase limitante de la separación es el líquido, las diferencias de eficacia entre un sistema binario y otro multicomponente, deben ser despreciables.

En el presente caso, el punto primero se satisface, ya que, a excepción del disolvente, cuya función es facilitar el corte de componentes, la fracción  $C_4$  contiene sustancias químicamente similares, (ahí estriba la dificultad de la separación). El punto segundo permite admitir que la estimación más conservadora para un sistema binario, es válida para el sistema multicomponente. Por último, en este caso la resistencia limitante es claramente el lado del líquido, ya que el sistema es muy volátil y tiende a escindir con relativa facilidad.

Por todos los motivos anteriores, la aplicación de métodos de estimación de la eficacia para sistemas binarios, es válida en este caso.

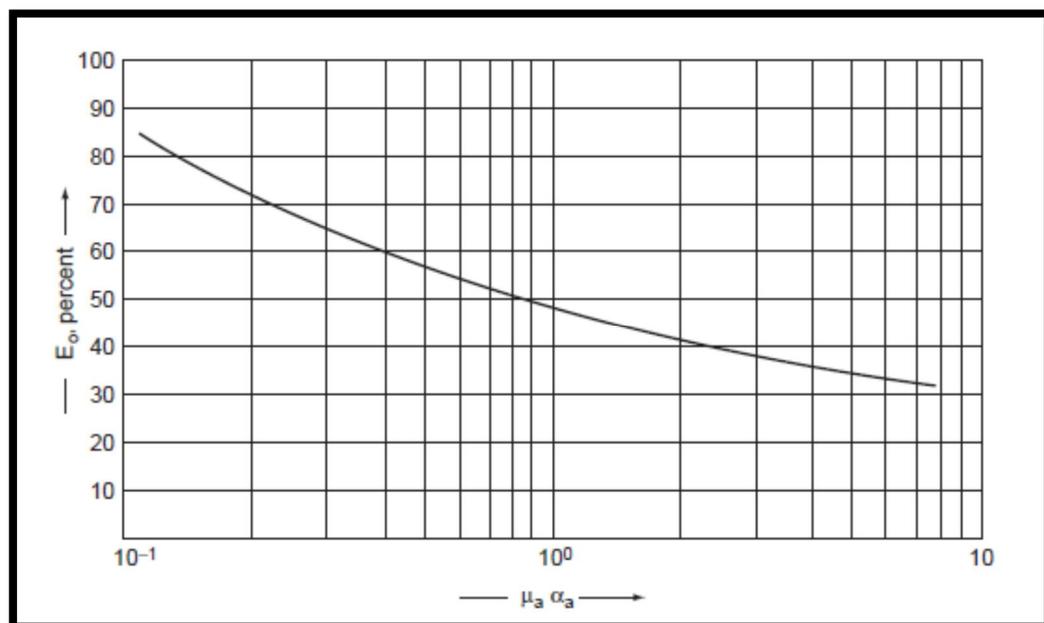


Figura. A3.12. Correlación de *O'Connell*. (G. Towler, R. Sinnott, 2008)

La eficacia global de *O'Connell*, es una relación gráfica sencilla, (no toma en consideración variables relacionadas con el diseño de platos), dada por el producto de la viscosidad promedio del líquido de la torre por la volatilidad relativa del clave ligero respecto al clave pesado, expresado en cP. La correlación ajusta datos experimentales para sistemas de hidrocarburos, disolventes clorados y mezclas hidroalcohólicas. Se usa extensamente en la predicción de la eficacia global para distintas unidades de separación y para un gran abanico de sistemas.

Algunos años después de la publicación del gráfico, *Eduljee* sugirió el siguiente ajuste analítico:

$$E_0(\%) = 51 - 32,5 \log(\alpha\mu) = 51 - 32,5 \log \frac{\alpha\mu|_{\text{cabeza}} + \alpha\mu|_{\text{cola}}}{2} \text{ Ajuste de } Eduljee \text{ (A3.56)}$$

La volatilidad relativa se calcula como sigue:

$$\alpha_{LK/HK}|_{\text{cabeza cola}} = \frac{K_{LK}|_{\text{cabeza cola}}}{K_{HK}|_{\text{cabeza cola}}} = \frac{\frac{y_{LK}|_{\text{cabeza cola}}}{x_{LK}|_{\text{cabeza cola}}}}{\frac{y_{HK}|_{\text{cabeza cola}}}{x_{HK}|_{\text{cabeza cola}}}} \text{ (A3.57)}$$

Se trata del cociente de los coeficientes de reparto en cabeza o cola de columna. Los datos se toman de las tablas A3.IV y A3.V, siendo los componentes, 3 el clave ligero, (1-buteno) y 1 el clave pesado, (1,3-butadieno), a la sazón, el componente de interés. Los datos de viscosidad se toman de la tabla A3.XII. Para aplicar (A3.56), se promedian las volatilidades relativas de cabeza y cola y las viscosidades de líquido en ambas zonas de la columna. Procediendo como se describe, se obtienen los siguientes resultados:

Estimación de la eficacia global			
$\alpha_{\text{cabeza}}$	1	$\alpha_{\text{cola}}$	1,174
$\mu_{L, \text{cabeza}} \text{ (cP)}$	0,169	$\mu_{L, \text{cola}} \text{ (cP)}$	0,328
$\langle \alpha\mu \rangle \text{ (cP)}$	0,277	$E_0 \text{ (\%)}$	<b>69,1</b>

Tabla. A3.LIII. Estimación de la eficacia global de columna. Ajuste de *Eduljee*

La correlación\* de *Van Winkle et al.*, para estimación de la eficacia de plato, es una ecuación potencial de módulos adimensionales que ligan distintas variables asociadas al diseño de platos. La ecuación de uso más extendido, y válida tanto para platos de campana como perforados, viene dada según la expresión (A3.58):

$$E = 0,07Dg^{0,14}Sc^{0,25}Re^{0,08} \text{ Correlación de Van Winkle et al. (A3.58)}$$

Donde  $Dg$  es el módulo de tensión superficial,  $Sc$  es el módulo de Schmidt líquido y  $Re$  es el módulo de Reynolds.

Las expresiones se listan a renglón seguido:

$$(A3.59) \left\{ \begin{array}{l} Dg = \frac{\sigma}{\mu_L u_v} \quad (1) \\ Sc = \frac{\mu_L}{\rho_L \mathcal{D}_{LK,L}} \quad (2) \\ Re = \frac{h_w u_v \rho_V}{\mu_L (FA)} \quad (3) \\ u_v = \frac{Q_V}{A_t} \quad (4) \\ (FA) = \frac{\text{Área de orificios}}{\text{Sección transversal de columna}} = \frac{A_0}{A_t} \quad (5) \end{array} \right.$$

Donde las variables novedosas son  $u_v$ , la velocidad del vapor a través del área total de columna,  $(FA)$ , área fraccional de orificios a total y  $\mathcal{D}_{LK,L}$ , la difusividad del clave ligero, (componente 3, 1-buteno), en el líquido. Esta última fue calculada en el último apartado de la sección correspondiente a determinación de propiedades de corrientes, y se notó como  $\mathcal{D}_{3,m}$ , o difusividad del componente clave ligero en la mezcla líquida. Introduciendo todas las variables en unidades SI, los módulos son adimensionales y la eficacia resulta un valor en tanto por uno.

El cálculo de los grupos adimensionales de (A3.59) requiere los siguientes datos:

\* Véase libro de *Towler*.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

- (A3.59.1): Aplicación de (A3.59.4) tomando datos de las tablas A3.XLI a A3.XLVI.
- (A3.59.2): Requiere datos de las tablas A3.XXXI a A3.XXXIII y A3.XXX.
- (A3.59.3): Aplicación de (A3.59.5), tomando datos de las tablas A3.XLIV a A3.XLVI. Una vez determinada (FA), se requerirán además datos de las tablas A3.XXXI a A3.XXXIII y A3.L a A3.LII, así como  $u_v$  del primer guión.

Resuelto lo anterior, puede aplicarse (A3.58) y obtenerse las eficacias para los platos críticos de la columna: primer plato, o de destilado, plato de alimentación y último plato, o de residuo. Los resultados se consignan en las siguientes tablas:

Estimación de la eficacia del plato primero			
Dg	116,179	$u_v$ (m/s)	0,555
Sc	40,845	(FA)	0,033
Re	33136,842	E	0,792

Tabla. A3.LIV. Estimación de la eficacia del plato primero

Estimación de la eficacia del plato de alimentación			
Dg	96,215	$u_v$ (m/s)	0,592
Sc	77,983	(FA)	0,028
Re	13864,105	E	0,845

Tabla. A3.LV. Estimación de la eficacia del plato de alimentación

Estimación de la eficacia del último plato			
Dg	23,956	$u_v$ (m/s)	0,438
Sc	95,445	(FA)	0,028
Re	16126,193	E	0,934

Tabla. A3.LVI. Estimación de la eficacia del último plato

El objetivo de la aplicación de este último procedimiento radica en contrastar la similitud de la eficacia final corregida, con la de los platos críticos de columna. Como puede observarse, las eficacias de dichos platos críticos oscilan entre el 85%. La eficacia más baja corresponde a la zona de rectificación, representada por el primer plato de columna. Esto es debido a la resistencia creciente a la separación a medida que la mezcla es más ligera, ergo más similar en cuanto a carácter y propiedades químicas. En la sección de agotamiento, la

mezcla es rica en extractante, por lo que la vaporización de las sustancias más ligeras sucede con mayor eficacia.

Para concluir el primer apartado, se corregirá la predicción más baja de la eficacia según la tabla de *Lockhart* y *Leggett*. Estos autores afinan la predicción de la eficacia en base a un porcentaje de mejora del valor estimado de la eficacia global de *O'Connell*, obtenido en función del camino recorrido a lo largo del plato. La condición para esta corrección es que el producto promediado de la volatilidad relativa y la viscosidad esté comprendido entre 0,1 y 1 cP, como es el caso. La tabla de corrección se presenta a continuación, tomada del libro de *Henley*:

<b>Datos para corrección</b>	
<b>Z (ft)</b>	<b>FI (%)</b>
3	0
4	10
5	15
6	20
8	23
10	25
15	27

Tabla. A3.LVII. Datos de *Lockhart* y *Leggett* para corrección de la eficacia global

Donde en función del recorrido en pies del líquido, se tiene el factor de incremento, (FI), correspondiente. De esta forma, puede plantearse una corrección para las zonas de rectificación y agotamiento de la columna. Representando la primera por el comportamiento del plato de destilado y la segunda por el comportamiento del plato de alimentación, (tomando los diámetros más restrictivos); se obtienen las siguientes eficacias globales para cada zona:

<b>Corrección para rectificación</b>	
<b>Z (m)</b>	2,843
<b>Z (ft)</b>	9,327
<b>FI (%)</b>	24,327
<b>E<sub>o</sub>, corregida (%)</b>	<b>85,9</b>

Tabla. A3.LVIII. Correcciones para las zonas de columna. (Continúa en pág. siguiente)

Corrección para agotamiento	
Z (m)	2,761
Z (ft)	9,059
FI (%)	24,059
$E_{0, \text{ corregida}} (\%)$	85,8

Tabla. A3.LVIII. Correcciones para las zonas de columna. (Viene de pág. ant.)

Donde se ha tomado Z de las tablas A3.XLIV y A3.XLV. El factor de incremento se ha interpolado linealmente de la tabla A3.LVII y la corrección final se ha practicado sobre la eficacia global de *O'Connell*, que se ha tomado como la dada por el ajuste de *Eduljee*, (A3.56) a la sazón la más baja de las predicciones; como criterio conservador. La corrección se ha practicado, para cada zona, según:

$$E_{0, \text{ corregida}} (\%) \Big|_{\text{rect. agot.}} = E_{0, \text{ mínima}} \left( 1 + \frac{FI (\%) \Big|_{\text{rect. agot.}}}{100} \right) \cdot 100 \quad (A3.60)$$

La eficacia global mínima se ha tomado de las tablas A3.LIII a A3.LVI, y los factores de incremento, de la misma tabla donde figuran las eficacias globales corregidas, Tabla. A3.LVIII.

Las eficacias estimadas son considerablemente elevadas. Tras contrastar el funcionamiento de otras plantas similares a la proyectada, se constata que, pese al aluvión de inconvenientes derivados del proceso de purificación que intitula el PFC, cuando menos la eficacia de separación estimada se ajusta a valores operativos reales.

#### A3.C1.4.2. Decisión final de columna

Se está en disposición de procurar los datos operativos finales concernientes a la unidad de separación denominada "EXTRACTIVA 1". Tales datos son los que siguen:

- Secciones.
- Diámetro de cada una.
- Ídem para el espaciado de platos.

- Ídem para el número de platos ideales.
- Ídem para la eficacia global corregida.
- Ídem para el número de platos reales.
- Altura de cada sección.
- Altura total.
- Decisión de número de columnas.
- Altura de cada columna, (si procediere).
- Decisión de reducción de diámetro.

Se procede a describir pormenorizadamente cada dato.

La columna constará de dos secciones diferenciadas: rectificación y agotamiento. En la primera, la alimentación se enriquece en los componentes menos volátiles que el clave pesado. En la segunda, se enriquece en aquellos componentes más pesados que el clave ligero, cortándose de esta forma la corriente según el rendimiento de separación estipulado en el método FUG.

El diámetro de la sección de rectificación coincidirá con el obtenido para el plato primero, mientras que el de la sección de agotamiento coincidirá con el obtenido para el plato de alimentación; siendo estos los diámetros restrictivos, por comportar las mayores dimensiones. De la misma forma, cada sección estará representada por las dimensiones calculadas para el primer plato, (sección de rectificación) y el plato de alimentación, (sección de agotamiento). Estos datos se toman de las tablas A3.XLI y A3.XLIV, y A3.XLII y A3.XLV.

El espaciado de platos, por mor del elevado diámetro de cada una de las secciones, es el mayor de los proporcionados por la Figura A3.3 y es coincidente para ambas zonas de la columna.

El número de platos ideales viene dado directamente por la aplicación del método de FUG a la corriente de alimentación, (véase anexo correspondiente).

La eficacia global corregida difiere ligeramente en cada una de las dos secciones de la columna, según lo recogido en la Tabla. A3.LVIII.

El número de platos reales se calcula a partir de los datos descritos en los dos párrafos anteriores, según la ecuación dada *ut supra*, (A3.55), modificada para cada zona como sigue:

$$NPR \Big|_{\substack{rect. \\ agot.}} = \frac{NPI}{E_{0, \text{ corregida}}} \Big|_{\substack{rect. \\ agot.}} \quad (A3.61)$$

Como número de platos reales para la zona de rectificación, debe tomarse el número dado por (A3.61) truncado en la unidad y aproximado siempre a la siguiente, como criterio conservador. Para la zona de agotamiento procedería, de la misma forma, tomar un plato más, si bien, y dado que debe considerarse el calderín como etapa de equilibrio, los platos reales obtenidos se aproximarán a la unidad anterior.

La altura de cada sección es el resultado de multiplicar el espaciado de platos por el número de platos reales.

La altura total es el total de las alturas de las secciones de rectificación y agotamiento.

En función de la altura total, y como criterio de diseño, se observará la segregación de la columna en un tren de separación, compuesto por varias columnas interconectadas de la misma forma que lo estarían si se situase cada una sobre la inmediata. Este criterio, emanado de la bibliografía disponible, (libro de *Henley*) indica que la altura total dividida por 212 pies y truncada en la unidad, es el número apropiado de columnas. En todo caso, ninguna columna individual superará los 90 m de altura.

Caso de segregar el tren de separación en varias columnas, la altura de cada columna se dilucida dividiendo la altura total por el

número de columnas seleccionado, cambiando convenientemente unidades.

Finalmente, se comprobará la diferencia porcentual entre los diámetros de cada sección. Como criterio operativo, se mantendrá el diámetro superior como diámetro de toda la columna, siempre que la diferencia de diámetros no supere el 20%. La diferencia porcentual de diámetros se calcula según:

$$\% \Delta T \Big|_{\substack{rect. \\ agot.}} = \frac{T_{mayor} - T_{menor}}{T_{mayor}} \cdot 100 \quad (A3.62)$$

Considerando lo anterior, se obtiene:

Decisión de columna			
Rectificación		Agotamiento	
<b>T (m)</b>	5	<b>T (m)</b>	6,5
<b>t (m)</b>	0,9	<b>t (m)</b>	0,9
<b>NPI<sub>rect.</sub></b>	151,014	<b>NPI<sub>agot.</sub></b>	43,725
<b>E<sub>o, corregida</sub></b>	85,9	<b>E<sub>o, corregida</sub></b>	85,8
<b>NPR<sub>rect.</sub></b>	175,711	<b>NPR<sub>agot.</sub></b>	50,986
	176		50
<b>h<sub>rect.</sub> (m)</b>	158,4	<b>h<sub>agot.</sub> (m)</b>	45
<b>h<sub>total</sub> (m)</b>		203,4	
<b>h<sub>total</sub> (ft)</b>		667,3	
<b>Criterio 212 ft</b>		3,148 ≈ 3 columnas	
<b>Decisión (m/torre)</b>		67,8	
<b>% ΔT</b>		23,1	

Tabla. A3.LIX. Datos para la decisión final de columna

Por consiguiente, “EXTRACTIVA 1”, es una unidad compuesta por tres columnas de 67,8 m cada una. La sección de rectificación es la más luenga y consta de 176 platos, en tanto que la sección de agotamiento consta de 50. Ambas secciones suponen 226 platos distribuidos de la siguiente forma:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

---

- 1ª columna: Sección de agotamiento: 50 platos separados 0,9 m suponen 45 m de altura. Sección de rectificación: Descontada la sección de agotamiento, restan 22,8 m repartidos a 0,9 m de espaciado, resultan 25 platos de rectificación.
- 2ª columna: Sección de rectificación: 67,8 m de altura repartidos a 0,9 m de espaciado, resultan 75 platos de rectificación.
- 3ª columna: Sección de rectificación: *ídem ibídem*, 75 platos.

La suma de los 50 platos de agotamiento y los 25 de rectificación de la primera columna, amén de los 75 platos de cada una de las columnas restantes; supone 225 platos: resta acomodar un último plato de rectificación, lo que se procurará en la primera columna. De esta forma, la disposición es la que sigue:

- 1ª columna: Sección de agotamiento: 50 platos de triple paso, del 226 al 177; 45 m de altura. Sección de rectificación: 26 platos de doble paso, del 176 al 151; 23,4 m de altura. Total de la 1ª columna: 68,4 m.
- 2ª columna: Sección de rectificación: 75 platos de doble paso, del 150 al 76; 67,5 m de altura.
- 3ª columna: Sección de rectificación: 75 platos de doble paso, del 75 a 1; 67,5 m de altura.

Los platos se numeran del 1 al 226, tomando como primer plato el de cabeza de la columna tercera y como último, el de cola de la columna primera. Si se suman las alturas, el total coincide con  $h_{total}$  dada en la Tabla. A3.LIX.

La alimentación se inserta entre los platos 176 y 177, a su temperatura de ebullición, es decir, entre el primer plato de la sección de agotamiento, (177), y el último de la sección de rectificación, (176).

La decisión final sobre la reducción de diámetros es afirmativa. El criterio del 20% de diferencia de diámetros entre ambas secciones

así lo recomienda, por lo que la primera torre comprende 51 platos de 6,5 m de diámetro y 25 platos de 5 m de diámetro. Esta decisión alude al diámetro requerido en el plato de alimentación, de 6,5 m. Por tanto, aunque la sección de rectificación comienza en el plato 176, la reducción se practica a partir del plato 175. A partir de este último, se construirán los platos con paso doble, como corresponde a la sección de rectificación. El plato 176, último de rectificación, mantiene el triple paso, como el resto de los platos de agotamiento. Las dos torres restantes se construirán con un diámetro de 5 m y platos de doble paso.

Las conexiones se efectúan de la siguiente forma:

- El vapor del plato 151, primer plato de la primera columna, se introduce en el plato 150, último plato de la segunda columna. Asimismo, el líquido del plato 150, se bombea al plato 151.
- El vapor del plato 76, primer plato de la segunda columna, se introduce en el plato 75, último plato de la tercera columna. Asimismo, el líquido del plato 75, se bombea al plato 76.
- El vapor del plato 1, esto es, el destilado, se condensa totalmente y la fracción determinada por la relación de reflujo, se retorna como líquido al mismo plato.
- El líquido del plato 226, esto es, el residuo de columna, se calienta a la temperatura indicada por los datos de equilibrio y se retorna el vapor correspondiente al mismo plato.
- El líquido no retornado a la tercera columna en el plato 1, constituye el destilado de "EXTRACTIVA 1" y se destina en parte a "BLENDING de EXTRACTIVA 1" y en parte a "TANQUES de CORRIENTES", según el diagrama de flujo.
- El líquido en equilibrio con el vapor retornado a la primera columna en el plato 226, se retira como residuo de "EXTRACTIVA 1" y, según el diagrama de flujo, constituye la alimentación de "EXTRACTIVA 2".

### A3.C1.4.3. Evaluación de alternativas

Este apartado final, pretende establecer una comparativa de escenarios cuando se modifica uno de los parámetros de diseño. El método FUG, establece que la relación de reflujo operativa más típica excede 1,3 veces la relación mínima calculada.

Hasta el apartado anterior, así se ha considerado a la hora de determinar los platos ideales y practicar los balances de materia involucrados en “EXTRACTIVA 1”. Ahora bien, cuando la operación de destilación obliga a disponer un número elevado de etapas de equilibrio, como se ha demostrado ser el caso, en lugar de tomar 1,3 veces el reflujo mínimo, puede, como criterio operativo, tomarse 1,1 veces. Con esto, al disminuir el retorno a columna se logran dos efectos:

- En primer lugar, puesto que el reflujo es menor, el líquido total que trasiega la columna es asimismo cuantitativamente inferior. Desde este punto de vista, el diámetro precisado para la unidad será menor.
- En segundo lugar, no obstante lo anterior, se tiene que al disminuir el reflujo, necesariamente se requerirá mayor número de etapas de equilibrio para lograr el mismo efecto separador, puesto que un mayor reflujo mejora la eficacia de la separación por aumentar el contacto de fases.

Por consiguiente, se llega a una situación de compromiso donde deberá decidir el criterio económico, anteponiendo los aspectos pertinentes de seguridad. Antes de tomar decisión alguna, será preceptivo repetir los cálculos de este capítulo de modo que se obtengan los mismos resultados mostrados en la Tabla A3.LIX, para la nueva relación de condiciones de la operación.

En primer lugar, procede rehacer los cálculos del balance de materia, tal como se mostró en la primera sección de este capítulo:

Se aplica la ecuación (A3.1) a los datos de la Tabla A3.2, considerando el siguiente reflujo externo,  $R_D$ :

$$R_D = L/D = 3,40 \cdot \frac{1,1}{1,3} \cong 2,88 \text{ (A3.1.3)}$$

Se ha tomado la relación de reflujo dada en (A3.1.2), correspondiente a 1,3 veces la relación mínima, y se ha obtenido la que la excede 1,1 veces. Aplicando asimismo (A3.2) y convirtiendo a unidades más convenientes, como se mostró en la antedicha sección A3.C1.1, se obtiene los nuevos valores de todas las corrientes:

Balance de materia. Caso 2					
U (kmol/h)	1903,483	D (kmol/h)	589,822	W (kmol/h)	1313,661
L (kmol/h)	1699,371	V (kmol/h)	2289,192		
L' (kmol/h)	3602,854	V' (kmol/h)	2289,192		

Tabla. A3.LX. Caudales de las corrientes de “EXTRACTIVA 1”. Caso 2

Se ha decidido denominar estos datos como pertenecientes al “caso 2”, al objeto de distinguirlos de aquellos ligados a una relación de reflujo 1,3 veces superior a la mínima.

Puesto que las composiciones de las corrientes no sufren modificación alguna, no es preciso recalcular las propiedades, por lo que pueden tomarse directamente junto a las composiciones y los datos de la siguiente tabla:

Propiedades del destilado		Propiedades del plato de alimentación		Propiedades del residuo	
L (kmol/h)	1699,371	L' (kmol/h)	3602,854	L' (kmol/h)	3602,854
V (kmol/h)	2289,192	V' (kmol/h)	2289,192	V' (kmol/h)	2289,192
(L/V)	0,742	(L/V)	1,574	(L/V)	1,574

Tabla. A3.LXI. Propiedades de las distintas corrientes. Caso 2

Que supone aglutinar los datos consignados en las tablas A3.XXXI a A3.XXXIII. Todos los datos que figuran en aquéllas y no

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

en ésta última son coincidentes: composiciones y propiedades, tal como se ha advertido más atrás.

Seguidamente se recalcula el número de pasos por plato, aplicando el procedimiento señalado en el apartado A3.C1.3.2. Lo que requerirá la aplicación de la ecuación (A3.18) a la obtención de los caudales volumétricos de líquido y vapor, en cada uno de los platos. Tomando como datos las densidades indicadas en las tablas A3.XXXI a A3.XXXIII, válidas para el caso 2, los caudales de la Tabla A3.LXI y el diámetro de la reiteración del cálculo de áreas, que se mostrará posteriormente para este segundo caso; cambiando convenientemente unidades se obtiene:

<b>Determinación de pasos: Plato de destilado</b>			
<b>Q<sub>L</sub> (m<sup>3</sup>/s)</b>	0,046	<b>Q<sub>L</sub> (gal (US)/min)</b>	733,552
<b>T (m)</b>	5	<b>T (ft)</b>	16,404
<b>N° de pasos (p)</b>	<b>2</b>		

Tabla. A3.LXII. Determinación de pasos en zona de rectificación. Caso 2

<b>Determinación de pasos: Plato de alimentación</b>			
<b>Q<sub>L</sub> (m<sup>3</sup>/s)</b>	0,090	<b>Q<sub>L</sub> (gal (US)/min)</b>	1429,314
<b>T (m)</b>	6	<b>T (ft)</b>	19,685
<b>N° de pasos (p)</b>	<b>3</b>		

Tabla. A3.LXIII. Determinación de pasos en el plato de alimentación. Caso 2

<b>Determinación de pasos: Plato de residuo</b>			
<b>Q<sub>L</sub> (m<sup>3</sup>/s)</b>	0,087	<b>Q<sub>L</sub> (gal (US)/min)</b>	1380,791
<b>T (m)</b>	5,5	<b>T (ft)</b>	18,045
<b>N° de pasos (p)</b>	<b>3</b>		

Tabla. A3.LXIV. Determinación de pasos en zona de agotamiento. Caso 2

Los pasos se han estimado a partir del gráfico de la Figura A3.1, aplicando en esta ocasión los datos recién tabulados. Como justificación de dicha estimación, se presenta la figura siguiente:

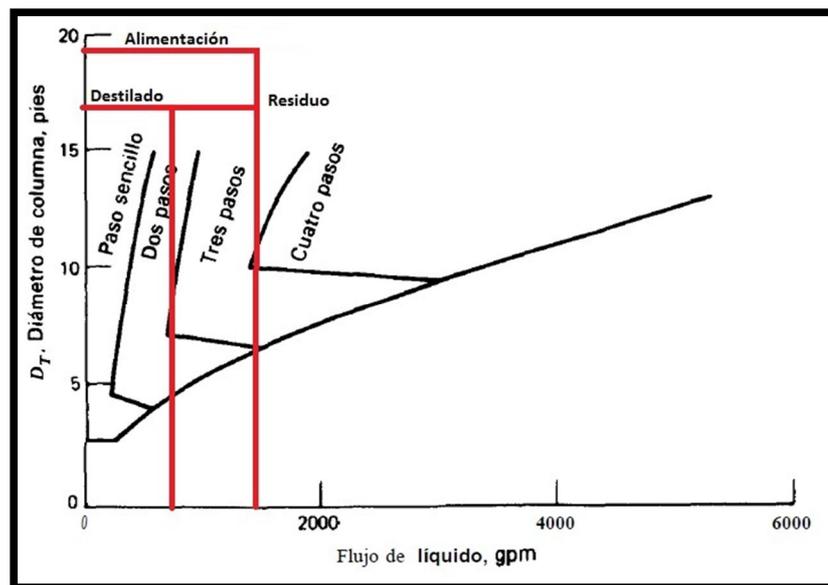


Figura. A3.13. Estimación del número de pasos según recomendaciones de la Koch Engineering Company. (E. J. Henley, J. D. Seader, 1999)

Dado que el diámetro de las secciones no recomienda variar el espaciado de platos y tomando en consideración las efectuadas en el apartado A3.C1.3.3, las dimensiones previas permanecen invariantes respecto al caso anterior, por lo que se remite a lo recogido en la Tabla A3.XXXVII.

En cuanto a los límites de operación, por depender estos de caudales volumétricos, como se muestra en la ecuación (A3.22), es preciso rehacer los cálculos. Para ello, se aplican la antedicha, como se explicó en A3.C1.3.4 y (A3.21) a los datos consignados en A3.XXXVII, A3.XXXI a A3.XXXIII y A3.LXI; se obtiene:

Límite superior de operación: Zona de rectificación			
PF	0,060	$\alpha$ (m)	0,062
	<b>0,1</b>	$\beta$ (m)	0,033
$C_F$ (m/s)	0,084	$v_F$ (m/s)	<b>1,039</b>
% permisible $v_F$	78	$v$ (m/s)	<b>0,810</b>

Tabla. A3.LXV. Límite superior para la zona de rectificación. Caso 2

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Límite superior de operación: Plato de alimentación			
PF	0,091	$\alpha$ (m)	0,062
	<b>0,1</b>	$\beta$ (m)	0,033
$C_F$ (m/s)	0,090	$v_F$ (m/s)	<b>1,569</b>
% permisible $v_F$	78	$v$ (m/s)	<b>1,224</b>

Tabla. A3.LXVI. Límite superior para el plato de alimentación. Caso 2

Límite superior de operación: Zona de agotamiento			
PF	0,122	$\alpha$ (m)	0,062
	<b>0,122</b>	$\beta$ (m)	0,033
$C_F$ (m/s)	0,088	$v_F$ (m/s)	<b>1,125</b>
% permisible $v_F$	78	$v$ (m/s)	<b>0,877</b>

Tabla. A3.LXVII. Límite superior para la zona de agotamiento. Caso 2

Donde, en los tres casos, la velocidad admisible del vapor se ha obtenido por aplicación de la ecuación (A3.23), en los términos participados previamente.

El cálculo de áreas y dimensiones de columna se practica siguiendo las indicaciones mencionadas en el apartado A3.C1.3.5. Por motivos de brevedad se omite referir nuevamente el procedimiento, si bien, deben indicarse los nuevos datos involucrados, pertenecientes a las tablas que seguidamente se enumeran: A3.XXXI a A3.XXXIII y A3.LXI, (composiciones, propiedades y nuevos caudales), A3.LXV a A3.LXVII, (velocidad admisible del vapor) y A3.LXII a A3.LXIV, (número de pasos por plato), por orden de necesidad en el desarrollo del cálculo. Así, se rehace el cálculo previo para obtener:

Cálculo previo: Zona de rectificación			
$Q_V$ (m <sup>3</sup> /s)	9,602	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	<b>11,850</b>
W/T	0,7	$A_v/A_t$	0,088
x/T	0,3562	$A_t$ (m <sup>2</sup> )	<b>14,370</b>
T (m)	<b>4,277</b>	T (m)	<b>5</b>

Tabla. A3.LXVIII. Cálculo previo de áreas para la zona de rectificación. Caso 2

Cálculo previo: Plato de alimentación			
$Q_V$ (m <sup>3</sup> /s)	17,308	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	<b>14,146</b>
W/T	0,7	$A_v/A_t$	0,088
x/T	0,3562	$A_t$ (m <sup>2</sup> )	<b>19,196</b>
T (m)	<b>4,944</b>	T (m)	<b>6</b>

Tabla. A3.LXIX. Cálculo previo de áreas para el plato de alimentación. Caso 2

Cálculo previo: Zona de agotamiento			
$Q_v$ (m <sup>3</sup> /s)	9,174	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	10,458
W/T	0,7	$A_v/A_t$	0,088
x/T	0,3562	$A_t$ (m <sup>2</sup> )	14,192
T (m)	4,251	T (m)	5

Tabla. A3.LXX. Cálculo previo de áreas para la zona de agotamiento. Caso 2

Una vez decidido el diámetro de columna, debe reiterarse el cálculo del área total y neta, así como determinarse las distintas dimensiones señaladas en A3.C1.3.5. El procedimiento se detalla en dicho apartado y los datos requeridos figuran en las tablas siguientes: A3.LXVIII a A3.LXX, (cálculos previos), A3.LXII a A3.LXIV, (número de pasos por plato) y A3.XXXVII, (dimensiones previas), por orden de necesidad en el desarrollo del cálculo. Así, se rehace el cálculo previo para obtener:

Áreas y otras dimensiones: Zona de rectificación			
$A_t$ (m <sup>2</sup> )	19,635	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	16,191
$A_v$ (m <sup>2</sup> )	1,722	$A_a$ (m <sup>2</sup> )	11,524
$A_{vig}$ (m <sup>2</sup> )	4,667	$A_o$ (m <sup>2</sup> )	0,653
W (m)	3,5	x (m)	1,7810
Z (m)	2,8430	e (m)	0,0045
	o		10269

Tabla. A3.LXXI. Áreas y dimensiones para la zona de rectificación. Caso 2

Áreas y otras dimensiones: Plato de alimentación			
$A_t$ (m <sup>2</sup> )	28,274	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	20,836
$A_v$ (m <sup>2</sup> )	2,479	$A_a$ (m <sup>2</sup> )	14,115
$A_{vig}$ (m <sup>2</sup> )	6,721	$A_o$ (m <sup>2</sup> )	0,800
W (m)	4,2	x (m)	2,1372
Z (m)	2,5488	e (m)	0,0045
	o		12578

Tabla. A3.LXXII. Áreas y dimensiones para el plato de alimentación. Caso 2

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

<b>Áreas y otras dimensiones: Zona de agotamiento</b>			
$A_t$ (m <sup>2</sup> )	19,635	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	14,469
$A_v$ (m <sup>2</sup> )	1,722	$A_a$ (m <sup>2</sup> )	9,802
$A_{vig}$ (m <sup>2</sup> )	4,667	$A_o$ (m <sup>2</sup> )	0,556
$W$ (m)	3,5	$x$ (m)	1,7810
$Z$ (m)	2,1240	$e$ (m)	0,0045
	o		8735

Tabla. A3.LXXIII. Áreas y dimensiones para la zona de agotamiento. Caso 2

Rediseñadas las columnas, es pertinente rehacer las verificaciones del apartado A3.C1.3.6. Siguiendo el procedimiento y ecuaciones mostradas en dicho apartado, se requerirán datos de las siguientes tablas: A3.LXVIII a A3.LXXIII, (caudales de vapor y áreas netas recalculadas y distintas dimensiones, respectivamente), A3.LXV a A3.LXVII, (velocidad límite superior del vapor y parámetros de flujo), A3.XXXI a A3.XXXIII, (propiedades), A3.XXXVII, (dimensiones previas) y A3.LXII a A3.LXIV, (caudales de líquido). Se obtiene, para las distintas zonas de columna:

<b>Verificaciones: Zona de rectificación</b>					
Inundación	$v_v$ (m/s)	0,593	$v$ (m/s)	0,810	Verificado
Lloriqueo	$v_{vm}$ (m/s)	0,667	$v_o$ (m/s)	14,698	Verificado
Descarga	$v_{Lv}$ (m/s)	0,027	Arrastre fraccional	0,026	Verificados
Máx. carga en vertedero	$Q_{Lv}$ (m <sup>3</sup> /m·s)		0,013	Verificado	

Tabla. A3.LXXIV. Verificaciones para la zona de rectificación. Caso 2

<b>Verificaciones: Plato de alimentación</b>					
Inundación	$v_v$ (m/s)	0,831	$v$ (m/s)	1,224	Verificado
Lloriqueo	$v_{vm}$ (m/s)	1,483	$v_o$ (m/s)	21,631	Verificado
Descarga	$v_{Lv}$ (m/s)	0,036	Arrastre fraccional	0,026	Verificados
Máx. carga en vertedero	$Q_{Lv}$ (m <sup>3</sup> /m·s)		0,021	Verificado	

Tabla. A3.LXXV. Verificaciones para el plato de alimentación. Caso 2

Verificaciones: Zona de agotamiento					
Inundación	$v_v$ (m/s)	0,634	$v$ (m/s)	0,877	Verificado
Lloriqueo	$v_{vm}$ (m/s)	1,073	$v_0$ (m/s)	16,511	Verificado
Descarga	$v_{Lv}$ (m/s)	0,051	Arrastre fraccional	0,02	Verificados
Máx. carga en vertedero	$Q_{Lv}$ (m <sup>3</sup> /m-s)		0,025	Verificado	

Tabla. A3.LXXVI. Verificaciones para la zona de agotamiento. Caso 2

Donde los límites de A3.C1.3.6 para la velocidad de descarga, el arrastre fraccional y la carga máxima sobre vertederos siguen siendo válidos, por lo que queda verificado el correcto funcionamiento de la columna en el caso 2. Para la justificación gráfica de la comprobación de arrastre fraccional, véase la Figura A3.7, dado que los parámetros de flujo son similares en ambos escenarios.

Deben asimismo estimarse las pérdidas de carga para las nuevas condiciones de operación. Se remite a las ecuaciones citadas en el apartado A3.C1.3.7, que aplican sobre los datos de las siguientes tablas: A3.XXXVII, (espaciado entre platos y diámetro de perforaciones), A3.LXII a A3.LXIV, (caudales de líquido), A3.LXVIII a A3.LXXIII, (distintas dimensiones y relaciones), A3.XXXI a A3.XXXIII, (propiedades) y A3.LXXIV a A3.LXXVI, (velocidades de vapor a través de orificios). Cuando se rehacen los cálculos para los nuevos datos se obtiene:

Pérdidas de carga: Zona de rectificación			
$h_w$ (m)	0,09	$W_{ef}/W$	0,977
$h_{ccalc}$ (m)	0,038		
$C_0$	1,296	$v_0$ (m/s)	14,698
$Re_0$	$6,28 \cdot 10^4$	$f$	0,005
$4f$	0,02	$h_D$ (m)	0,196
$v_a$ (m/s)	0,833	$z$ (m)	4,25
$h_L$ (m)	0,050	$h_R$ (m)	0,001
$A_L$ (m <sup>2</sup> )	0,228	$g$ (m/s <sup>2</sup> )	9,80665
$A_{da}$ (m <sup>2</sup> )	0,228	$h_E$ (m)	0,006
$h_{VAP}$ (m)	0,247	$h_B$ (m)	0,254
$\Delta$	0	Pérdidas (m)	0,382
<b>Verificado</b>			

Tabla. A3.LXXVII. Pérdidas de carga para la zona de rectificación. Caso 2

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

<b>Pérdidas de carga: Plato de alimentación</b>			
$h_w$ (m)	<b>0,09</b>	$W_{ef}/W$	0,974
	$h_{ccalc}$ (m)	<b>0,052</b>	
$C_0$	1,296	$v_0$ (m/s)	21,631
$Re_0$	$4,96 \cdot 10^4$	$f$	0,0053
$4f$	0,0212	$h_D$ (m)	<b>0,189</b>
$v_a$ (m/s)	1,226	$z$ (m)	5,1
$h_L$ (m)	<b>0,056</b>	$h_R$ (m)	<b>0,002</b>
$A_L$ (m <sup>2</sup> )	0,273	$g$ (m/s <sup>2</sup> )	<b>9,80665</b>
$A_{da}$ (m <sup>2</sup> )	0,273	$h_E$ (m)	<b>0,017</b>
$h_{VAP}$ (m)	<b>0,246</b>	$h_B$ (m)	<b>0,262</b>
$\Delta$	<b>0</b>	Pérdidas (m)	<b>0,405</b>
<b>Verificado</b>			

Tabla. A3.LXXVIII. Pérdidas de carga para el plato de alimentación. Caso 2

<b>Pérdidas de carga: Zona de agotamiento</b>			
$h_w$ (m)	<b>0,09</b>	$W_{ef}/W$	0,965
	$h_{ccalc}$ (m)	<b>0,058</b>	
$C_0$	1,296	$v_0$ (m/s)	16,511
$Re_0$	$6,96 \cdot 10^4$	$f$	0,005
$4f$	0,02	$h_D$ (m)	<b>0,188</b>
$v_a$ (m/s)	0,936	$z$ (m)	4,25
$h_L$ (m)	<b>0,057</b>	$h_R$ (m)	<b>0,002</b>
$A_L$ (m <sup>2</sup> )	0,228	$g$ (m/s <sup>2</sup> )	<b>9,80665</b>
$A_{da}$ (m <sup>2</sup> )	0,228	$h_E$ (m)	<b>0,022</b>
$h_{VAP}$ (m)	<b>0,247</b>	$h_B$ (m)	<b>0,269</b>
$\Delta$	<b>0</b>	Pérdidas (m)	<b>0,418</b>
<b>Verificado</b>			

Tabla. A3.LXXIX. Pérdidas de carga para la zona de agotamiento. Caso 2

Se encuentran verificadas, en cada caso, las pérdidas de carga para el caso 2. La justificación gráfica del factor de *Fanning*, viene dada en la figura que sigue:

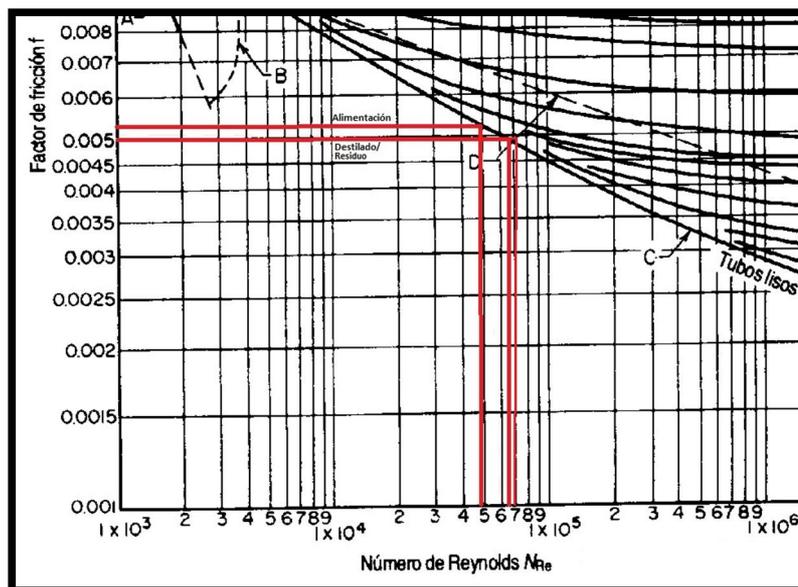


Figura. A3.14. Gráfico de *Moody*.

(Manual del Ingeniero Químico. *R. H. Perry, D. W. Green, J. O. Maloney, 6ª Edición*)

Con lo anterior, se han recalculado las áreas y dimensiones de columna, número de pasos y demás magnitudes para el caso segundo en estudio. A continuación se precisa reevaluar las eficacias, a fin de estimar el número de platos reales concordante a las nuevas condiciones. Se procede como en el apartado A3.C1.4.1:

- Eficacia global: Se aplica el ajuste de *Eduljee*, sobre datos de las tablas A3.IV a A3.V y A3.XII.
- Eficacias de plato de *Van Winkle et al.*: Se aplica la correlación dada por (A3.59) a los datos de las tablas A3.LXVIII a A3.LXXIII, (caudales de vapor y distintas dimensiones), A3.XXXI a A3.XXXIII, (propiedades), A3.XXX, (difusividad del clave ligero en fase líquida) y A3.LXXVII a A3.LXXIX, (altura de la presa).
- Correcciones de *Lockhart y Leggett*. Sobre el dato más bajo de eficacia, se aplica (A3.60). Se toma  $Z$  de las tablas A3.LXXI y A3.LXXII, (platos de destilado y alimentación, que representan respectivamente las zonas de rectificación y agotamiento). El factor de incremento se interpola linealmente.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

te de la Tabla A3.LVII, conocido Z. La condición para la validez de la corrección, obliga a tener un producto promedio de volatilidad relativa y viscosidad entre 0,1 y 1 cP. Condición que se satisface, a tenor de lo mostrado en A3.LXXX.

Se obtiene, aplicando lo anterior:

Estimación de la eficacia global			
$\alpha_{\text{cabeza}}$	1	$\alpha_{\text{cola}}$	1,174
$\mu_{L, \text{cabeza}} \text{ (cP)}$	0,169	$\mu_{L, \text{cola}} \text{ (cP)}$	0,328
$\langle \alpha \mu \rangle \text{ (cP)}$	0,277	$E_o \text{ (%)}$	<b>69,1</b>

Tabla. A3.LXXX. Eficacia global de columna. Ajuste de *Eduljee*. Caso 2

Estimación de la eficacia del plato primero			
Dg	<b>131,860</b>	$u_v \text{ (m/s)}$	0,489
Sc	<b>40,845</b>	(FA)	0,033
Re	<b>29196,180</b>	E	<b>0,798</b>

Tabla. A3.LXXXI. Estimación de la eficacia del plato primero. Caso 2

Estimación de la eficacia del plato de alimentación			
Dg	<b>93,047</b>	$u_v \text{ (m/s)}$	0,612
Sc	<b>77,983</b>	(FA)	0,028
Re	<b>14336,099</b>	E	<b>0,844</b>

Tabla. A3.LXXXII. Estimación de la eficacia del plato de alimentación. Caso 2

Estimación de la eficacia del último plato			
Dg	<b>117,765</b>	$u_v \text{ (m/s)}$	0,467
Sc	<b>95,445</b>	(FA)	0,028
Re	<b>17192,227</b>	E	<b>0,931</b>

Tabla. A3.LXXXIII. Estimación de la eficacia del último plato. Caso 2

Corrección para rectificación	
Z (m)	2,843
Z (ft)	9,327
Fl (%)	24,327
$E_o, \text{ corregida} \text{ (%)}$	<b>85,9</b>

Tabla. A3.LXXXIV. Correcciones de eficacia. Caso 2

Corrección para agotamiento	
Z (m)	2,549
Z (ft)	8,362
FI (%)	23,362
$E_{o, \text{ corregida}} (\%)$	85,3

Tabla. A3.LXXXV. Correcciones de eficacia. Caso 2

Se observa que, dado que las propiedades no han variado, por no hacerlo las composiciones de las corrientes; la eficacia global se mantiene invariante respecto del caso anterior. Por su parte, cuando se vincula la estimación de las eficacias a dimensiones de columna, recalculadas éstas, se obtienen nuevas eficacias de plato. En este caso, se tiene la menor estimación de la eficacia la que corresponde al plato de destilado. No obstante es la eficacia global la que se corrige en las últimas tablas, como criterio conservador. Las eficacias corregidas recién obtenidas son ligeramente inferiores a las del caso primero.

Finalmente, con todo lo recalculado en las tablas A3.LX a A3.LXXXV, se está en condiciones de efectuar los cálculos para la decisión final de columna, tal como se mostró en el apartado precedente. Sea la siguiente tabla:

Decisión de columna			
Rectificación		Agotamiento	
T (m)	5	T (m)	6
t (m)	0,9	t (m)	0,9
$NPI_{\text{rect.}}$	191,058	$NPI_{\text{agot.}}$	55,319
$E_{o, \text{ corregida}}$	85,9	$E_{o, \text{ corregida}}$	85,3
$NPR_{\text{rect.}}$	222,304	$NPR_{\text{agot.}}$	64,869
	223		64
$h_{\text{rect.}} (m)$	200,7	$h_{\text{agot.}} (m)$	57,6
$h_{\text{total}} (m)$		258,3	
$h_{\text{total}} (ft)$		847,4	
Criterio 212 ft		3,997 $\approx$ 4 columnas	
Decisión (m/torre)		64,575	
% $\Delta T$		16,7	

Tabla. A3.LXXXVI. Datos para la decisión final de columna. Caso 2

El número de platos ideales se ha tomado del anexo de diseño de unidades, como resultado de la aplicación del método de FUG a la columna en las nuevas condiciones.

Se observa que se ha reducido el diámetro de la sección de agotamiento y, dado que la diferencia porcentual de diámetros es inferior al 20%, se ha eliminado la necesidad de reducir el diámetro de plato en la región de cambio de zona, (agotamiento a rectificación).

Las ventajas obtenidas son mínimas si se observa el número de platos, que aumenta sensiblemente respecto del caso anterior, y, en consecuencia de lo anterior, el número de torres, que aumenta en una.

En resumen, la reducción de la relación de reflujo obliga a construir una torre adicional del mismo diámetro, (5 m), para la sección de rectificación, cuyo número de etapas de equilibrio requeridas se ha visto incrementado. La sección de agotamiento, pese a reducir ligeramente su diámetro, obliga a construir una torre que contenga todos los platos de agotamiento y algunos de rectificación al mismo diámetro, lo que, comparado con el diámetro requerido por dicha zona, supone un tamaño superior al necesario.

Dadas las circunstancias, se decide que la primera de las opciones es la más ventajosa, puesto que la influencia del diámetro es inferior sobre el coste de platos que el número de estos, y se remite, como decisión final sobre la operación "EXTRACTIVA 1", a lo dispuesto en el apartado anterior.

## **Capítulo A3.C2. Diseño hidráulico de “EXTRACTIVA 2”**

### **A3.C2.1. Datos previos**

El diseño hidráulico de las columnas de platos requiere la evaluación de una serie de ecuaciones en las que se involucran diversas consideraciones, acerca del flujo de fluidos que en ésta acontece.

Parámetros como las velocidades de inundación y lloriqueo, el arrastre fraccional de líquido y su correcto flujo, así como las pérdidas de carga entre platos, pueden estimarse a través de distintas ecuaciones y gráficas que vinculan distintas propiedades físicas.

El objeto de este anexo radica en proveer de tales propiedades al proceso de dimensionamiento de la columna, así como del propio diseño hidráulico de la torre denominada “EXTRACTIVA 2”.

El diseño hidráulico de las columnas de platos viene necesariamente precedido de la obtención de propiedades físicas de las corrientes circulantes. A la sazón, se hace preciso definir los caudales y composiciones de las mismas, como información preliminar a la hora de generar las antedichas propiedades.

La alimentación de “EXTRACTIVA 2” consistirá en la siguiente corriente:

<b>Componente</b>	<b><math>x_{Fi}</math></b>	<b>(Mmol/año)<sub>i</sub></b>
<b>1-Buteno (1)</b>	0,092	1064,263
<b>Butadieno (2)</b>	0,501	5765,401
<b>Cis-2-buteno (3)</b>	0,108	1237,238
<b>Furfural (4)</b>	0,299	3440,773
<b>W (Mmol/año)</b>	<b>11507,675</b>	

Tabla. A3.LXXXVII. Corriente W, alimentación de “EXTRACTIVA 2”

Los componentes de la alimentación se han reordenado por volatilidad creciente. Una vez se establecen como clave ligero el componente butadieno, (de interés), y como pesado el cis-2-buteno; fi-

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

jando los porcentajes de cada uno de ellos en las corrientes de destilado y residuo, estas últimas quedan definidas según:

Componente	$x_{Di}$	(Mmol/año) <sub>i</sub>	Componente	$x_{Wi}$	(Mmol/año) <sub>i</sub>
1-Buteno (1)	0,167	1064,263	Butadieno (2)	0,112	576,540
Butadieno (2)	0,814	5188,861	Cis-2-buteno (3)	0,217	1113,514
Cis-2-buteno (3)	0,019	123,724	Furfural (4)	0,671	3440,773
E (Mmol/año)	<b>6376,847</b>		X (Mmol/año)	<b>5130,827</b>	

Tabla. A3.LXXXVIII. Composiciones de las corrientes E y X, destilado y residuo de “EXTRACTIVA 2”

Donde se ha decidido que un 90% del clave ligero se recoja en el destilado así como un 10% del clave pesado. El componente no clave ligero se recoge enteramente en el destilado y, de la misma forma, el no clave pesado se obtiene junto al residuo. Conocidas la corriente de alimentación y de destilado y residuo, pueden balancearse el resto de las corrientes de columna, partiendo del balance al condensador total y los datos obtenidos a partir de la resolución por el método FUG, (véase anexo correspondiente):

$$(A3.63) \begin{cases} V = L + E & (1) \\ R_D = L/E \cong 6,12 & (2) \end{cases}$$

Se tienen V y L, donde V es el vapor saliente de columna que se dirige al condensador, L es el líquido condensado totalmente y retornado a columna y E es el destilado, la fracción de líquido que se retira de la unidad y se alimenta íntegramente en la operación subsiguiente, “MÚLTIPLE”. Por su parte,  $R_D$  es 1,1 veces la relación de reflujo externa mínima estimada por aplicación de la ecuación de Underwood.

Operando con los datos de la Tabla A3.LXXXVIII y aplicando la ecuación (A3.63), se obtiene:

$$\begin{cases} L = R_D \cdot E = 6,12 \cdot 6376,847 \cong 39026,304 \text{ Mmol/año} \\ V = L + E = 39026,304 + 6376,847 \cong 45403,151 \text{ Mmol/año} \end{cases}$$

Considerando a continuación el balance al plato de alimentación:

$$(A3.64) \begin{cases} L' = L + \phi W & (1) \\ V = V' + (1 - \phi)W & (2) \end{cases}$$

Donde  $\phi$  es la condición de alimentación, a la sazón la unidad por tratarse ésta de un líquido a su temperatura de ebullición; se tiene:

$$\begin{cases} L' = L + W = 39026,304 + 11507,675 \cong 50533,979 \text{ Mmol/año} \\ V = V' \cong 45403,151 \text{ Mmol/año} \end{cases}$$

Las corrientes  $L'$  y  $V'$ , responden al flujo de líquido y vapor en la sección de agotamiento. Multiplicando las corrientes por el factor de conversión:  $\frac{1000 \text{ kmol}}{1 \text{ Mmol}} \cdot \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ días}} \cdot \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}}$ , se obtienen los siguientes resultados en unidades más convenientes:

Balance de materia					
<b>W (kmol/h)</b>	<b>1313,661</b>	<b>E (kmol/h)</b>	<b>727,951</b>	<b>X (kmol/h)</b>	<b>585,711</b>
	<b>L (kmol/h)</b>	<b>4457,755</b>	<b>V (kmol/h)</b>	<b>5185,705</b>	
	<b>L' (kmol/h)</b>	<b>5771,416</b>	<b>V' (kmol/h)</b>	<b>5185,705</b>	

Tabla. A3.LXXXIX. Caudales de las corrientes de “EXTRACTIVA 2”

Con las corrientes y sus composiciones definidas, puede procederse a la determinación de las propiedades requeridas para el procedimiento de diseño hidráulico de la columna. Tales propiedades son las que siguen: Densidad de fase líquida,  $\rho_L$ , y densidad de fase vapor,  $\rho_V$ , viscosidad de fase líquida y fase vapor,  $\mu_L$  y  $\mu_V$  respectivamente, tensión superficial del líquido,  $\sigma$ , y difusividad del componente clave ligero en fase líquida.

Dado que el diseño hidráulico de las zonas de rectificación y agotamiento de la columna dependerá de las características del flujo, se determinarán las propiedades del destilado, el residuo y el fluido que alimenta a la columna, siendo éstas las regiones críticas de la misma. De esta forma, las composiciones de líquido y vapor en las

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

mencionadas regiones, así como las temperaturas correspondientes se consignan en las siguientes tablas:

	Composición fase líquida				
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$T_L$ (K)
<b>Destilado</b>	0,167	0,814	0,019	0,000	287,313
<b>Plato alimentación</b>	0,092	0,501	0,108	0,299	290,464
<b>Residuo</b>	0,000	0,112	0,217	0,671	304,733

Tabla. A3.XC. Composición y temperatura del líquido para las distintas corrientes

	Composición fase vapor				
	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$T_V$ (K)
<b>Destilado</b>	0,167	0,814	0,019	0,000	287,415
<b>Plato alimentación</b>	0,156	0,712	0,131	0,000	290,464
<b>Residuo</b>	0,000	0,347	0,652	0,001	304,733

Tabla. A3.XCI. Composición y temperatura del vapor para las distintas corrientes

Donde las corrientes de alimentación y residuo se encuentran en equilibrio, (de ahí las temperaturas coincidentes del líquido y el vapor), mientras que el destilado presenta una composición equivalente al vapor saliente de columna, al ser este condensado totalmente y retornado parcialmente a columna. Es por ello que la fase líquida y vapor del destilado no se encuentran en equilibrio y, como consecuencia, las temperaturas de ambas fases no son coincidentes, (se incidirá sobre este punto en el anexo de diseño de cambiadores de calor asociados a las columnas).

### A3.C2.2. Determinación de propiedades físicas

#### A3.C2.2.1. Densidad de la fase líquida

El cálculo de la densidad de la fase líquida se practica haciendo uso de la ecuación de *Rackett*<sup>\*</sup> para la estimación de volumen de líquido saturado, según la expresión (A3.3), que requiere volúmenes críticos,  $V_{ci}$ , y factores de compresibilidad críticos,  $Z_{ci}$ , de las sustan-

\* H. G. Rackett. J. Chem. Eng. Data, vol. 15, pgs. 514-517, 1970.

cias puras involucradas en la operación. También se requerirán las temperaturas críticas de las mismas, a fin de hallar la temperatura reducida según (A3.3.2). Las propiedades críticas requeridas se recogen en la tabla que sigue:

Propiedades críticas					
$T_{c1}$ (K)	419,6	$V_{c1}$ (L/mol)	0,240	$Z_{c1}$	0,277
$T_{c2}$ (K)	425,0	$V_{c2}$ (L/mol)	0,221	$Z_{c2}$	0,270
$T_{c3}$ (K)	435,6	$V_{c3}$ (L/mol)	0,234	$Z_{c3}$	0,272
$T_{c4}$ (K)	670,2	$V_{c4}$ (L/mol)	0,252	$Z_{c4}$	0,256

Tabla. A3.XCII. Propiedades críticas requeridas por la ecuación (A3.3)

Con los datos de las tablas A3.XCII y A3.XC y aplicando (A3.3), se tiene:

	$T_{r1}$	$T_{r2}$	$T_{r3}$	$T_{r4}$	$V_1^{Lsat}$	$V_2^{Lsat}$	$V_3^{Lsat}$	$V_4^{Lsat}$
<b>Destilado</b>	0,685	0,676	0,660	0,429	0,095	0,086	0,090	0,079
<b>Plato alimentación</b>	0,692	0,683	0,667	0,433	0,096	0,086	0,090	0,079
<b>Residuo</b>	0,726	0,717	0,700	0,455	0,099	0,089	0,093	0,080

Tabla. A3.XCIII. Aplicación de (A3.3)

Donde los volúmenes de líquido saturados, según la ecuación de Rackett, presentan las mismas unidades que los volúmenes críticos, L/mol. Considerando que el recíproco de los volúmenes saturados coincide con la densidad molar de las sustancias puras, y ponderando según las composiciones de las mismas como regla de mezclado, se obtiene la densidad molar de las tres corrientes, como queda indicado en la expresión (A3.4). Por aplicación de ésta, hasta el cuarto componente, sobre los volúmenes saturados de la Tabla A3.XCIII, las composiciones en A3.XC y convirtiendo a unidades más convenientes, se obtiene para cada corriente:

	$\rho_L$ (mol/cm <sup>3</sup> )
<b>Destilado</b>	0,011
<b>Plato alimentación</b>	0,012
<b>Residuo</b>	0,012

Tabla. A3.XCIV. Estimación de las densidades molares de fase líquida

### A3.C2.2.2. Viscosidad de la fase líquida

El cálculo de viscosidades para la fase líquida involucra distintos procedimientos: dos métodos para las viscosidades de compuestos puros y un método, o regla de mezclado, para la obtención de la viscosidad de la fase líquida multicomponente. Las viscosidades puras de los compuestos olefínicos, esto es, del 1 al 3, se dilucidan mediante el procedimiento *API 11A2.1* contenido en el libro técnico citado en la bibliografía consultada\*. Este procedimiento, similar a la ecuación de *Antoine* para el cálculo de presiones de vapor, viene dado por la ecuación (A3.5).

El procedimiento precisa el valor de los coeficientes A, B, C, D y E de las sustancias puras, que figuran tabulados en el libro técnico citado, en las páginas que suceden a la expresión anterior. Para las sustancias en juego tales coeficientes son los que se consignan a continuación:

<b>Coeficientes para el procedimiento API 11A2.1</b>					
<b>A<sub>1</sub></b>	-1,9161·10 <sup>0</sup>	<b>A<sub>2</sub></b>	2,0489·10 <sup>1</sup>	<b>A<sub>3</sub></b>	-1,0343·10 <sup>1</sup>
<b>B<sub>1</sub></b>	6,0498·10 <sup>2</sup>	<b>B<sub>2</sub></b>	-5,5836·10 <sup>2</sup>	<b>B<sub>3</sub></b>	9,4014·10 <sup>2</sup>
<b>C<sub>1</sub></b>	-1,2860·10 <sup>0</sup>	<b>C<sub>2</sub></b>	-4,5060·10 <sup>0</sup>	<b>C<sub>3</sub></b>	-1,1850·10 <sup>-2</sup>
<b>D<sub>1</sub></b>	0,0000·10 <sup>0</sup>	<b>D<sub>2</sub></b>	0,0000·10 <sup>0</sup>	<b>D<sub>3</sub></b>	0,0000·10 <sup>0</sup>
<b>E<sub>1</sub></b>	0,0000·10 <sup>0</sup>	<b>E<sub>2</sub></b>	0,0000·10 <sup>0</sup>	<b>E<sub>3</sub></b>	0,0000·10 <sup>0</sup>

Tabla. A3.XCV. Coeficientes para estimación de viscosidad de sustancias puras

Haciendo uso de la Tabla A3.XCV y de la citada ecuación (A3.5), se obtiene para las distintas corrientes:

	<b>T<sub>L</sub> (R)</b>	<b>μ<sub>1</sub> (cP)</b>	<b>μ<sub>2</sub> (cP)</b>	<b>μ<sub>3</sub> (cP)</b>
<b>Destilado</b>	517,164	<b>0,154</b>	<b>0,159</b>	<b>0,184</b>
<b>Plato alimentación</b>	522,836	<b>0,149</b>	<b>0,153</b>	<b>0,181</b>
<b>Residuo</b>	548,520	<b>0,133</b>	<b>0,130</b>	<b>0,166</b>

Tabla. A3.XCVI. Estimación de viscosidad de los compuestos olefínicos

\* Se refiere a *Technical Data Book-Petroleum Refining*, American Petroleum Institute (API), 6ª Edición, abril 1997.

Donde se han convertido las temperaturas correspondientes a cada corriente, dadas en la Tabla A3.XC a Rankine, la unidad de temperatura solicitada por la ecuación (A3.5).

Para el cálculo de la viscosidad del furfural, dada la ausencia de datos en el procedimiento anterior, se ha seleccionado otro método, en esta ocasión del libro de *Reid, Prausnitz y Poling*, (véase reseña bibliográfica\*). Los autores, *Van Velzen et ál.*, *Yaws et ál.* y *Duhne*, publicaron constantes y correlaciones útiles para la determinación de viscosidades de diversas especies orgánicas, entre las que se encuentra el furfural. De las distintas ecuaciones propuestas, la válida para el anterior compuesto es la que en el libro antedicho figura como número 1 y que se presentó previamente como ecuación (A3.6).

Tomando T de la Tabla A3.XC, las constantes A y B que se tabulan a continuación y haciendo uso de (A3.6) se tiene:

Coeficientes para (A3.6)			$\mu_4$ (cP)
		Destilado	1,838
A <sub>4</sub>	$3,628 \cdot 10^{14}$	Plato alimentación	1,725
B <sub>4</sub>	$-5,815 \cdot 10^0$	Residuo	1,305

Tabla. A3.XCVII. Estimación de la viscosidad del furfural

Una vez determinadas las viscosidades de los compuestos puros, la de la mezcla se estima por la aplicación de la regla tomada del libro técnico de *API* mostrada en (A3.7).

Haciendo uso de nuevo de las composiciones de la Tabla A3.XC, así como de las viscosidades de las tablas A3.XCVI a A3.XCVII, y aplicando (A3.7) hasta el cuarto componente, se obtiene:

\* The properties of gases & liquids. R. C. Reid, J. M. Prausnitz, B. E. Poling. McGraw-Hill. 4ª Edición.

	$\mu_l$ (cP)
Destilado	0,159
Plato alimentación	0,400
Residuo	0,751

Tabla. A3.XCVIII. Estimación de las viscosidades de fase líquida

Como comentario a los métodos utilizados, debe mencionarse el hecho de que estos corresponden a estimaciones de la viscosidad a baja presión, como es el caso. Es por ello que las desviaciones esperadas del comportamiento experimental deben ser asumibles.

#### A3.C2.2.3. Densidad de la fase vapor

La estimación de las corrientes de vapor, se ha realizado a partir de la ecuación de *Pitzer*<sup>\*</sup>, presentada en (A3.8), conjunto de ecuaciones que requería de la definición de presión parcial según la ley de *Dalton*, ecuación (A3.9).

La presión de operación se especificó en el anexo de generación de datos termodinámicos:  $P = 2$  atm. De esta forma, puede estimarse el factor de compresibilidad,  $Z_i$ , para sustancias puras. Atendiendo a las ecuaciones (A3.10), puede obtenerse tanto el volumen de compuesto puro en cada corriente, como la densidad, de modo similar al empleado para la fase líquida.

El cálculo final de la densidad de vapor se efectúa a través de la regla de mezclado dada por (A3.11), a la sazón truncada en el cuarto componente.

Haciendo uso de la Tabla A3.XCI, la Tabla A3.XCII y la ecuación (A3.8.5), se determinan las siguientes temperaturas reducidas:

<sup>\*</sup> Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química. *J. M. Smith, H. C. Van Ness, M. M. Abbott*. McGraw-Hill. 6<sup>a</sup> Edición, pgs. 108-112.

	$T_{r1}$	$T_{r2}$	$T_{r3}$	$T_{r4}$
<b>Destilado</b>	0,685	0,676	0,660	0,429
<b>Plato alimentación</b>	0,692	0,683	0,667	0,433
<b>Residuo</b>	0,726	0,717	0,700	0,455

Tabla. A3.XCIX. Temperaturas reducidas de fase vapor

Se sigue el procedimiento empleando la Tabla A3.XCI y aplicando la ecuación (A3.9):

	$P_1$ (atm)	$P_2$ (atm)	$P_3$ (atm)	$P_4$ (atm)
<b>Destilado</b>	0,334	1,627	0,039	0,000
<b>Plato alimentación</b>	0,312	1,425	0,263	0,001
<b>Residuo</b>	0,000	0,694	1,303	0,003

Tabla. A3.C. Presiones parciales de fase vapor

El siguiente paso de cálculo requiere como dato las presiones de vapor críticas. En la siguiente tabla se proporcionarán también los factores acéntricos críticos:

<b>Propiedades críticas</b>			
$P_{c1}$ (atm)	39,7	$\omega_1$	0,187
$P_{c2}$ (atm)	42,7	$\omega_2$	0,195
$P_{c3}$ (atm)	41,5	$\omega_3$	0,202
$P_{c4}$ (atm)	55,9	$\omega_4$	0,368

Tabla. A3.CI. Propiedades críticas requeridas por la ecuación (A3.8)

Por medio de las dos tablas anteriores y por aplicación de (A3.8.4), se obtienen las presiones reducidas:

	$P_{r1}$	$P_{r2}$	$P_{r3}$	$P_{r4}$
<b>Destilado</b>	0,008	0,038	0,001	0,000
<b>Plato alimentación</b>	0,008	0,033	0,006	0,000
<b>Residuo</b>	0,000	0,016	0,023	0,000

Tabla. A3.CII. Presiones reducidas de fase vapor

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

La aplicación de la ecuación (A3.8) generará los factores de compresibilidad de cada componente en su correspondiente vapor, haciendo uso de los datos de las tablas A3.XCX y A3.CI a A3.CII:

	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$
<b>Destilado</b>	0,990	0,952	0,999	1,000
<b>Plato alimentación</b>	0,991	0,960	0,992	1,000
<b>Residuo</b>	1,000	0,983	0,974	1,000

Tabla. A3.CIII. Factores de compresibilidad de fase vapor

La tabla anterior, por aplicación de la ecuación (A3.10.1), proporciona volúmenes de cada especie en fase vapor. La presión parcial se toma de la Tabla A3.C y la temperatura de la Tabla A3.XCI:

	$V_1$ (L/mol)	$V_2$ (L/mol)	$V_3$ (L/mol)	$V_4$ (L/mol)
<b>Destilado</b>	69,944	13,801	607,010	0,000
<b>Plato alimentación</b>	75,669	16,056	90,037	32977,666
<b>Residuo</b>	0,000	35,435	18,686	8617,124

Tabla. A3.CIV. Volúmenes por componente en fase vapor

Donde se ha tomado  $R = 0,082057 \text{ atm}\cdot\text{L/mol}\cdot\text{K}$ . Los volúmenes correspondientes a especies sin composición en las distintas corrientes, (v. gr. en el destilado no debe existir disolvente como se explicó en el anexo previo y en las primeras líneas de éste); se han supuesto nulos, (si carece de composición, no ha de tener volumen). Como puede observarse, debido a la mínima composición de disolvente en la fase vapor, su presión parcial es también un valor muy bajo, por lo que al sustituir en (A3.10.1), el volumen resulta un valor muy elevado.

A efectos prácticos, debido a la escasa composición referida, se puede suponer que el disolvente apenas pasa a fase vapor en toda la columna y, por tanto, su volumen es despreciable. En todo caso, aunque se considerasen los volúmenes de furfural dados en la Tabla A3.CIV, la contribución de los mismos a la densidad de la fase vapor es despreciable, puesto que, según (A3.10.2), suman los recí-

procos de los volúmenes ponderados a las composiciones: si éstas ya son bajas, al multiplicar por el recíproco de un número elevado, el valor resulta nimio.

Haciendo uso combinado de las ecuaciones (A3.10.2) y (A3.11), leyendo volúmenes molares de la tabla anterior, las composiciones de vapor de la Tabla A3.XCI y cambiando a unidades más convenientes:

	$\rho_V \cdot 10^5 \text{ (mol/cm}^3\text{)}$
Destilado	6,138
Plato alimentación	4,789
Residuo	4,466

Tabla. A3.CV. Estimación de las densidades molares de fase vapor

#### A3.C2.2.4. Viscosidad de la fase vapor

La viscosidad de la fase vapor, como para el caso de la fase líquida, requiere el concurso de dos métodos de estimación: uno para la determinación de viscosidad de los compuestos puros, y otro que proponga una regla de mezclado válida para encontrar la viscosidad de la fase.

Los componentes en juego podrían sugerir la utilización de una ecuación sencilla para la estimación de la viscosidad, toda vez que la mezcla de compuestos olefínicos, *per se*, es apolar. Ahora bien, la presencia del furfural, compuesto altamente polar, complica los cálculos al requerir métodos más rigurosos de cálculo.

Por este motivo, se ha seleccionado, del libro de *Reid*, la ecuación de *Lucas*, adecuada para el cálculo de viscosidades de sustancias puras polares y a baja presión. Como regla de mezclado se empleará el método de *Wilke*, regla de rigurosidad intermedia, y suficiente en este caso, para obtener la viscosidad de la mezcla. Las expresiones de *Lucas* se mostraron en la expresión (A3.12).

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Donde el factor  $F_P^0$  se presentó como coeficiente de corrección para polaridad, en función del momento dipolar reducido,  $\mu_r$ ; calculado a partir de la ecuación (A3.12.4) para cada componente en función de su momento dipolar,  $\mu$ . El factor  $F_Q^0$  prestaba corrección a desviaciones cuánticas para el caso de gases como el hidrógeno, helio o deuterio. A la sazón se consideró igual a la unidad, puesto que no era requerida, en el capítulo anterior ni en sucesivos, corrección por efecto cuántico. Finalmente,  $\xi$  se definió como viscosidad reducida inversa y se calculó por la ecuación (A3.12.2), introduciendo las variables en las unidades especificadas.

Se listan a renglón seguido las propiedades necesarias para el cálculo de (A3.12):

Propiedades de compuestos puros			
$\mu_1$ (debyes)	0,3	$PM_1$ (g/mol)	56,108
$\mu_2$ (debyes)	0,0	$PM_2$ (g/mol)	54,092
$\mu_3$ (debyes)	0,3	$PM_3$ (g/mol)	56,108
$\mu_4$ (debyes)	3,6	$PM_4$ (g/mol)	96,1

Tabla. A3.CVI. Propiedades requeridas por la ecuación (A3.12)

Con las que pueden calcularse tanto el momento dipolar reducido, como la viscosidad reducida inversa, haciendo uso de las ecuaciones (A3.12.4) y (A3.12.2) respectivamente; así como de las tablas A3.XCII, A3.CI, (cambiando unidades) y A3.CVI:

$\mu_{r1}$	0,0011	$\xi_1$ ( $\mu P^{-1}$ )	$5,48 \cdot 10^{-3}$
$\mu_{r2}$	0,0000	$\xi_2$ ( $\mu P^{-1}$ )	$5,32 \cdot 10^{-3}$
$\mu_{r3}$	0,0010	$\xi_3$ ( $\mu P^{-1}$ )	$5,35 \cdot 10^{-3}$
$\mu_{r4}$	0,0857	$\xi_4$ ( $\mu P^{-1}$ )	$3,60 \cdot 10^{-3}$

Tabla. A3.CVII. Aplicación de (A3.12.4) y (A3.12.2)

A la luz de los momentos dipolares reducidos aportados por la Tabla. A3.CVII, y según las expresiones (A3.12.3), se aplicará, la primera expresión a los tres primeros componentes, (esto es, no recibirán corrección por polaridad) y la tercera al furfural. Con estas ex-

presiones y los datos de las tablas A3.XCII y A3.XCIX, se tienen los siguientes factores de corrección para cada una de las corrientes:

$F_{P1}^0$	1,0000	$F_{P1}^0$	1,0000	$F_{P1}^0$	1,0000
$F_{P2}^0$	1,0000	$F_{P2}^0$	1,0000	$F_{P2}^0$	1,0000
$F_{P3}^0$	1,0000	$F_{P3}^0$	1,0000	$F_{P3}^0$	1,0000
$F_{P4}^0$	1,0938	$F_{P4}^0$	1,0938	$F_{P4}^0$	1,0940
<b>Destilado</b>		<b>Alimentación</b>		<b>Residuo</b>	

Tabla. A3.CVIII. Factores de corrección para el método de *Lucas*

Finalmente, con los datos de las tablas A3.CVII a A3.CVIII y nuevamente, A3.XCIX, se estiman las viscosidades de los compuestos puros en cada corriente aplicando (A3.12.1):

	$\mu_1$ ( $\mu\text{P}$ )	$\mu_2$ ( $\mu\text{P}$ )	$\mu_3$ ( $\mu\text{P}$ )	$\mu_4$ ( $\mu\text{P}$ )
<b>Destilado</b>	75,849	77,018	74,776	79,364
<b>Plato alimentación</b>	76,656	77,839	75,573	80,168
<b>Residuo</b>	80,430	81,673	79,299	83,958

Tabla. A3.CIX. Estimación de viscosidad de los compuestos puros

La viscosidad de la mezcla se estima por aplicación del método de *Wilke*, tal como figura *ut supra* y se mostró en (A1.13). Su desarrollo para un sistema de cuatro componentes produce:

$$\mu_V = \frac{y_1\mu_1}{y_1 + y_2\phi_{12} + y_3\phi_{13} + y_4\phi_{14}} + \frac{y_2\mu_2}{y_2 + y_1\phi_{21} + y_3\phi_{23} + y_4\phi_{24}} + \frac{y_3\mu_3}{y_3 + y_1\phi_{31} + y_2\phi_{32} + y_4\phi_{34}} + \frac{y_4\mu_4}{y_4 + y_1\phi_{41} + y_2\phi_{42} + y_3\phi_{43}}$$

Se han eliminado directamente los  $\phi_{ii}$ , tal como indica (A3.13.2.3).

El cálculo de los coeficientes  $\phi_{ij}$  mediante la ecuación (A3.13.2.1) y los datos de las tablas A3.CVI y A3.CIX, se tabula a continuación:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

	$\phi_{12}$	$\phi_{13}$	$\phi_{14}$	$\phi_{23}$	$\phi_{24}$	$\phi_{34}$
<b>Destilado</b>	0,974	1,007	1,261	1,034	1,292	1,251
<b>Plato alimentación</b>	0,974	1,007	1,261	1,034	1,292	1,251
<b>Residuo</b>	0,974	1,007	1,262	1,034	1,293	1,253

Tabla. A3.CX. Determinación de los  $\phi_{ij}$

El cálculo de los coeficientes  $\phi_{ji}$  mediante la ecuación (A3.13.2.2) y los datos de las tablas A3.CVI, A3.CIX y A3.CX, se tabula a continuación:

	$\phi_{21}$	$\phi_{31}$	$\phi_{32}$	$\phi_{41}$	$\phi_{42}$	$\phi_{43}$
<b>Destilado</b>	1,026	0,993	0,968	0,770	0,749	0,775
<b>Plato alimentación</b>	1,026	0,993	0,968	0,770	0,749	0,775
<b>Residuo</b>	1,026	0,993	0,968	0,769	0,749	0,775

Tabla. A3.CXI. Determinación de los  $\phi_{ji}$

Finalmente, el cálculo de las viscosidades de la fase vapor, haciendo uso de las tablas A3.XCI, A3.CIX y A3.CX a A3.CXI, por aplicación del desarrollo de la ecuación (A3.13.1), (cambiando unidades); queda recogido en la tabla siguiente:

	$\mu_v$ (cP)
<b>Destilado</b>	0,0077
<b>Plato alimentación</b>	0,0077
<b>Residuo</b>	0,0080

Tabla. A3.CXII. Estimación de las viscosidades de fase vapor

### A3.C2.2.5. Tensión superficial de corrientes

Se empleará la correlación, tomada del libro de Reid, de Maccleod-Sugden para la determinación de tensiones superficiales de mezclas no acuosas, la única correlación disponible para la estimación de mezclas donde uno de los componentes es polar. Se mostró en la expresión (A3.14), válida para este caso cuando el sumatorio se trunca en el cuarto componente.

El único término no tabulado con anterioridad es  $[P_i]$ , el “parachor” de cada sustancia. Se trata de un término de unidades  $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{1/4} / \text{s}^{1/2}$ , relativo a la tensión superficial e inmanente a cada especie. Su puede determinar mediante un método de contribución de grupos denominado de *Sugden*.

En la siguiente tabla se listan los grupos contribuyentes de cada especie, su número y el parachor final calculado como suma de las contribuciones individuales:

Componente	Grupos	Contribución	Número	$[P_i]$
1	CH <sub>3</sub>	55,5	1	179,1
	CH <sub>2</sub> en -(CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> (n < 12)	40,0	1	
	Enlace etilénico terminal	19,1	1	
	C	9,0	2	
	H	15,5	3	
2	Enlace etilénico terminal	19,1	2	167,2
	C	9,0	4	
	H	15,5	6	
3	CH <sub>3</sub>	55,5	2	177,7
	Enlaces etilénicos 2,3	17,7	1	
	C	9,0	2	
	H	15,5	2	
4	Enlaces etilénicos 2,3	17,7	2	203,9
	>O	20,0	1	
	CHO	66	1	
	C	9,0	4	
	H	15,5	3	

Tabla. A3.CXIII. Determinación de parachors por contribución de grupos

Con lo anterior, se está en condiciones de estimar la tensión superficial de cada corriente, haciendo uso de los datos ya tabulados en A3.XC a A3.XCI, A3.XCIV, A3.CV y A3.CXIII; por aplicación de la ecuación (A3.14):

	$\sigma$ (dyn/cm)
Destilado	13,975
Plato alimentación	19,886
Residuo	28,761

Tabla. A3.CXIV. Estimación de las tensiones superficiales

### A3.C2.2.6. Difusividad del clave ligero en fase líquida

El episodio de determinación de propiedades concluye con la estimación de la difusividad del clave ligero en fase líquida. Tal como se menciona en la primera sección de este capítulo, el clave ligero, a la sazón, es el componente butadieno. La estimación empleará la ecuación del método de *Wilke-Chang* modificada por *Perkins y Geankoplis*, tomada del libro de *Reid*, para difusión de un componente en una mezcla líquida:

$$(A3.65) \left\{ \begin{array}{l} \mathfrak{D}_{2,m} (\text{cm}^2/\text{s}) = 7,4 \cdot 10^{-8} \frac{T_L \sqrt{\varphi PM}}{\mu_L V_{b2}^{0,6}} \quad (1) \\ \varphi PM = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 2}}^n x_j \varphi_j PM_j = x_1 \varphi_1 PM_1 + x_3 \varphi_3 PM_3 + x_4 \varphi_4 PM_4 \quad (2) \\ \text{con } T_L \text{ en K, } PM \text{ en g/mol, } \mu_L \text{ en cP y } V_{b2} \text{ en cm}^3/\text{mol} \end{array} \right.$$

Donde  $\mathfrak{D}_{2,m}$ , es la difusividad del clave ligero, (butadieno), en la mezcla líquida. La ecuación requiere valores de  $\varphi$  y de  $V_{b2}$ . El resto de magnitudes y propiedades han sido estimadas en apartados anteriores. En el sumatorio (A3.65.2), no se considera la contribución del clave ligero.

Por una parte,  $\varphi$ , corresponde al factor de asociación de los distintos componentes. Se recomienda una serie de valores para distintos solventes entre los que no se encuentran los componentes involucrados. Para este caso, el método prevé emplear el valor de la unidad, por lo que  $\varphi_j = 1$ .

Por otra parte,  $V_{b2}$ , es el volumen molar del clave ligero a su temperatura de ebullición. Para estimar esta propiedad será necesario recurrir a la expresión de *Tyn y Calus*, en función del volumen crítico, tomada del libro de *Reid* y notada como ecuación (A3.16).

Presentadas las ecuaciones, puede procederse al desarrollo del cálculo. Haciendo uso de los datos consignados en la Tabla A3.XCII, aplicando (A3.16) y cambiando unidades se determina:

$V_{b2}$ (cm <sup>3</sup> /mol)	58,583
---------------------------------	--------

Tabla. A3.CXV. Volumen molar del clave ligero a su temperatura de ebullición

Empleando los datos tabulados en A3.XC, A3.CVI, A3.XCVIII y A3.CXV y aplicando (A3.65.2) y (A3.65.1) sucesivamente, se estiman las difusividades requeridas para cada corriente:

	$\varphi_{PM}$	$D_{2m}$ (cm <sup>2</sup> /s)
<b>Destilado</b>	10,453	<b>3,768·10<sup>-5</sup></b>
<b>Plato alimentación</b>	39,951	<b>2,956·10<sup>-5</sup></b>
<b>Residuo</b>	76,612	<b>2,285·10<sup>-5</sup></b>

Tabla. A3.CXVI. Difusividades del clave ligero en fase líquida

### **A3.C2.3. Diseño hidráulico**

El diseño hidráulico de columna tiene por objeto el dimensionamiento de la misma, esto es, la obtención del diámetro de platos, sus áreas características, disposición de sus elementos, (válvulas, campanas o perforaciones), pérdidas de carga, eficacia, tipo y pasos y un largo etcétera que se desgranará en la presente sección.

El primer aspecto que debe decidirse es el tipo de plato que se empleará. Por simplicidad de diseño, disponibilidad de ecuaciones suficientes en la bibliografía y coste económico más asequible, los platos de utilidad en este diseño serán: **Platos perforados**.

Son estos los platos de uso más extendido en el diseño de columnas de destilación y, sólo en el caso de que los requerimientos

hidráulicos de los fluidos en juego superasen las prestaciones de los platos perforados, se plantearía la posibilidad de diseñar otro tipo de etapa de separación.

Dilucidado este primer aspecto se efectuará el siguiente procedimiento de cálculo:

- Recopilación y conversión de datos y propiedades.
- Determinación gráfica del número de pasos por columna.
- Estimación de dimensiones previas.
- Fijación de los límites de operación.
- Cálculo reiterado de áreas de columna y otras dimensiones.
- Verificaciones de las magnitudes calculadas con los límites de operación.
- Estimación de las pérdidas de carga.

Se estudiará la hidráulica de la columna en tres zonas diferenciadas y para las que previamente se han estimado sus propiedades físicas:

- Plato primero o de destilado.
- Plato de alimentación.
- Plato último o de residuo.

A lo que cabe establecer el siguiente matiz. Dado que el método FUG no proporciona un perfil de composiciones a lo largo de la columna, no se tendrá en cuenta el hecho de que el último plato de columna corresponde al rehervidor o calderín, y se efectuarán los cálculos para diseño hidráulico considerando esta última etapa de equilibrio dentro de la columna. (Véase justificación en el capítulo primero).

El plato de alimentación es un punto crítico de la columna, y por ello se estudia su funcionamiento hidráulico, ya que supone la inserción de una corriente líquida a la operación, (la alimentación), lo que modifica ostensiblemente las condiciones de funcionamiento de la

operación. Asimismo, se estudia el funcionamiento del plato de destilado, o primer plato de columna, que, pese a soportar *a priori* condiciones de funcionamiento más benignas que, por ejemplo, el primer plato de la sección de rectificación; es el plato que recibe el reflujo y, por ende está sometido a un choque de fluidos severo.

Dado que los platos seleccionados soportan las condiciones más exigentes, los datos arrojados por dichos puntos de operación, permitirán caracterizar las distintas zonas de columna, esto es, permitirán decidir si debe construirse la torre con distintos diámetros, además de, junto a la eficacia global; decidir si la altura final de la torre requiere segregar el tren de separación en varias columnas.

#### A3.C2.3.1. Recopilación y conversión de datos y propiedades

En este primer apartado, se consignarán en tablas los valores de las propiedades involucradas en los cálculos, que se realizarán en el siguiente y sucesivos apartados. Todos estos datos han sido dados en tablas correspondientes a la sección anterior, a excepción del peso molecular promedio, para el que es de aplicación la expresión (A3.17) hasta el cuarto componente; obteniéndose  $PM_L$  y  $PM_V$ , los pesos moleculares en g/mol, ponderados a sus respectivas composiciones, del líquido y el vapor.

Tomando datos de las tablas A3.XCIV, A3.CV, A3.LXXXIX a A3.XCI, A3.XCVIII, A3.CXII y A3.CXIV y aplicando (A3.17) sobre A3.CVI, se recopilan las siguientes tablas:

<b>Propiedades y composición del destilado</b>			
$\rho_L$ (mol/L)	11,476	$\rho_L$ (kg/m <sup>3</sup> )	625,056
$\rho_V$ (mol/L)	0,061	$\rho_V$ (kg/m <sup>3</sup> )	3,343
L (kmol/h)	4457,755	$\mu_L$ (cP)	0,159
V (kmol/h)	5185,705	$\mu_V$ (cP)	0,008
(L/V)	0,860	$\sigma$ (dyn/cm)	13,975

Tabla. A3.CXVII. Propiedades y composición del destilado. (Continúa en pág. sig.)

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

$x_1$	0,167	$y_1$	0,167
$x_2$	0,814	$y_2$	0,814
$x_3$	0,019	$y_3$	0,019
$x_4$	0,000	$y_4$	0,000
<b>PM (g/mol) (líquido)</b>		<b>PM (g/mol) (vapor)</b>	
54,468		54,468	

Tabla. A3.CXVII. Propiedades y composición del destilado. (Viene de pág. anterior)

<b>Propiedades y composición de la corriente del plato de alimentación</b>			
$\rho_L$ (mol/L)	11,751	$\rho_L$ (kg/m <sup>3</sup> )	787,904
$\rho_V$ (mol/L)	0,048	$\rho_V$ (kg/m <sup>3</sup> )	2,619
L (kmol/h)	5771,416	$\mu_L$ (cP)	0,400
V (kmol/h)	5185,705	$\mu_V$ (cP)	0,008
(L/V)	1,113	$\sigma$ (dyn/cm)	19,886
$x_1$	0,092	$y_1$	0,156
$x_2$	0,501	$y_2$	0,712
$x_3$	0,108	$y_3$	0,131
$x_4$	0,299	$y_4$	0,000
<b>PM (g/mol) (líquido)</b>		<b>PM (g/mol) (vapor)</b>	
67,051		54,686	

Tabla. A3.CXVIII. Propiedades y composición de la corriente del plato de alimentación

<b>Propiedades y composición de la corriente del último plato</b>			
$\rho_L$ (mol/L)	11,972	$\rho_L$ (kg/m <sup>3</sup> )	989,942
$\rho_V$ (mol/L)	0,045	$\rho_V$ (kg/m <sup>3</sup> )	2,477
L (kmol/h)	5771,416	$\mu_L$ (cP)	0,751
V (kmol/h)	5185,705	$\mu_V$ (cP)	0,008
(L/V)	1,113	$\sigma$ (dyn/cm)	28,761

$x_1$	0,000	$y_1$	0,000
$x_2$	0,112	$y_2$	0,347
$x_3$	0,217	$y_3$	0,652
$x_4$	0,671	$y_4$	0,001
<b>M (g/mol) (líquido)</b>		<b>M (g/mol) (vapor)</b>	
82,690		55,467	

Tabla. A3.CXIX. Propiedades y composición de la corriente del último plato

Las densidades en unidades SI se han obtenido multiplicando las molares por los pesos moleculares promedio.

### A3.C2.3.2. Determinación gráfica del número de pasos por columna

La decisión del número de pasos se toma a partir de la gráfica\* mostrada en la Figura A3.1, que liga el flujo del líquido en galones estadounidenses por minuto (gpm) con el diámetro en pies de la columna. En las siguientes tablas se listan las variables convertidas a las unidades requeridas:

Determinación de pasos: Plato de destilado			
$Q_L$ (m <sup>3</sup> /s)	0,108	$Q_L$ (gal (US)/min)	1710,294
T (m)	10,5	T (ft)	34,449
N° de pasos (p)		3	

Tabla. A3.CXX. Determinación de los pasos en la zona de rectificación

Determinación de pasos: Plato de alimentación			
$Q_L$ (m <sup>3</sup> /s)	0,136	$Q_L$ (gal (US)/min)	2162,470
T (m)	10	T (ft)	32,808
N° de pasos (p)		3	

Tabla. A3.CXXI. Determinación de los pasos por el plato de alimentación

Determinación de pasos: Plato de residuo			
$Q_L$ (m <sup>3</sup> /s)	0,134	$Q_L$ (gal (US)/min)	2122,575
T (m)	9,5	T (ft)	31,168
N° de pasos (p)		3	

Tabla. A3.CXXII. Determinación de los pasos por el plato de residuo

Donde el caudal de líquido,  $Q_L$ , se ha transformado de términos molares, como venía dado en las tablas A3.CXVII a A3.CXIX, a términos volumétricos teniendo en cuenta (A3.18.1). El diámetro de columna se ha tomado de la reiteración del cálculo de áreas, que se mostrará en apartados ulteriores.

Finalmente, el número de pasos se ha decidido según la gráfica de la Figura A3.1, aplicando los datos de las tres tablas precedentes.

\* Operaciones de separación por etapas de equilibrio en Ingeniería Química. E. J. Henley, H. D. Seader. Reverté, año 2000.

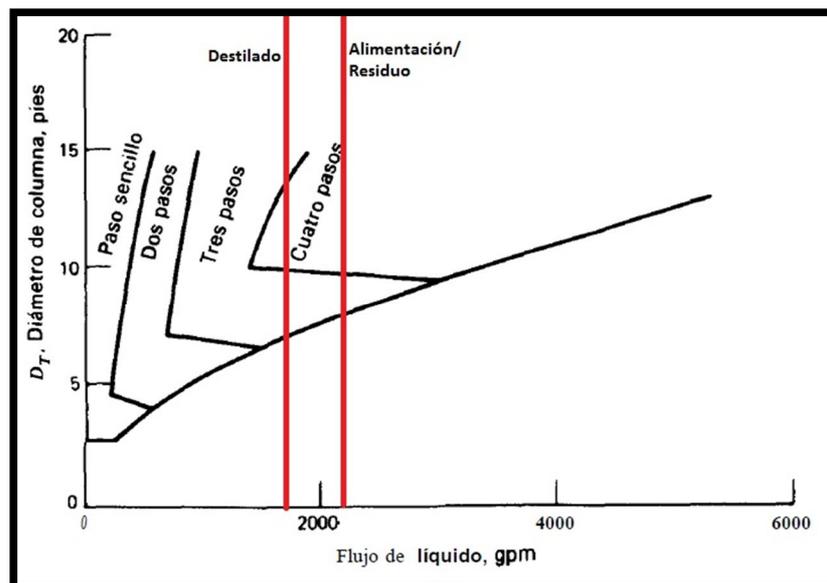


Figura. A3.15. Estimación del número de pasos según recomendaciones de la Koch Engineering Company. (E. J. Henley, J. D. Seader, 1999)

Se observa que la estimación queda fuera de escala a causa del elevado diámetro requerido. No obstante, dado que la Figura A3.15 permite efectuar una aproximación al número de pasos, se han tomado estos por extrapolación, ya que la comprobación rigurosa del funcionamiento de columna se verifica en próximos apartados.

### A3.C2.3.3. Estimación de dimensiones previas

Como se especificó al inicio de la presente sección, los platos seleccionados para el desempeño de la operación en cuestión, son platos perforados. Las dimensiones previas requeridas para el cálculo de las distintas áreas y pérdidas de carga son las que siguen:

- Diámetro de las perforaciones, ( $d_0$ ).
- Separación y distribución de las perforaciones: pitch, ( $p'$ ).
- Razón de espesor del plato a diámetro de orificio, ( $e/d_0$ ).
- Espaciado entre platos, ( $t$ ).
- Razón de área de perforaciones a área activa, ( $A_0/A_a$ ).

Según artículos de investigación consultados\*, está probado que para un diámetro de perforaciones menor se tiene una buena mezcla entre fases mejorándose de esta forma la separación. De esta forma y atendiendo a la Figura A3.2, considerando que el material seleccionado es acero al carbono, (por los motivos que se argumentarán en los capítulos de diseño mecánico), el menor diámetro para el que se dispone de razón  $e/d_0$  es de 9 mm, siendo éste, por consiguiente el diámetro seleccionado.

La relación  $e/d_0$  correspondiente es 0,50.

Con el diámetro de las perforaciones decidido, debe plantearse cuál es la distribución oportuna de las mismas. Según criterios de diseño de torres de platos consultadas en el libro de *Treybal*, tal distribución corresponde a aquella donde las perforaciones se colocan en los vértices de triángulos equiláteros, disposición ésta denominada al tresbolillo, que se logra perforando el área activa del plato en filas de orificios equidistantes, que estarán desfasadas, una a una, media distancia entre orificios, de modo que coincidan las filas alternas.

Usualmente, la distancia entre centros de orificios, también conocida como pitch, ( $p'$ ), debe estar comprendida entre 2,5 y 5 veces el diámetro de los mismos. Como valor intermedio, se tomará 4 veces el diámetro de orificio, como se indicó en (A3.19). Se tiene:

$$p' = 4 \cdot 9 = 36 \text{ mm}$$

El espaciado entre platos es uno de los parámetros económicos de mayor peso en la toma de decisiones vinculada al diseño de las columnas de platos. Un espaciado elevado aumenta la altura de la unidad de separación, si bien mejora las condiciones de flujo, lo que se traduce en una disminución del diámetro de la columna. A la sazón, atendiendo a la bibliografía, se dispone de la tabla dada por la Figura A3.3.

---

\* Simulación del comportamiento hidráulico en platos perforados para la destilación de mezclas binarias mediante CFD. M. A. Rodríguez-Ángeles, A. R. Uribe Ramírez. Revista Enlace Químico, n° 10, marzo 2008.

Para el diámetro mínimo, (correspondiente a la zona de agotamiento), tomado de la tabla A3.CXXII, el espaciado requerido es el máximo, de 0,90 m. Éste será por tanto el espaciado entre platos para toda la columna.

Por último, para una disposición al tresbolillo, la bibliografía, (libro de *Treybal*), recomienda para la razón área de orificios a área activa la expresión (A3.20), cuya aplicación, sobre y con los datos ya presentados en este apartado, se presentó en la Tabla A3.XXXVII, válida para el caso presente:

Dimensiones previas			
$d_0$ (mm)	9	$p'$ (mm)	36
$e/d_0$	0,5	$t$ (m)	0,9
	$A_0/A_a$	0,057	

Tabla A3.XXXVII. Dimensiones previas para las distintas zonas de columna

#### A3.C2.3.4. Fijación de los límites de operación

En este apartado se determinará el límite superior de la velocidad del vapor, ya que la velocidad mínima, también conocida como velocidad de lloriqueo, precisa de ciertos datos aún no dilucidados, lo que obliga a posponer su cálculo a posteriores apartados.

La velocidad de inundación, límite superior para el flujo del vapor, viene dada a partir de las expresiones\* (A3.21) a (A3.22).

Éstas requieren datos de tensión superficial, (en unidades SI, N/m), densidades de líquido y vapor y sus caudales, razón de área de perforaciones a área activa y espaciado de platos. Tales datos, se encuentran en las tablas A3.XXXVII y A3.CXVII a A3.CXIX. Aplicando (A3.22.2), (A3.22.3), (A3.22.4), (A3.22.1) y (A3.21) sucesivamente, se obtiene el límite superior de flujo:

\* Tomadas del libro "Operaciones de transferencia de masa". R. E. Treybal. McGraw-Hill. 2ª Edición.

Límite superior de operación: Zona de rectificación			
PF	0,063	$\alpha$ (m)	0,062
	<b>0,1</b>	$\beta$ (m)	0,033
$C_F$ (m/s)	0,036	$v_F$ (m/s)	<b>0,492</b>
% permisible $v_F$	78	$v$ (m/s)	<b>0,383</b>

Tabla. A3.CXXIII. Límite superior de operación para la zona de rectificación

Límite superior de operación: Plato de alimentación			
PF	0,071	$\alpha$ (m)	0,062
	<b>0,1</b>	$\beta$ (m)	0,033
$C_F$ (m/s)	0,043	$v_F$ (m/s)	<b>0,678</b>
% permisible $v_F$	78	$v$ (m/s)	<b>0,529</b>

Tabla. A3.CXXIV. Límite superior de operación para el plato de alimentación

Límite superior de operación: Zona de agotamiento			
PF	0,068	$\alpha$ (m)	0,062
	<b>0,1</b>	$\beta$ (m)	0,033
$C_F$ (m/s)	0,049	$v_F$ (m/s)	<b>0,804</b>
% permisible $v_F$	78	$v$ (m/s)	<b>0,627</b>

Tabla. A3.CXXV. Límite superior de operación para la zona de agotamiento

Debe señalarse que en este capítulo se está a las matizaciones que fueron referidas en el primero sobre aspectos tales como: valor final del parámetro de flujo, corrección de los coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$  y velocidad permitida del vapor según la expresión (A3.23).

### A3.C2.3.5. Cálculo reiterado de áreas de columna y otras dimensiones

La descripción de los platos empleados en cada zona requiere el cálculo de las distintas áreas que se enumeran a continuación.

- Área total o de plato, ( $A_t$ ).
- Área de vertederos, ( $A_v$ ).
- Área neta, ( $A_n$ ).
- Área activa o de burbujeo, ( $A_a$ ).
- Área de vigas, ( $A_{vig}$ ).

- Área de perforaciones, ( $A_0$ ).

Todas ellas han sido empleadas anteriormente por lo que se omite la descripción en detalle y se presenta el procedimiento de cálculo.

- Se halla el caudal de vapor en cada región de columna, empleando los datos consignados en las tablas A3.CXVII a A3.CXIX y aplicando (A3.18.2). (Será necesario convertir a unidades SI).
- Se calcula el área neta en una primera aproximación teniendo en cuenta (A3.30), con  $Q_v$  el caudal de vapor en  $m^3/s$  y  $v$ , la velocidad admisible del vapor en  $m/s$ , tomada de las tablas A3.CXXIII a A3.CXXV.
- Se seleccionan las relaciones  $W/T$  y  $x/T$  de la Figura A3.6.
- Se calcula la razón  $A_v/A_t$  empleando la expresión, tomada del libro de *Treybal*), (A3.31).
- Se determina el área de torre por aplicación de (A3.32).
- Con el área de la torre disponible, puede hallarse el diámetro según (A3.33).
- En función del diámetro obtenido, se selecciona el valor comercial que se requerirá: el menor posible que verifique las comprobaciones hidráulicas y de pérdidas de carga que se presentan en apartados ulteriores.

El procedimiento descrito se recoge en las siguientes tablas para cada zona de columna.

<b>Cálculo previo: Zona de rectificación</b>			
$Q_v (m^3/s)$	23,469	$A_n (m^2)$	<b>61,210</b>
$W/T$	0,7	$A_v/A_t$	0,088
$x/T$	0,3562	$A_t (m^2)$	<b>83,062</b>
$T (m)$	<b>10,284</b>	$T (m)$	<b>10,5</b>

Tabla. A3.CXXVI. Cálculo previo de áreas para la zona de rectificación

<b>Cálculo previo: Plato de alimentación</b>			
$Q_v$ (m <sup>3</sup> /s)	30,082	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	<b>56,894</b>
$W/T$	0,7	$A_v/A_t$	0,088
$x/T$	0,3562	$A_t$ (m <sup>2</sup> )	<b>77,206</b>
$T$ (m)	<b>9,915</b>	$T$ (m)	<b>10</b>

Tabla. A3.CXXVII. Cálculo previo de áreas para el plato de alimentación

<b>Cálculo previo: Zona de agotamiento</b>			
$Q_v$ (m <sup>3</sup> /s)	32,252	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	<b>51,435</b>
$W/T$	0,7	$A_v/A_t$	0,088
$x/T$	0,3562	$A_t$ (m <sup>2</sup> )	<b>69,798</b>
$T$ (m)	<b>9,427</b>	$T$ (m)	<b>9,5</b>

Tabla. A3.CXXVIII. Cálculo previo de áreas para la zona de agotamiento

Una vez decidido el diámetro de columna, debe reiterarse el cálculo del área total y neta, así como determinarse las distintas dimensiones detalladas en este apartado. El procedimiento es el siguiente:

- Se recalcula el área total empleando los diámetros  $T$  seleccionados, dados en las tablas A3.CXXVI a A3.CXXVIII, y aplicando (A3.24).
- Se determina el área de vertederos multiplicando el área total recalculada por la relación  $A_v/A_t$ , dada en las mismas tablas del guión anterior.
- Se recalcula el área neta por aplicación de (A3.25) y empleando los datos calculados en los guiones anteriores y el número de pasos según tablas A3.CXXII a A3.CXXIII.
- Se determina el área activa aplicando (A3.26) a los datos recalculados y al número de pasos.
- Se determina el área de las vigas por aplicación de (A3.27) a los datos obtenidos en estos guiones.
- Se determina el área de las perforaciones multiplicando el área activa, recién calculada, por la razón de área de perforaciones a área activa recogida en la Tabla A3.XXXVII.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

- Se obtiene  $W$ , multiplicando la relación  $W/T$  seleccionada por el diámetro  $T$  comercial. Los datos se encuentran en las tablas A3.CXXVI a A3.CXXVIII.
- Se obtiene  $x$ , de forma similar, multiplicando la relación  $x/T$  seleccionada por el diámetro  $T$  comercial. Los datos se encuentran de nuevo en las tablas A3.CXXVI a A3.CXXVIII.
- Se obtiene  $Z$ , aplicando (A3.28) a los datos dilucidados en los dos guiones anteriores, según el número de pasos.
- Se obtiene  $e$ , multiplicando el diámetro de orificio consignado en la Tabla A3.XXXVII por la razón de espesor de plato a diámetro de orificio, dada en la misma tabla.
- Se obtiene  $o$ , por aplicación de (A3.29) a los datos de guiones anteriores.

Los resultados obtenidos al seguir el procedimiento anterior se consignan en las siguientes tablas:

Áreas y otras dimensiones: Zona de rectificación			
$A_t$ (m <sup>2</sup> )	86,950	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	63,810
$A_v$ (m <sup>2</sup> )	7,593	$A_a$ (m <sup>2</sup> )	43,228
$A_{vig}$ (m <sup>2</sup> )	20,582	$A_o$ (m <sup>2</sup> )	2,450
$W$ (m)	7,35	$x$ (m)	3,7401
$Z$ (m)	4,4604	$e$ (m)	0,0045
	$o$		38519

Tabla. A3.CXXIX. Cálculo de áreas y dimensiones para la zona de rectificación

Áreas y otras dimensiones: Plato de alimentación			
$A_t$ (m <sup>2</sup> )	78,540	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	57,878
$A_v$ (m <sup>2</sup> )	6,887	$A_a$ (m <sup>2</sup> )	39,209
$A_{vig}$ (m <sup>2</sup> )	18,668	$A_o$ (m <sup>2</sup> )	2,223
$W$ (m)	7	$x$ (m)	3,5620
$Z$ (m)	4,4280	$e$ (m)	0,0045
	$o$		34938

Tabla. A3.CXXX. Cálculo de áreas y dimensiones para el plato de alimentación

<b>Áreas y otras dimensiones: Zona de agotamiento</b>			
$A_t$ (m <sup>2</sup> )	<b>70,882</b>	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	<b>52,234</b>
$A_v$ (m <sup>2</sup> )	<b>6,216</b>	$A_a$ (m <sup>2</sup> )	<b>35,386</b>
$A_{vig}$ (m <sup>2</sup> )	<b>16,848</b>	$A_o$ (m <sup>2</sup> )	<b>2,006</b>
$W$ (m)	<b>6,65</b>	$x$ (m)	<b>3,3839</b>
$Z$ (m)	<b>4,0356</b>	$e$ (m)	<b>0,0045</b>
	<b>o</b>	<b>31532</b>	

Tabla. A3.CXXXI. Cálculo de áreas y dimensiones para la zona de agotamiento

### A3.C2.3.6. Verificaciones de las magnitudes calculadas con los límites de operación

Con la columna dimensionada, esto es, determinados en apartados precedentes tanto el diámetro de columna, como las distintas dimensiones de los platos y el espaciado de los mismos, se hace preciso constatar si el funcionamiento hidráulico es acorde a los límites fijados.

A este fin se dedica el presente apartado donde se realizarán las siguientes verificaciones:

- Verificación de inundación.
- Verificación de derrame o lloriqueo.
- Verificación de descarga.
- Verificación de arrastre fraccional.
- Verificación de máxima carga en vertederos.

Una vez se ha detallado en el capítulo primero el fundamento teórico de las verificaciones de rigor, se practican los cálculos pertinentes y se comprueba que se satisfacen las condiciones descritas. A este fin se sigue el procedimiento que se presenta a renglón seguido.

- Se calculan las distintas magnitudes requeridas:  $v_v$ , aplicando (A3.34) sobre los datos dados en las tablas A3.CXXVI a A3.CXXVIII y A3.CXXIX a A3.CXXXI;  $v_{vm}$  y  $v_o$ , aplicando,

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

respectivamente, (A3.35) y (A3.36) a los datos en A3.CXVII a A3.CXIX, A3.XXXVII y A3.CXXIX a A3.CXXXI, ( $g_c$  se toma como la unidad al trabajar en unidades SI);  $v_{Lv}$  aplicando (A3.37) a los datos proporcionados por A3.CXX a A3.CXXII y A3.CXXIX a A3.CXXXI; y  $Q_{Lv}$ , aplicando (A3.38) a los datos en las mismas tablas que  $v_{Lv}$ .

- Se cotejan las magnitudes recién obtenidas con los valores de las variables límite consignadas en el apartado homólogo al actual del primer capítulo:  $v_v$  menor que  $v$ ,  $v_{vm}$  menor que  $v_0$ ,  $v_{Lv}$  menor que 0,12 m/s,  $Q_{Lv}$  menor que 0,030 m<sup>3</sup>/m·s.
- Se verifica gráficamente que el arrastre fraccional es inferior al 10%, para la curva de velocidad permitida del 78%. En este caso, para las tres zonas, se verifica la curva mostrada en la Figura A3.7 de “Destilado” y “Alimentación”, a tenor de los parámetros de flujo encontrados para la presente operación y tabulados en A3.CXXIII a A3.CXXV.

Se aplica este procedimiento a las distintas zonas de columna y se decide si el proceso de cálculo ha sido correcto hasta el presente punto.

Verificaciones: Zona de rectificación					
Inundación	$v_v$ (m/s)	0,368	$v$ (m/s)	0,383	Verificado
Lloriqueo	$v_{vm}$ (m/s)	0,832	$v_0$ (m/s)	9,577	Verificado
Descarga	$v_{Lv}$ (m/s)	0,014	Arrastre fraccional	0,026	Verificados
Máx. carga en vertedero			$Q_{Lv}$ (m <sup>3</sup> /m·s)	0,015	Verificado

Tabla. A3.CXXXII. Verificaciones para la zona de rectificación

Verificaciones: Plato de alimentación					
Inundación	$v_v$ (m/s)	0,520	$v$ (m/s)	0,529	Verificado
Lloriqueo	$v_{vm}$ (m/s)	1,368	$v_0$ (m/s)	13,534	Verificado
Descarga	$v_{Lv}$ (m/s)	0,020	Arrastre fraccional	0,026	Verificados
Máx. carga en vertedero			$Q_{Lv}$ (m <sup>3</sup> /m·s)	0,019	Verificado

Tabla. A3.CXXXIII. Verificaciones para el plato de alimentación

<b>Verificaciones: Zona de agotamiento</b>					
<b>Inundación</b>	$v_v$ (m/s)	<b>0,617</b>	$v$ (m/s)	<b>0,627</b>	<b>Verificado</b>
<b>Lloriqueo</b>	$v_{vm}$ (m/s)	<b>1,955</b>	$v_0$ (m/s)	<b>16,078</b>	<b>Verificado</b>
<b>Descarga</b>	$v_{Lv}$ (m/s)	<b>0,022</b>	<b>Arrastre fraccional</b>	<b>0,026</b>	<b>Verificados</b>
<b>Máx. carga en vertedero</b>	$Q_{Lv}$ (m <sup>3</sup> /m-s)			<b>0,020</b>	<b>Verificado</b>

Tabla. A3.CXXXIV. Verificaciones para la zona de agotamiento

Dado que todas las verificaciones se han satisfecho, puede procederse a calcular el último y no menos trascendente aspecto del diseño hidráulico: las pérdidas de carga por plato.

#### A3.C2.3.7. Estimación de las pérdidas de carga

Debido a la caída de presión que experimenta el líquido a su paso por el plato, motivada por los diferentes niveles de éste en el plato y el vertedero, es de esperar un cierto retroceso de líquido que, de estimarse excesivo, podría comprometer el adecuado funcionamiento hidráulico de la columna.

Un diseño seguro implica que la suma de alturas de líquido no supere la mitad del espaciado entre platos, como se muestra en la desigualdad (A3.54).

Se presenta el procedimiento de cálculos:

- Cálculo de  $h_w$ : Se aplica (A3.40) al espaciado de platos dado en la tabla A3.XXXVII.
- Cálculo de  $h_c$ : Se aplica el siguiente ciclo iterativo:
  - o Suponer un valor inicial para  $h_c$
  - o Calcular  $W_{ef}/W$  aplicando (A3.43), haciendo uso de los datos dados en las tablas A3.CXXVI a A3.CXXXI y el valor de  $h_c$  supuesto.
  - o Se introduce  $W/W_{ef}$  supuesto en base a  $h_c$  inicial en (A3.42), junto con el caudal de líquido dado en las tablas A3.CXX a A3.CXXII. Se obtiene  $h_c$  calculado.

- Se cotejan los valores de  $h_c$  calculado con  $h_c$  inicial y caso de coincidir razonablemente, se ha dilucidado  $h_c$ . Caso contrario se empleará  $h_c$  calculado sucesivamente tal como se indica desde el punto segundo, hasta alcanzar la convergencia.
- Cálculo de  $h_B$ : Precisa el cálculo de  $h_{VAP}$  y  $h_E$ . A su vez,  $h_{VAP}$  comprende  $h_D$ ,  $h_L$  y  $h_R$ . Una vez calculados todos, como se indica a continuación, se aplica (A3.45).
  - Cálculo de  $h_D$ : Se obtienen  $Re_o$  y  $f$ , aplicando (A3.47.3) y haciendo uso de la Figura A3.16. Los datos para ello, vienen dados en las tablas A3.CXVII a A3.CXIX, A3.CXXXII a A3.CXXXIV y A3.XXXVII. Obtenido  $f$ , se calcula  $C_o$ , aplicando (A3.47.2) a datos de A3.XXXVII. Con lo anterior, (A3.47.1) y los datos dados en las tablas A3.CXVII a A3.CXIX, A3.XXXVII y A3.CXXIX a A3.CXXXI; se aplica (A3.46).
  - Cálculo de  $h_L$ : Se aplica (A3.49.1) y (A3.49.2) a los datos dados en las tablas A3.CXXVI a A3.CXXXI. Con esto,  $h_w$  calculado en el primer guión y los datos dados en las tablas A3.CXVII a A3.CXXII, se aplica (A3.48).
  - Cálculo de  $h_R$ : Se aplica (A3.50) a los datos (A3.47.1) y los consignados en las tablas A3.CXVII a A3.CXIX y A3.XXXVII. Al trabajar en unidades SI,  $g_c$  adquiere valor unitario.
  - Cálculo de  $h_E$ : Debe decidirse el valor de  $A_{da}$ . Se aplica (A3.52) a  $h_w$  y a  $W$  dada en las tablas A3.CXXIX a A3.CXXXI. Se decide según (A3.53), atendiendo a  $A_v$ , dada en las mismas tablas. Se aplica (A3.51) a  $g$  dada en (A3.47.1), al caudal de líquido dado en las tablas A3.CXX a A3.CXXII y a  $A_{da}$  dilucidada.
- Se verifica (A3.54).

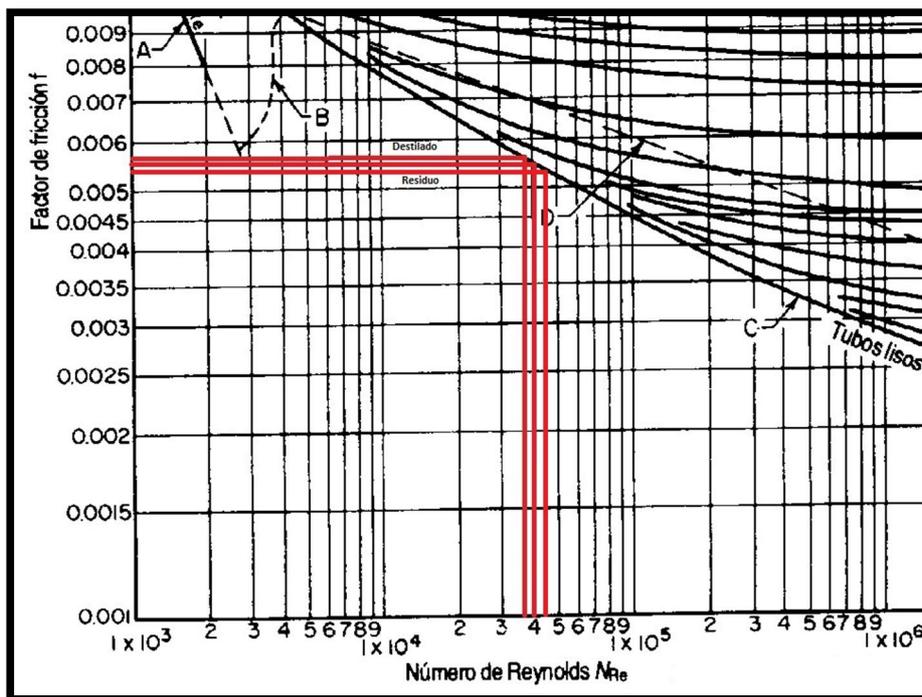


Figura. A3.16. Gráfico de *Moody*.

(Manual del Ingeniero Químico. R. H. Perry, D. W. Green, J. O. Maloney, 6ª Edición)

Las siguientes tablas muestran los resultados derivados de la aplicación del procedimiento.

Pérdidas de carga: Zona de rectificación			
$h_w$ (m)	0,09	$W_{ef}/W$	0,989
	$h_{ccalc}$ (m)	0,040	
$C_0$	1,296	$v_0$ (m/s)	9,577
$Re_0$	$3,75 \cdot 10^4$	$f$	0,0058
$4f$	0,0232	$h_D$ (m)	0,069
$v_a$ (m/s)	0,543	$z$ (m)	8,925
$h_L$ (m)	0,065	$h_R$ (m)	0,002
$A_L$ (m <sup>2</sup> )	0,478	$g$ (m/s <sup>2</sup> )	9,80665
$A_{da}$ (m <sup>2</sup> )	0,478	$h_E$ (m)	0,008
$h_{VAP}$ (m)	0,135	$h_B$ (m)	0,143
$\Delta$	0	Pérdidas (m)	0,273
<b>Verificado</b>			

Tabla. A3.CXXXV. Verificación de pérdidas de carga. Zona de rectificación

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

<b>Pérdidas de carga: Plato de alimentación</b>			
$h_w$ (m)	<b>0,09</b>	$W_{ef}/W$	0,986
	$h_{ccalc}$ (m)	<b>0,049</b>	
$C_0$	1,296	$v_0$ (m/s)	13,534
$Re_0$	$4,12 \cdot 10^4$	$f$	0,0057
$4f$	0,0228	$h_D$ (m)	<b>0,085</b>
$v_a$ (m/s)	0,767	$z$ (m)	8,5
$h_L$ (m)	<b>0,064</b>	$h_R$ (m)	<b>0,002</b>
$A_L$ (m <sup>2</sup> )	0,296	$g$ (m/s <sup>2</sup> )	<b>9,80665</b>
$A_{da}$ (m <sup>2</sup> )	0,296	$h_E$ (m)	<b>0,017</b>
$h_{VAP}$ (m)	<b>0,152</b>	$h_B$ (m)	<b>0,165</b>
$\Delta$	<b>0</b>	Pérdidas (m)	<b>0,304</b>
<b>Verificado</b>			

Tabla. A3.CXXXVI. Verificación de pérdidas de carga. Plato de alimentación

<b>Pérdidas de carga: Zona de agotamiento</b>			
$h_w$ (m)	<b>0,09</b>	$W_{ef}/W$	0,984
	$h_{ccalc}$ (m)	<b>0,050</b>	
$C_0$	1,296	$v_0$ (m/s)	16,078
$Re_0$	$4,47 \cdot 10^4$	$f$	0,0055
$4f$	0,022	$h_D$ (m)	<b>0,091</b>
$v_a$ (m/s)	0,911	$z$ (m)	8,075
$h_L$ (m)	<b>0,061</b>	$h_R$ (m)	<b>0,002</b>
$A_L$ (m <sup>2</sup> )	0,432	$g$ (m/s <sup>2</sup> )	<b>9,80665</b>
$A_{da}$ (m <sup>2</sup> )	0,432	$h_E$ (m)	<b>0,015</b>
$h_{VAP}$ (m)	<b>0,154</b>	$h_B$ (m)	<b>0,168</b>
$\Delta$	<b>0</b>	Pérdidas (m)	<b>0,308</b>
<b>Verificado</b>			

Tabla. A3.CXXXVII. Verificación de pérdidas de carga. Zona de agotamiento

El nivel de la cresta del líquido sobre el vertedero,  $h_c$ , que se ha proporcionado, coincide con el valor del último  $h_c$  supuesto, a su vez coincidente con el calculado hasta la diezmillonésima.

La suma de las pérdidas, dada por (A3.54), no debe superar la mitad del espaciado asumido, a la sazón, 0,45 m. Se comprueba que no sucede en ninguna región de columna, de donde se concluye que el diseño hidráulico es el adecuado a los requerimientos.

#### **A3.C2.4. Decisiones finales de diseño hidráulico**

A lo largo de este anexo de cálculo, se ha caracterizado el flujo de líquido y vapor a través de la operación “EXTRACTIVA 2”: se ha balanceado la unidad, determinado propiedades de corrientes, dimensionado columna y platos y verificado su funcionamiento hidráulico y pérdidas de carga.

Se hace precisa una última sección que determine aspectos fundamentales de construcción de la unidad, tales como el número real de platos, la diferenciación, si procede, de diámetros según zonas de la columna, la posición del plato de alimentación, altura, etc.

Estas decisiones finales no pueden acometerse sin conocerse la eficacia de la separación, que permitirá discriminar entre platos ideales calculados según el método FUG, en los capítulos correspondientes; y los platos reales requeridos.

Se dividirá esta sección final del capítulo en tres apartados:

- Determinación de eficacia por zonas.
- Evaluación de alternativas.
- Decisión final de columna.

##### **A3.C2.4.1. Determinación de eficacia por zonas**

Como se indicó en el apartado homólogo del capítulo primero, se realizarán varias estimaciones de la eficacia de la columna, de modo que pueda compararse la validez de los métodos empleados. Se estimará la eficacia global según el método gráfico de *O’Connell* y también se diferenciará por zonas, haciendo uso de la correlación de *Van Winkle et al.* Finalmente, se corregirá la más baja de las efica-

cias según la tabla de *Lockhart y Leggett*, que afinan la predicción conservadora del primer autor.

Para el cálculo de la eficacia global, es de aplicación el ajuste mostrado en (A3.56), para el que se precisarán datos promediados de viscosidad y volatilidad relativa. La segunda se estima, siguiendo indicaciones del capítulo primero, mediante la expresión (A3.57) y los datos consignados en las tablas A3.XC a A3.XCI. La primera se promedia entre cabeza y cola, (o destilado y residuo si se prefiere), de la Tabla A3.XCVIII. Así, se obtiene:

Estimación de la eficacia global			
$\alpha_{\text{cabeza}}$	1	$\alpha_{\text{cola}}$	1,028
$\mu_{L, \text{cabeza}} \text{ (cP)}$	0,159	$\mu_{L, \text{cola}} \text{ (cP)}$	0,751
$\langle \alpha \mu \rangle \text{ (cP)}$	0,466	$E_o \text{ (%)}$	<b>61,8</b>

Tabla. A3.CXXXIX. Eficacia global de columna. Ajuste de *Eduljee*

La correlación\* de *Van Winkle et al.*, para estimación de la eficacia de plato, es una ecuación potencial de módulos adimensionales que ligan distintas variables asociadas al diseño de platos. Se presentó en (A3.58). Su aplicación requiere las ecuaciones (A3.59).

El cálculo de los grupos adimensionales de la anterior expresión precisa los siguientes datos:

- (A3.59.1): Aplicación de (A3.59.4) tomando datos de las tablas A3.CXXVI a A3.CXXXI.
- (A3.59.2): Requiere datos de las tablas A3.CXVII a A3.CXIX y A3.CXVI.
- (A3.59.3): Aplicación de (A3.59.5), tomando datos de las tablas A3.CXXIX a A3.CXXXI. Una vez determinada (FA), se requerirán además datos de las tablas A3.CXVII a A3.CXIX y A3.CXXXV a A3.CXXXVII, así como  $u_v$  del primer guión.

\* Véase libro de *Towler*.

Resuelto lo anterior, puede aplicarse (A3.58) y obtenerse las eficacias para los platos críticos de la columna: primer plato, o de destilado, plato de alimentación y último plato, o de residuo. Los resultados se consignan en las siguientes tablas:

<b>Estimación de la eficacia del plato primero</b>			
<b>Dg</b>	<b>352,012</b>	<b><math>u_v</math> (m/s)</b>	0,271
<b>Sc</b>	<b>67,362</b>	<b>FA</b>	0,028
<b>Re</b>	<b>18163,298</b>	<b>E</b>	<b>0,988</b>

Tabla. A3.CXL. Estimación de la eficacia del plato primero

<b>Estimación de la eficacia del plato de alimentación</b>			
<b>Dg</b>	<b>129,922</b>	<b><math>u_v</math> (m/s)</b>	0,383
<b>Sc</b>	<b>171,553</b>	<b>FA</b>	0,028
<b>Re</b>	<b>7981,871</b>	<b>E</b>	<b>1,027</b>

Tabla. A3.CXLI. Estimación de la eficacia del plato de alimentación

<b>Estimación de la eficacia del último plato</b>			
<b>Dg</b>	<b>84,149</b>	<b><math>u_v</math> (m/s)</b>	0,455
<b>Sc</b>	<b>332,065</b>	<b>FA</b>	0,028
<b>Re</b>	<b>4772,234</b>	<b>E</b>	<b>1,094</b>

Tabla. A3.CXLII. Estimación de la eficacia del último plato

En este caso, las propiedades físico-químicas del sistema en juego, determinan unas eficacias para los platos críticos exacerbadas, (superiores al 100%). En este caso, no se representa adecuadamente la eficacia de cada zona, por lo que se tomará la eficacia de *O'Connell* como única referencia.

Para concluir el primer apartado, se corregirá la predicción de la eficacia global, según la tabla de *Lockhart* y *Leggett*. La condición para esta corrección es que el producto promediado de la volatilidad relativa y la viscosidad esté comprendido entre 0,1 y 1 cP, como es el caso. La tabla de corrección se incluyó en el capítulo primero bajo la denominación A3.LVII, por lo que se omite en el actual. Procediendo como en el citado primer capítulo se obtiene, para cada zona:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Corrección para rectificación		Corrección para agotamiento	
Z (m)	4,460	Z (m)	4,248
Z (ft)	14,634	Z (ft)	13,937
FI (%)	26,854	FI (%)	26,575
E <sub>o, corregida</sub> (%)	<b>78,4</b>	E <sub>o, corregida</sub> (%)	<b>78,2</b>

Tabla. A3.CXLIII. Correcciones para las zonas de columna

Donde se ha tomado Z de las tablas A3.CXXIX a A3.CXXXI. El factor de incremento se ha interpolado linealmente de la tabla A3.LVII y la corrección final se ha practicado sobre la eficacia global de *O'Connell*, que se ha tomado como la dada por el ajuste de *Eduljee*, en la Tabla A3.CXXXIX, como queda explicado.

La corrección se ha practicado, para cada zona, según la expresión (A3.60) que ha requerido la eficacia global, mencionada en el párrafo anterior, y los factores de incremento, de la misma tabla donde figuran las eficacias globales corregidas, Tabla. A3.CXLIII.

Las eficacias estimadas son considerablemente elevadas. Tras contrastar el funcionamiento de otras plantas similares a la proyectada, se constata que, pese al aluvión de inconvenientes derivados del proceso de purificación que intitula el PFC, cuando menos la eficacia de separación estimada se ajusta a valores operativos reales.

### A3.C2.4.2. Evaluación de alternativas

A la luz de los diámetros requeridos por las secciones de columna, (10,5 m para rectificación y 10 m para agotamiento), se decide en este apartado invertir el orden respecto al capítulo primero: en este punto procedería efectuar los cálculos finales para el escenario mostrado, si bien, puesto que la operación resultaría económica y logísticamente inviable, dado que no se conocen columnas de más de 10 m de diámetro y, de hecho, *Henley* no las recomienda; se hace preciso evaluar una alternativa factible.

El problema de los diámetros estriba en unos caudales de líquido y vapor demasiado elevados. Ello obliga a segregar la alimentación en dos corrientes, de modo que, al disminuir el caudal alimentado, el diámetro de las columnas requeridas sea asumible desde el punto de vista constructivo.

Un divisor de corrientes sólo introduce variación en los distintos caudales, (que, al reducirse a la mitad, exigen replantear el balance de materia), sin alterar la composición de las corrientes. De aquí se deduce que las propiedades estimadas en la sección segunda de este capítulo permanecen inalteradas. Por tanto se reharán los cálculos desde el apartado A3.C2.3.1 hasta obtener una tabla compilatoria para la decisión final.

En primer lugar, procede recalcular las corrientes por actualización del balance de materia. Dado que la alimentación se ha dividido en dos corrientes, así, los caudales se reducen a la mitad y el balance de materia, para una columna resulta:

Balance de materia. Caso 2					
W (kmol/h)	656,831	E (kmol/h)	363,975	X (kmol/h)	292,855
	L (kmol/h)	2228,877	V (kmol/h)	2592,853	
	L' (kmol/h)	2885,708	V' (kmol/h)	2592,853	

Tabla. A3.CXLV. Caudales de las corrientes de “EXTRACTIVA 2”. Caso 2

Se ha decidido denominar estos datos como pertenecientes al “caso 2”, al objeto de distinguirlos de aquellos ligados a la alimentación sin dividir. La Tabla A3.CXLIV se ha obtenido dividiendo por la mitad los datos de A3.LXXXIX.

A continuación se rehacen las tablas A3.CXVII a A3.CXIX incluyendo sólo los datos que difieren del caso anterior:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Propiedades del destilado		Propiedades del plato de alimentación		Propiedades del residuo	
L (kmol/h)	2228,877	L' (kmol/h)	2885,708	L' (kmol/h)	2885,708
V (kmol/h)	2592,853	V' (kmol/h)	2592,853	V' (kmol/h)	2592,853
(L/V)	0,860	(L/V)	1,113	(L/V)	1,113

Tabla. A3.CXLVI. Propiedades de las distintas corrientes. Caso 2

Todos los datos que figuran en aquéllas y no en ésta última son coincidentes: composiciones y propiedades, tal queda advertido más atrás.

Seguidamente se recalcula el número de pasos por plato, aplicando el procedimiento señalado en el apartado A3.C2.3.2. Lo que requerirá la aplicación de la ecuación (A3.18) a la obtención de los caudales volumétricos de líquido y vapor, en cada uno de los platos. Tomando como datos las densidades indicadas en las tablas A3.CXVII a A3.CXIX, válidas para el caso 2, los caudales de la Tabla A3.CXLVI y el diámetro de la reiteración del cálculo de áreas, que se mostrará posteriormente para este segundo caso; cambiando convenientemente unidades se obtiene:

Determinación de pasos: Plato de destilado			
$Q_L$ (m <sup>3</sup> /s)	0,054	$Q_L$ (gal (US)/min)	855,147
T (m)	7	T (ft)	22,966
Nº de pasos (p)	2		

Tabla. A3.CXLVII. Determinación de pasos en zona de rectificación. Caso 2

Determinación de pasos: Plato de alimentación			
$Q_L$ (m <sup>3</sup> /s)	0,068	$Q_L$ (gal (US)/min)	1081,235
T (m)	7	T (ft)	22,966
Nº de pasos (p)	2		

Tabla. A3.CXLVIII. Determinación de pasos en el plato de alimentación. Caso 2

Determinación de pasos: Plato de residuo			
$Q_L$ (m <sup>3</sup> /s)	0,067	$Q_L$ (gal (US)/min)	1061,288
T (m)	6,5	T (ft)	21,325
Nº de pasos (p)	2		

Tabla. A3.CXLIX. Determinación de pasos en zona de agotamiento. Caso 2

Los pasos se han estimado a partir del gráfico de la Figura A3.1, aplicando en esta ocasión los datos recién tabulados. Como justificación de dicha estimación, se presenta la figura siguiente:

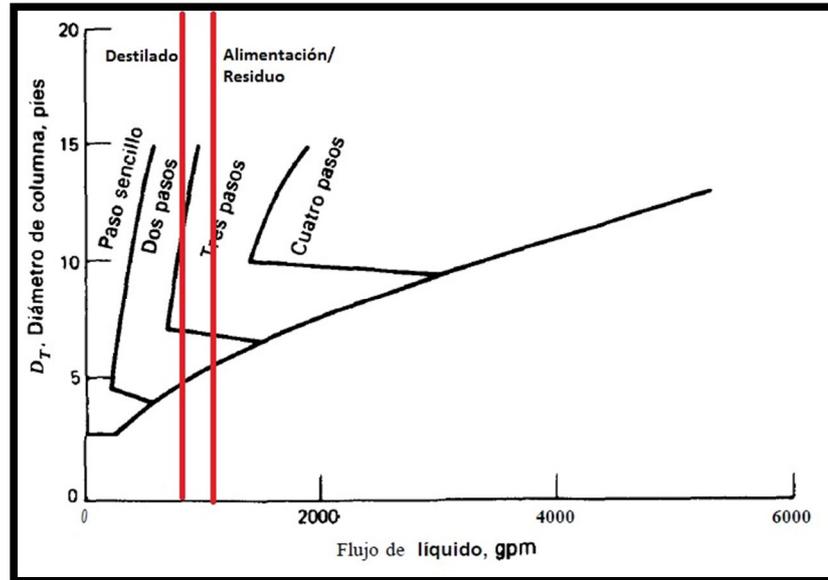


Figura. A3.17. Estimación del número de pasos según recomendaciones de la Koch Engineering Company. (E. J. Henley, J. D. Seader, 1999)

Se observa que la estimación queda fuera de escala a causa del elevado diámetro requerido. No obstante, dado que la Figura A3.17 permite efectuar una aproximación al número de pasos, se han tomado estos por extrapolación, ya que la comprobación rigurosa del funcionamiento de columna se verifica en próximos apartados.

Dado que el diámetro de las secciones no recomienda variar el espaciado de platos y tomando en consideración las efectuadas en el apartado A3.C2.3.3, las dimensiones previas permanecen invariantes respecto al caso anterior, por lo que se remite a lo recogido en la Tabla A3.XXXVII.

En cuanto a los límites de operación, por depender estos de caudales volumétricos, como se muestra en la ecuación (A3.22), es preciso rehacer los cálculos. Para ello, se aplican la antedicha, como

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

se explicó en A3.C2.3.4 y (A3.21) a los datos consignados en A3.XXXVII, A3.CXVII a A3.CXIX y A3.CXLVI; se obtiene:

<b>Límite superior de operación: Zona de rectificación</b>			
<b>PF</b>	0,063	<b><math>\alpha</math> (m)</b>	0,062
	<b>0,1</b>	<b><math>\beta</math> (m)</b>	0,033
<b><math>C_F</math> (m/s)</b>	0,036	<b><math>v_F</math> (m/s)</b>	<b>0,492</b>
<b>% permisible <math>v_F</math></b>	78	<b><math>v</math> (m/s)</b>	<b>0,383</b>

Tabla. A3.CL. Límite superior para la zona de rectificación. Caso 2

<b>Límite superior de operación: Plato de alimentación</b>			
<b>PF</b>	0,071	<b><math>\alpha</math> (m)</b>	0,062
	<b>0,1</b>	<b><math>\beta</math> (m)</b>	0,033
<b><math>C_F</math> (m/s)</b>	0,043	<b><math>v_F</math> (m/s)</b>	<b>0,678</b>
<b>% permisible <math>v_F</math></b>	78	<b><math>v</math> (m/s)</b>	<b>0,529</b>

Tabla. A3.CLI. Límite superior para el plato de alimentación. Caso 2

<b>Límite superior de operación: Zona de agotamiento</b>			
<b>PF</b>	0,068	<b><math>\alpha</math> (m)</b>	0,062
	<b>0,1</b>	<b><math>\beta</math> (m)</b>	0,033
<b><math>C_F</math> (m/s)</b>	0,049	<b><math>v_F</math> (m/s)</b>	<b>0,804</b>
<b>% permisible <math>v_F</math></b>	78	<b><math>v</math> (m/s)</b>	<b>0,627</b>

Tabla. A3.CLII. Límite superior para la zona de agotamiento. Caso 2

Donde, en los tres casos, la velocidad admisible del vapor se ha obtenido por aplicación de la ecuación (A3.23), en los términos participados previamente.

El cálculo de áreas y dimensiones de columna se practica siguiendo las indicaciones mencionadas en el apartado A3.C2.3.5. Por motivos de brevedad se omite referir nuevamente el procedimiento, si bien, deben indicarse los nuevos datos involucrados, pertenecientes a las tablas que seguidamente se enumeran: A3.CXVII a A3.CXIX y A3.CXLVI, (composiciones, propiedades y nuevos caudales), A3.CL a A3.CLII, (velocidad admisible del vapor) y A3.CXLVII a A3.CXLIX, (número de pasos por plato), por orden de necesidad en el desarrollo del cálculo. Así, se rehace el cálculo previo para obtener:

<b>Cálculo previo: Zona de rectificación</b>			
$Q_v$ (m <sup>3</sup> /s)	11,734	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	<b>30,605</b>
$W/T$	0,7	$A_v/A_t$	0,088
$x/T$	0,3562	$A_t$ (m <sup>2</sup> )	<b>37,115</b>
$T$ (m)	<b>6,874</b>	$T$ (m)	<b>7</b>

Tabla. A3.CLIII. Cálculo previo de áreas para la zona de rectificación. Caso 2

<b>Cálculo previo: Plato de alimentación</b>			
$Q_v$ (m <sup>3</sup> /s)	15,041	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	<b>28,447</b>
$W/T$	0,7	$A_v/A_t$	0,088
$x/T$	0,3562	$A_t$ (m <sup>2</sup> )	<b>34,498</b>
$T$ (m)	<b>6,627</b>	$T$ (m)	<b>7</b>

Tabla. A3.CLIV. Cálculo previo de áreas para el plato de alimentación. Caso 2

<b>Cálculo previo: Zona de agotamiento</b>			
$Q_v$ (m <sup>3</sup> /s)	16,126	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	<b>25,718</b>
$W/T$	0,7	$A_v/A_t$	0,088
$x/T$	0,3562	$A_t$ (m <sup>2</sup> )	<b>31,188</b>
$T$ (m)	<b>6,302</b>	$T$ (m)	<b>6,5</b>

Tabla. A3.CLV. Cálculo previo de áreas para la zona de agotamiento. Caso 2

Una vez decidido el diámetro de columna, debe reiterarse el cálculo del área total y neta, así como determinarse las distintas dimensiones señaladas en A3.C2.3.5. El procedimiento se detalla en dicho apartado y los datos requeridos figuran en las tablas siguientes: A3.CLIII a A3.CLV, (cálculos previos), A3.CLXVII a A3.CLXIX, (número de pasos por plato) y A3.XXXVII, (dimensiones previas), por orden de necesidad en el desarrollo del cálculo. Así, se rehace el cálculo previo para obtener:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

<b>Áreas y otras dimensiones: Zona de rectificación</b>			
$A_t$ (m <sup>2</sup> )	38,485	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	31,735
$A_v$ (m <sup>2</sup> )	3,375	$A_a$ (m <sup>2</sup> )	22,587
$A_{vig}$ (m <sup>2</sup> )	9,148	$A_o$ (m <sup>2</sup> )	1,280
W (m)	4,9	x (m)	2,4934
Z (m)	3,9802	e (m)	0,0045
	o		20127

Tabla. A3.CLVI. Áreas y dimensiones para la zona de rectificación. Caso 2

<b>Áreas y otras dimensiones: Plato de alimentación</b>			
$A_t$ (m <sup>2</sup> )	38,485	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	31,735
$A_v$ (m <sup>2</sup> )	3,375	$A_a$ (m <sup>2</sup> )	22,587
$A_{vig}$ (m <sup>2</sup> )	9,148	$A_o$ (m <sup>2</sup> )	1,280
W (m)	4,9	x (m)	2,4934
Z (m)	3,9802	e (m)	0,0045
	o		20127

Tabla. A3.CLVII. Áreas y dimensiones para el plato de alimentación. Caso 2

<b>Áreas y otras dimensiones: Zona de agotamiento</b>			
$A_t$ (m <sup>2</sup> )	33,183	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	27,363
$A_v$ (m <sup>2</sup> )	2,910	$A_a$ (m <sup>2</sup> )	19,476
$A_{vig}$ (m <sup>2</sup> )	7,887	$A_o$ (m <sup>2</sup> )	1,104
W (m)	4,55	x (m)	2,3153
Z (m)	3,6959	e (m)	0,0045
	o		17354

Tabla. A3.CLVIII. Áreas y dimensiones para la zona de agotamiento. Caso 2

Rediseñadas las columnas, es pertinente rehacer las verificaciones del apartado A3.C2.3.6. Siguiendo el procedimiento y ecuaciones mostradas en dicho apartado, se requerirán datos de las siguientes tablas: A3.CLIII a A3.CLVIII, (caudales de vapor y áreas netas recalculadas y distintas dimensiones, respectivamente), A3.CL a A3.CLII, (velocidad admisible del vapor y parámetros de flujo), A3.CXVII a A3.CXIX, (propiedades), A3.XXXVII, (dimensiones pre-

vias) y A3.CXLVII a A3.CXLIX, (caudales de líquido). Se obtiene, para las distintas zonas de columna:

<b>Verificaciones: Zona de rectificación</b>					
<b>Inundación</b>	$v_v$ (m/s)	<b>0,370</b>	$v$ (m/s)	<b>0,383</b>	<b>Verificado</b>
<b>Lloriqueo</b>	$v_{vm}$ (m/s)	<b>0,834</b>	$v_0$ (m/s)	<b>9,164</b>	<b>Verificado</b>
<b>Descarga</b>	$v_{Lv}$ (m/s)	<b>0,016</b>	<b>Arrastre fraccional</b>	<b>0,026</b>	<b>Verificados</b>
<b>Máx. carga en vertedero</b>	$Q_{Lv}$ (m <sup>3</sup> /m·s)			<b>0,011</b>	<b>Verificado</b>

Tabla. A3.CLIX. Verificaciones para la zona de rectificación. Caso 2

<b>Verificaciones: Plato de alimentación</b>					
<b>Inundación</b>	$v_v$ (m/s)	<b>0,474</b>	$v$ (m/s)	<b>0,529</b>	<b>Verificado</b>
<b>Lloriqueo</b>	$v_{vm}$ (m/s)	<b>1,362</b>	$v_0$ (m/s)	<b>11,747</b>	<b>Verificado</b>
<b>Descarga</b>	$v_{Lv}$ (m/s)	<b>0,020</b>	<b>Arrastre fraccional</b>	<b>0,026</b>	<b>Verificados</b>
<b>Máx. carga en vertedero</b>	$Q_{Lv}$ (m <sup>3</sup> /m·s)			<b>0,014</b>	<b>Verificado</b>

Tabla. A3.CLX. Verificaciones para el plato de alimentación. Caso 2

<b>Verificaciones: Zona de agotamiento</b>					
<b>Inundación</b>	$v_v$ (m/s)	<b>0,589</b>	$v$ (m/s)	<b>0,627</b>	<b>Verificado</b>
<b>Lloriqueo</b>	$v_{vm}$ (m/s)	<b>1,952</b>	$v_0$ (m/s)	<b>14,607</b>	<b>Verificado</b>
<b>Descarga</b>	$v_{Lv}$ (m/s)	<b>0,023</b>	<b>Arrastre fraccional</b>	<b>0,026</b>	<b>Verificados</b>
<b>Máx. carga en vertedero</b>	$Q_{Lv}$ (m <sup>3</sup> /m·s)			<b>0,015</b>	<b>Verificado</b>

Tabla. A3.CLXI. Verificaciones para la zona de agotamiento. Caso 2

Donde los límites de A3.C2.3.6 para la velocidad de descarga, el arrastre fraccional y la carga máxima sobre vertederos siguen siendo válidos, por lo que queda verificado el correcto funcionamiento de la columna en el caso 2. Para la justificación gráfica de la comprobación de arrastre fraccional, véase la Figura A3.7, donde se verifica la curva mostrada para “Destilado” y “Alimentación”, a tenor de los parámetros de flujo encontrados y tabulados en A3.CLIX a A3.CLXI.

Deben asimismo estimarse las pérdidas de carga para las nuevas condiciones de operación. Se remite a las ecuaciones citadas en el apartado A3.C2.3.7, que aplican sobre los datos de las siguientes

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

tablas: A3.XXXVII, (espaciado entre platos y diámetro de perforaciones), A3.CXLVII a A3.CXLIX, (caudales de líquido), A3.CLIII a A3.CLVIII, (distintas dimensiones y relaciones), A3.CXVII a A3.CXIX, (propiedades) y A3.CLIX a A3.CLXI, (velocidades de vapor a través de orificios). Cuando se rehacen los cálculos para los nuevos datos se obtiene:

Pérdidas de carga: Zona de rectificación			
$h_w$ (m)	0,09	$W_{ef}/W$	0,986
	$h_{ccalc}$ (m)	0,033	
$C_0$	1,296	$v_0$ (m/s)	9,164
$Re_o$	$3,59 \cdot 10^4$	$f$	0,0058
$4f$	0,0232	$h_D$ (m)	0,063
$v_a$ (m/s)	0,520	$z$ (m)	5,95
$h_L$ (m)	0,062	$h_R$ (m)	0,002
$A_L$ (m <sup>2</sup> )	0,319	$g$ (m/s <sup>2</sup> )	9,80665
$A_{da}$ (m <sup>2</sup> )	0,319	$h_E$ (m)	0,004
$h_{VAP}$ (m)	0,126	$h_B$ (m)	0,131
$\Delta$	0	Pérdidas (m)	0,254
<b>Verificado</b>			

Tabla. A3.CLXII. Pérdidas de carga para la zona de rectificación. Caso 2

Pérdidas de carga: Plato de alimentación			
$h_w$ (m)	0,09	$W_{ef}/W$	0,984
	$h_{ccalc}$ (m)	0,039	
$C_0$	1,296	$v_0$ (m/s)	11,747
$Re_o$	$3,58 \cdot 10^4$	$f$	0,0058
$4f$	0,0232	$h_D$ (m)	0,064
$v_a$ (m/s)	0,666	$z$ (m)	5,95
$h_L$ (m)	0,062	$h_R$ (m)	0,002
$A_L$ (m <sup>2</sup> )	0,319	$g$ (m/s <sup>2</sup> )	9,80665
$A_{da}$ (m <sup>2</sup> )	0,319	$h_E$ (m)	0,007
$h_{VAP}$ (m)	0,128	$h_B$ (m)	0,135
$\Delta$	0	Pérdidas (m)	0,264
<b>Verificado</b>			

Tabla. A3.CLXIII. Pérdidas de carga para el plato de alimentación. Caso 2

Pérdidas de carga: Zona de agotamiento			
$h_w$ (m)	0,09	$W_{ef}/W$	0,982
	$h_{ccalc}$ (m)	0,040	
$C_0$	1,296	$v_0$ (m/s)	14,607
$Re_o$	$4,06 \cdot 10^4$	$f$	0,0057
$4f$	0,0228	$h_D$ (m)	0,075
$v_a$ (m/s)	0,828	$z$ (m)	5,525
$h_L$ (m)	0,058	$h_R$ (m)	0,002
$A_L$ (m <sup>2</sup> )	0,296	$g$ (m/s <sup>2</sup> )	9,80665
$A_{da}$ (m <sup>2</sup> )	0,296	$h_E$ (m)	0,008
$h_{VAP}$ (m)	0,135	$h_B$ (m)	0,143
$\Delta$	0	Pérdidas (m)	0,273
<b>Verificado</b>			

Tabla. A3.CLXIV. Pérdidas de carga para la zona de agotamiento. Caso 2

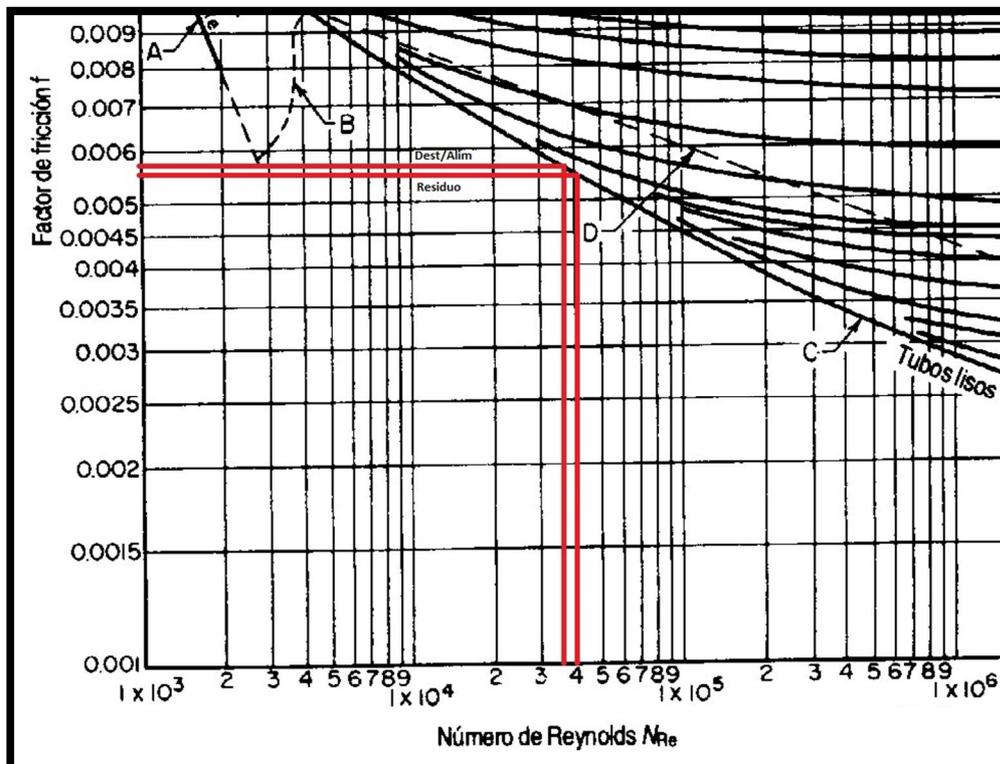


Figura. A3.18. Gráfico de *Moody*.  
(Manual del Ingeniero Químico. *R. H. Perry, D. W. Green, J. O. Maloney, 6ª Edición*)

Se encuentran verificadas, en cada caso, las pérdidas de carga para el caso 2. La justificación gráfica del factor de *Fanning*, viene dada en la Figura A3.18.

Con lo anterior, se han recalculado las áreas y dimensiones de columna, número de pasos y demás magnitudes para el caso segundo en estudio. A continuación se precisa reevaluar las eficacias, a fin de estimar el número de platos reales concordante a las nuevas condiciones. Se procede como en el apartado A3.C2.4.1:

- Eficacia global: Se aplica el ajuste de *Eduljee*, sobre datos de las tablas A3.XC a A3.XCI y A3.XCVIII.
- Eficacias de plato de *Van Winkle et al.*: Se aplica la correlación dada por (A3.59) a los datos de las tablas A3.CLIII a A3.CLVIII, (caudales de vapor y distintas dimensiones), A3.CXVII a A3.CXIX, (propiedades), A3.CXVI, (difusividad del clave ligero en fase líquida) y A3.CLXII a A3.CLXIV, (altura de la presa).
- Correcciones de *Lockhart y Leggett*: Sobre el dato más bajo de eficacia, se aplica (A3.60). Se toma Z de las tablas A3.CLVI y A3.CLVII, (platos de destilado y alimentación, que representan respectivamente las zonas de rectificación y agotamiento). El factor de incremento se interpola linealmente de la Tabla A3.LVII, conocido Z. La condición para la validez de la corrección, obliga a tener un producto promedio de volatilidad relativa y viscosidad entre 0,1 y 1 cP. Condición que se satisface, a tenor de lo mostrado en A3.CLXV.

Se obtiene, aplicando lo anterior:

<b>Estimación de la eficacia global</b>			
$\alpha_{\text{cabeza}}$	1	$\alpha_{\text{cola}}$	1,028
$\mu_{L, \text{cabeza}} \text{ (cP)}$	0,159	$\mu_{L, \text{cola}} \text{ (cP)}$	0,751
$\langle \alpha \mu \rangle \text{ (cP)}$	0,466	$E_o \text{ (%)}$	<b>61,8</b>

Tabla. A3.CLXV. Eficacia global de columna. Ajuste de *Eduljee*. Caso 2

Estimación de la eficacia del plato primero			
Dg	288,900	$u_v$ (m/s)	0,305
Sc	67,362	FA	0,033
Re	17380,641	E	0,968

Tabla. A3.CLXVI. Estimación de la eficacia del plato primero. Caso 2

Estimación de la eficacia del plato de alimentación			
Dg	127,324	$u_v$ (m/s)	0,391
Sc	171,553	FA	0,033
Re	6927,830	E	1,013

Tabla. A3.CLXVII. Estimación de la eficacia del plato de alimentación. Caso 2

Estimación de la eficacia del último plato			
Dg	78,788	$u_v$ (m/s)	0,486
Sc	332,065	FA	0,033
Re	4335,416	E	1,076

Tabla. A3.CLXVIII. Estimación de la eficacia del último plato. Caso 2

Corrección para rectificación		Corrección para agotamiento	
Z (m)	3,980	Z (m)	3,980
Z (ft)	13,058	Z (ft)	13,058
FI (%)	26,223	FI (%)	26,223
$E_o$ , corregida (%)	78,0	$E_o$ , corregida (%)	78,0

Tabla. A3.CLXIX. Correcciones de eficacia. Caso 2

Se observa que, dado que las propiedades no han variado, por no hacerlo las composiciones de las corrientes; la eficacia global se mantiene invariante respecto del caso anterior. Por su parte, cuando se vincula la estimación de las eficacias a dimensiones de columna, recalculadas éstas, se obtienen nuevas eficacias de plato. En este caso, como en el primero, las eficacias de plato exceden el 100%, por lo que carecen de aplicación práctica y se toma como referencia la eficacia global de *O'Connell* dada por la Tabla A3.CLXV. Ésta será por tanto la que se corrige en las últimas tablas, como criterio conservador. Las eficacias corregidas recién obtenidas son ligeramente inferiores a las del caso primero.

Finalmente, con todo lo recalculado en las tablas A3.CXLV a A3.CLXIX, se está en disposición de procurar los datos operativos finales concernientes a la unidad de separación denominada “EXTRACTIVA 2”.

#### A3.C2.4.3. Decisión final de columna

Sean los siguientes datos:

- Secciones.
- Diámetro de cada una.
- Ídem para el espaciado de platos.
- Ídem para el número de platos ideales.
- Ídem para la eficacia global corregida.
- Ídem para el número de platos reales.
- Altura de cada sección.
- Altura total.
- Decisión de número de columnas.
- Altura de cada columna, (si procediere).
- Decisión de reducción de diámetro.

Se procede a describir someramente cada dato.

La columna constará de dos secciones diferenciadas: rectificación y agotamiento.

El diámetro de la sección de rectificación coincidirá con el obtenido para el plato primero, mientras que el de la sección de agotamiento coincidirá con el obtenido para el plato de alimentación; siendo estos los diámetros restrictivos, por comportar las mayores dimensiones. De la misma forma, cada sección estará representada por las dimensiones calculadas para el primer plato, (sección de rectificación) y el plato de alimentación, (sección de agotamiento). Estos datos se toman de las tablas A3.CLIII y A3.CLVI, y A3.CLIV y A3.CLVII.

El espaciado de platos, se toma de la Tabla A3.XXXVII.

El número de platos ideales viene dado directamente por la aplicación del método de FUG a la corriente de alimentación, (véase anexo correspondiente).

La eficacia global corregida difiere ligeramente en cada una de las dos secciones de la columna, según lo recogido en la Tabla. A3.CLXIX.

El número de platos reales se calcula a partir de los datos descritos en los dos párrafos anteriores, según la ecuación (A3.61), para cada zona.

Como número de platos reales para la zona de rectificación, debe tomarse el número dado por (A3.61) truncado en la unidad y aproximado siempre a la siguiente, como criterio conservador. Para la zona de agotamiento procedería, de la misma forma, tomar un plato más, si bien, y dado que debe considerarse el calderín como etapa de equilibrio, los platos reales obtenidos se aproximarán a la unidad anterior.

La altura de cada sección es el resultado de multiplicar el espaciado de platos por el número de platos reales.

La altura total es el total de las alturas de las secciones de rectificación y agotamiento.

En función de la altura total, y como criterio de diseño, se observará la segregación de la columna en un tren de separación,, compuesto por varias columnas, cuando la altura total dividida por 212 pies y truncada en la unidad sea cercana a dos. El número apropiado de columnas será el redondeo del cociente indicado. En todo caso, ninguna columna individual superará los 90 m de altura.

Caso de segregar el tren de separación en varias columnas, la altura de cada columna se dilucida dividiendo la altura total por el número de columnas seleccionado, cambiando convenientemente unidades.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Finalmente, se comprobará la diferencia porcentual entre los diámetros de cada sección. Como criterio operativo, se mantendrá el diámetro superior como diámetro de toda la columna, siempre que la diferencia de diámetros no supere el 20%. La diferencia porcentual de diámetros se calcula según (A3.62).

Considerando lo anterior, se obtiene:

<b>Decisión de columna</b>			
<b>Rectificación</b>		<b>Agotamiento</b>	
<b>T (m)</b>	7	<b>T (m)</b>	7
<b>t (m)</b>	0,9	<b>t (m)</b>	0,9
<b>NPI<sub>rect.</sub></b>	51,227	<b>NPI<sub>agot.</sub></b>	35,675
<b>E<sub>o, corregida</sub></b>	78,0	<b>E<sub>o, corregida</sub></b>	78,0
<b>NPR<sub>rect.</sub></b>	65,679	<b>NPR<sub>agot.</sub></b>	45,740
	66		45
<b>h<sub>rect.</sub> (m)</b>	59,4	<b>h<sub>agot.</sub> (m)</b>	40,5
<b>h<sub>total</sub> (m)</b>		99,9	
<b>h<sub>total</sub> (ft)</b>		327,8	
<b>Criterio 212 ft</b>		1,546 ≈ 2 columnas	
<b>Decisión (m/torre)</b>		49,95	
<b>% ΔT</b>		0	

Tabla. A3.CLXX. Datos para la decisión final de columna

La unidad “EXTRACTIVA 2” se alimenta por la corriente W, procedente de “EXTRACTIVA 1”, dividida en dos. Cada una de estas dos corrientes en que se ha dividido la alimentación, que se denominarán  $W_1$  y  $W_2$ , a su vez alimentan sendas subunidades gemelas consistentes en dos columnas de 49,95 m cada una.

Los datos de A3.CLXX, se refieren a una de las subunidades, puesto que suponen el cálculo para la mitad de la corriente de alimentación.

En cada subunidad, la sección de rectificación es la más luega y consta de 66 platos, en tanto que la sección de agotamiento

consta de 45. Ambas secciones suponen 111 platos distribuidos de la siguiente forma:

- 1ª columna: Sección de agotamiento: 45 platos separados 0,9 m suponen 40,5 m de altura. Sección de rectificación: Descontada la sección de agotamiento, restan 9,45 m repartidos a 0,9 m de espaciado, resultan 10 platos de rectificación.
- 2ª columna: Sección de rectificación: 49,95 m de altura repartidos a 0,9 m de espaciado, resultan 55 platos de rectificación.

La suma de los 45 platos de agotamiento y los 10 de rectificación de la primera columna, amén de los 55 platos de la segunda, supone 110 platos: resta acomodar un último plato de rectificación, lo que se procurará en la segunda columna. De esta forma, la disposición es la que sigue:

- 1ª columna: Sección de agotamiento: 45 platos de doble paso, del 111 al 67; 40,5 m de altura. Sección de rectificación: 10 platos de doble paso, del 66 al 57; 9 m de altura. Total de la 1ª columna: 49,5 m.
- 2ª columna: Sección de rectificación: 56 platos de doble paso, del 56 al 1; 50,4 m de altura.

Los platos se numeran del 1 al 111, tomando como primer plato el de cabeza de la columna segunda y como último, el de cola de la columna primera. Si se suman las alturas, el total coincide con  $h_{total}$  dada en la Tabla. A3.CLXX.

La alimentación se inserta entre los platos 66 y 67, a su temperatura de ebullición, es decir, entre el primer plato de la sección de agotamiento, (67), y el último de la sección de rectificación, (66).

La decisión final sobre la reducción de diámetros es negativa, puesto que el cálculo de diámetros indica aplicar el mismo para las

dos secciones de columna: ambas columnas se construirán con platos de doble paso y 7 m de diámetro.

Las conexiones se efectúan de la siguiente forma:

- El vapor del plato 57, primer plato de la primera columna, se introduce en el plato 56, último plato de la segunda columna. Asimismo, el líquido del plato 56, se bombea al plato 57.
- El vapor del plato 1, esto es, el destilado, se condensa totalmente y la fracción determinada por la relación de reflujo, se retorna como líquido al mismo plato.
- El líquido del plato 111, esto es, el residuo de columna, se calienta a la temperatura indicada por los datos de equilibrio y se retorna el vapor correspondiente al mismo plato.
- El líquido no retornado a la segunda columna en el plato 1, constituye el destilado de “EXTRACTIVA 2” y, según el diagrama de flujo, constituye la alimentación de “MÚLTIPLE”.
- El líquido en equilibrio con el vapor retornado a la primera columna en el plato 111, se retira como residuo de “EXTRACTIVA 2” y se dirige a “RECUPERACIÓN”, al objeto de rescatar el agente extractante furfural, según el diagrama de flujo.

### **Capítulo A3.C3. Diseño hidráulico de “MÚLTIPLE”**

#### **A3.C3.1. Datos previos**

El diseño hidráulico de las columnas de platos requiere la evaluación de una serie de ecuaciones en las que se involucran diversas consideraciones, acerca del flujo de fluidos que en ésta acontece.

Parámetros como las velocidades de inundación y lloriqueo, el arrastre fraccional de líquido y su correcto flujo, así como las pérdidas de carga entre platos, pueden estimarse a través de distintas ecuaciones y gráficas que vinculan distintas propiedades físicas.

El objeto de este anexo radica en proveer de tales propiedades al proceso de dimensionamiento de la columna, así como del propio diseño hidráulico de la torre denominada “MÚLTIPLE”.

El diseño hidráulico de las columnas de platos viene necesariamente precedido de la obtención de propiedades físicas de las corrientes circulantes. A la sazón, se hace preciso definir los caudales y composiciones de las mismas, como información preliminar a la hora de generar las antedichas propiedades.

La alimentación de “MÚLTIPLE” consistirá en la siguiente corriente:

<b>Componente</b>	<b><math>x_{Fi}</math></b>	<b>(Mmol/año)<sub>i</sub></b>
<b>1-Buteno (1)</b>	0,167	1064,263
<b>Butadieno (2)</b>	0,814	5188,861
<b>Cis-2-buteno (3)</b>	0,019	123,724
<b>E (Mmol/año)</b>	<b>6376,848</b>	

Tabla. A3.CLXXI. Corriente E, alimentación de “MÚLTIPLE”

Los componentes de la alimentación se han ordenado por volatilidad creciente. Una vez se establecen como clave ligero el componente butadieno, (de interés), y como pesado el cis-2-buteno; fijando

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

los porcentajes de cada uno de ellos en las corrientes de destilado y residuo, estas últimas quedan definidas según:

Componente	$x_{Di}$	(Mmol/año) <sub>i</sub>	Componente	$x_{Wi}$	(Mmol/año) <sub>i</sub>
1-Buteno (1)	0,170	1064,263	Butadieno (2)	0,021	2,594
Butadieno (2)	0,830	5186,266	Cis-2-buteno (3)	0,979	123,105
Cis-2-buteno (3)	0,000	0,619	Y (Mmol/año)	125,700	
G (Mmol/año)	6251,148				

Tabla. A3.CLXXII. Composiciones de las corrientes G e Y, destilado y residuo de “MÚLTIPLE”

Donde se ha decidido que un 99,95% del clave ligero se recoja en el destilado así como un 0,5% del clave pesado. El componente no clave ligero se recoge enteramente en el destilado. Conocidas la corriente de alimentación y de destilado y residuo, pueden balancearse el resto de las corrientes de columna, partiendo del balance al condensador total y los datos obtenidos a partir de la resolución por el método FUG, (véase anexo correspondiente):

$$(A3.66) \begin{cases} V = L + G & (1) \\ R_D = L/G \cong 4,35 & (2) \end{cases}$$

Se tienen V y L, donde V es el vapor saliente de columna que se dirige al condensador, L es el líquido condensado totalmente y retornado a columna y G es el destilado, la fracción de líquido que se retira de la unidad y se alimenta íntegramente en la operación subsiguiente, “BINARIA”. Por su parte,  $R_D$  es 1,1 veces la relación de reflujo externa mínima estimada por aplicación de la ecuación de Underwood.

Operando con los datos de la Tabla A3.CLXXII y aplicando la ecuación (A3.66), se obtiene:

$$\begin{cases} L = R_D \cdot G = 4,35 \cdot 6251,148 \cong 27192,494 \text{ Mmol/año} \\ V = L + E = 27192,494 + 6251,148 \cong 34443,642 \text{ Mmol/año} \end{cases}$$

Considerando a continuación el balance al plato de alimentación:

$$(A3.67) \begin{cases} L' = L + \phi E & (1) \\ V = V' + (1 - \phi)E & (2) \end{cases}$$

Donde  $\phi$  es la condición de alimentación, a la sazón la unidad por tratarse ésta de un líquido a su temperatura de ebullición; se tiene:

$$\begin{cases} L' = L + E = 27192,494 + 6376,848 \cong 33569,342 \text{ Mmol/año} \\ V = V' \cong 34443,642 \text{ Mmol/año} \end{cases}$$

Las corrientes  $L'$  y  $V'$ , responden al flujo de líquido y vapor en la sección de agotamiento. Multiplicando las corrientes por el factor de conversión:  $\frac{1000 \text{ kmol}}{1 \text{ Mmol}} \cdot \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ días}} \cdot \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}}$ , se obtienen los siguientes resultados en unidades más convenientes:

Balance de materia					
<b>E (kmol/h)</b>	<b>727,951</b>	<b>G (kmol/h)</b>	<b>713,601</b>	<b>Y (kmol/h)</b>	<b>14,349</b>
	<b>L (kmol/h)</b>	<b>3102,342</b>	<b>V (kmol/h)</b>	<b>3815,943</b>	
	<b>L' (kmol/h)</b>	<b>3830,292</b>	<b>V' (kmol/h)</b>	<b>3815,943</b>	

Tabla. A3.CLXXIII. Caudales de las corrientes de “MÚLTIPLE”

Con las corrientes y sus composiciones definidas, puede procederse a la determinación de las propiedades requeridas para el procedimiento de diseño hidráulico de la columna. Tales propiedades son las que siguen: Densidad de fase líquida,  $\rho_L$ , y densidad de fase vapor,  $\rho_V$ , viscosidad de fase líquida y fase vapor,  $\mu_L$  y  $\mu_V$  respectivamente, tensión superficial del líquido,  $\sigma$ , y difusividad del componente clave ligero en fase líquida.

Dado que el diseño hidráulico de las zonas de rectificación y agotamiento de la columna dependerá de las características del flujo, se determinarán las propiedades del destilado, el residuo y el fluido que alimenta a la columna, siendo éstas las regiones críticas de la misma. De esta forma, las composiciones de líquido y vapor en las

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

mencionadas regiones, así como las temperaturas correspondientes se consignan en las siguientes tablas:

	Composición fase líquida			
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$T_L$ (K)
<b>Destilado</b>	0,170	0,830	0,000	287,182
<b>Plato alimentación</b>	0,167	0,814	0,019	287,313
<b>Residuo</b>	0,000	0,021	0,979	296,253

Tabla. A3.CLXXIV. Composición y T del líquido para las distintas corrientes

	Composición fase vapor			
	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$T_V$ (K)
<b>Destilado</b>	0,170	0,830	0,000	287,184
<b>Plato alimentación</b>	0,184	0,800	0,015	287,313
<b>Residuo</b>	0,000	0,029	0,971	296,253

Tabla. A3.CLXXV. Composición y T del vapor para las distintas corrientes

Donde las corrientes de alimentación y residuo se encuentran en equilibrio, (de ahí las temperaturas coincidentes del líquido y el vapor), mientras que el destilado presenta una composición equivalente al vapor saliente de columna, al ser este condensado totalmente y retornado parcialmente a columna. Es por ello que la fase líquida y vapor del destilado no se encuentran en equilibrio y, como consecuencia, las temperaturas de ambas fases no son coincidentes, (se incidirá sobre este punto en el anexo de diseño de cambiadores de calor asociados a las columnas).

### **A3.C3.2. Determinación de propiedades físicas**

#### **A3.C3.2.1. Densidad de la fase líquida**

El cálculo de la densidad de la fase líquida se practica haciendo uso de la ecuación de *Rackett*<sup>\*</sup> para la estimación de volumen de líquido saturado, según la expresión (A3.3), que requiere volúmenes críticos,  $V_{ci}$ , y factores de compresibilidad críticos,  $Z_{ci}$ , de las sustan-

\* H. G. Rackett. J. Chem. Eng. Data, vol. 15, pgs. 514-517, 1970.

cias puras involucradas en la operación. También se requerirán las temperaturas críticas de las mismas, a fin de hallar la temperatura reducida según (A3.3.2). Las propiedades críticas requeridas se recogen en la tabla que sigue:

Propiedades críticas					
$T_{c1}$ (K)	419,6	$V_{c1}$ (L/mol)	0,240	$Z_{c1}$	0,277
$T_{c2}$ (K)	425,0	$V_{c2}$ (L/mol)	0,221	$Z_{c2}$	0,270
$T_{c3}$ (K)	435,6	$V_{c3}$ (L/mol)	0,234	$Z_{c3}$	0,272

Tabla. A3.CLXXVI. Propiedades críticas requeridas por la ecuación (A3.3)

Con los datos de las tablas A3.CLXXVI y A3.CLXXIV y aplicando (A3.3), se tiene:

	$T_{r1}$	$T_{r2}$	$T_{r3}$	$V_1^{Lsat}$	$V_2^{Lsat}$	$V_3^{Lsat}$
<b>Destilado</b>	0,684	0,676	0,659	0,095	0,086	0,090
<b>Plato alimentación</b>	0,685	0,676	0,660	0,095	0,086	0,090
<b>Residuo</b>	0,706	0,697	0,680	0,097	0,087	0,091

Tabla. A3.CLXXVII. Aplicación de (A3.3)

Donde los volúmenes de líquido saturados, según la ecuación de Rackett, presentan las mismas unidades que los volúmenes críticos, L/mol. Considerando que el recíproco de los volúmenes saturados coincide con la densidad molar de las sustancias puras, y ponderando según las composiciones de las mismas como regla de mezclado, se obtiene la densidad molar de las tres corrientes, como queda indicado en la expresión (A3.4). Por aplicación de ésta, hasta el tercer componente, sobre los volúmenes saturados de la Tabla A3.CLXXVII, las composiciones en A3.CLXXIV y convirtiendo a unidades más convenientes, se obtiene para cada corriente:

	$\rho_L$ (mol/cm <sup>3</sup> )
<b>Destilado</b>	0,011
<b>Plato alimentación</b>	0,011
<b>Residuo</b>	0,011

Tabla. A3.CLXXVIII. Estimación de las densidades molares de fase líquida

### A3.C3.2.2. Viscosidad de la fase líquida

El cálculo de viscosidades para la fase líquida involucra distintos procedimientos: un método para las viscosidades de compuestos puros y otro método, o regla de mezclado, para la obtención de la viscosidad de la fase líquida multicomponente. Las viscosidades puras se dilucidan mediante el procedimiento *API 11A2.1*, contenido en el libro técnico citado en la bibliografía consultada\*. Este procedimiento, similar a la ecuación de *Antoine* para el cálculo de presiones de vapor, viene dado por la ecuación (A3.5).

El procedimiento precisa el valor de los coeficientes A, B, C, D y E de las sustancias puras, que figuran tabulados en el libro técnico citado, en las páginas que suceden a la expresión anterior. Para las sustancias en juego tales coeficientes son los que se consignan a continuación:

<b>Coeficientes para el procedimiento API 11A2.1</b>					
<b>A<sub>1</sub></b>	-1,9161·10 <sup>0</sup>	<b>A<sub>2</sub></b>	2,0489·10 <sup>1</sup>	<b>A<sub>3</sub></b>	-1,0343·10 <sup>1</sup>
<b>B<sub>1</sub></b>	6,0498·10 <sup>2</sup>	<b>B<sub>2</sub></b>	-5,5836·10 <sup>2</sup>	<b>B<sub>3</sub></b>	9,4014·10 <sup>2</sup>
<b>C<sub>1</sub></b>	-1,2860·10 <sup>0</sup>	<b>C<sub>2</sub></b>	-4,5060·10 <sup>0</sup>	<b>C<sub>3</sub></b>	-1,1850·10 <sup>-2</sup>
<b>D<sub>1</sub></b>	0,0000·10 <sup>0</sup>	<b>D<sub>2</sub></b>	0,0000·10 <sup>0</sup>	<b>D<sub>3</sub></b>	0,0000·10 <sup>0</sup>
<b>E<sub>1</sub></b>	0,0000·10 <sup>0</sup>	<b>E<sub>2</sub></b>	0,0000·10 <sup>0</sup>	<b>E<sub>3</sub></b>	0,0000·10 <sup>0</sup>

Tabla. A3.CLXXIX. Coef. para estimación de viscosidad de sustancias puras

Haciendo uso de la Tabla A3.CLXXIX y de la citada ecuación (A3.5), se obtiene para las distintas corrientes:

	<b>T<sub>l</sub> (R)</b>	<b>μ<sub>1</sub> (cP)</b>	<b>μ<sub>2</sub> (cP)</b>	<b>μ<sub>3</sub> (cP)</b>
<b>Destilado</b>	516,927	<b>0,154</b>	<b>0,159</b>	<b>0,184</b>
<b>Plato alimentación</b>	517,164	<b>0,154</b>	<b>0,159</b>	<b>0,184</b>
<b>Residuo</b>	533,256	<b>0,142</b>	<b>0,143</b>	<b>0,174</b>

Tabla. A3.CLXXX. Estimación de viscosidad de compuestos puros

\* Se refiere a *Technical Data Book-Petroleum Refining*, American Petroleum Institute (API), 6ª Edición, abril 1997.

Donde se han convertido las temperaturas correspondientes a cada corriente, dadas en la Tabla A3.CLXXIV a Rankine, la unidad de temperatura solicitada por la ecuación (A3.5).

Una vez determinadas las viscosidades de los compuestos puros, la de la mezcla se estima por la aplicación de la regla tomada del libro técnico de *API* mostrada en (A3.7).

Haciendo uso de nuevo de las composiciones de la Tabla A3.CLXXIV, así como de las viscosidades de la Tabla A3.CLXXX, por aplicación de (A3.7) hasta el tercer componente, se obtiene:

	$\mu_L$ (cP)
Destilado	0,158
Plato alimentación	0,159
Residuo	0,174

Tabla. A3.CLXXXI. Estimación de las viscosidades de fase líquida

Como comentario a los métodos utilizados, debe mencionarse el hecho de que estos corresponden a estimaciones de la viscosidad a baja presión, como es el caso. Es por ello que las desviaciones esperadas del comportamiento experimental deben ser asumibles.

### A3.C3.2.3. Densidad de la fase vapor

La estimación de las corrientes de vapor, se ha realizado a partir de la ecuación de *Pitzer*<sup>\*</sup>, presentada en (A3.8), conjunto de ecuaciones que requería de la definición de presión parcial según la ley de *Dalton*, ecuación (A3.9).

La presión de operación se especificó en el anexo de generación de datos termodinámicos:  $P = 2$  atm. De esta forma, puede estimarse el factor de compresibilidad,  $Z_i$ , para sustancias puras. Atendiendo a las ecuaciones (A3.10), puede obtenerse tanto el volumen

\* Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química. *J. M. Smith, H. C. Van Ness, M. M. Abbott*. McGraw-Hill. 6ª Edición, pgs. 108-112.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

de compuesto puro en cada corriente, como la densidad, de modo similar al empleado para la fase líquida.

El cálculo final de la densidad de vapor se efectúa a través de la regla de mezclado dada por (A3.11), a la sazón truncada en el tercer componente.

Haciendo uso de la Tabla A3.CLXXV, la Tabla A3.CLXXVI y la ecuación (A3.8.5), se determinan las siguientes temperaturas reducidas:

	$T_{r1}$	$T_{r2}$	$T_{r3}$
<b>Destilado</b>	0,684	0,676	0,659
<b>Plato alimentación</b>	0,685	0,676	0,660
<b>Residuo</b>	0,706	0,697	0,680

Tabla. A3.CLXXXII. Temperaturas reducidas de fase vapor

Se sigue el procedimiento empleando la Tabla A3.CLXXV y aplicando la ecuación (A3.9):

	$P_1$ (atm)	$P_2$ (atm)	$P_3$ (atm)
<b>Destilado</b>	0,341	1,659	0,000
<b>Plato alimentación</b>	0,369	1,601	0,031
<b>Residuo</b>	0,000	0,057	1,943

Tabla. A3.CLXXXIII. Presiones parciales de fase vapor

El siguiente paso de cálculo requiere como dato las presiones de vapor críticas. En la siguiente tabla se proporcionarán también los factores acéntricos críticos:

<b>Propiedades críticas</b>			
$P_{c1}$ (atm)	39,7	$\omega_1$	0,187
$P_{c2}$ (atm)	42,7	$\omega_2$	0,195
$P_{c3}$ (atm)	41,5	$\omega_3$	0,202

Tabla. A3.CLXXXIV. Propiedades críticas requeridas por la ecuación (A3.8)

Por medio de las dos tablas anteriores y por aplicación de (A3.8.4), se obtienen las presiones reducidas:

	$P_{r1}$	$P_{r2}$	$P_{r3}$
<b>Destilado</b>	0,009	0,039	0,000
<b>Plato alimentación</b>	0,009	0,037	0,001
<b>Residuo</b>	0,000	0,001	0,047

Tabla. A3.CLXXXV. Presiones reducidas de fase vapor

La aplicación de la ecuación (A3.8) generará los factores de compresibilidad de cada componente en su correspondiente vapor, haciendo uso de los datos de las tablas A3.CLXXXII y A3.CLXXXIV a A3.CLXXXV:

	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$
<b>Destilado</b>	0,990	0,951	1,000
<b>Plato alimentación</b>	0,989	0,953	0,999
<b>Residuo</b>	1,000	0,998	0,942

Tabla. A3.CLXXXVI. Factores de compresibilidad de fase vapor

La tabla anterior, por aplicación de la ecuación (A3.10.1), proporciona volúmenes de cada especie en fase vapor. La presión parcial se toma de la Tabla A3.CLXXXIII y la temperatura de la Tabla A3.CLXXXV:

	$V_1$ (L/mol)	$V_2$ (L/mol)	$V_3$ (L/mol)
<b>Destilado</b>	68,494	13,505	119063,900
<b>Plato alimentación</b>	63,231	14,034	764,937
<b>Residuo</b>	0,000	425,122	11,783

Tabla. A3.CLXXXVII. Volúmenes por componente en fase vapor

Donde se ha tomado  $R = 0,082057 \text{ atm}\cdot\text{L/mol}\cdot\text{K}$ . Los volúmenes correspondientes a especies sin composición, o con valores muy bajos, en las distintas corrientes, (v. gr. en el destilado no debe aparecer apenas clave ligero); se han supuesto nulos, (si carece de composición, no ha de tener volumen). Como puede observarse, de-

bido a la mínima composición de disolvente en la fase vapor, su presión parcial es también un valor muy bajo, por lo que al sustituir en (A3.10.1), el volumen resulta un valor muy elevado.

A efectos prácticos, debido a la escasa composición referida, se puede suponer que determinados componentes apenas pasan a fase vapor y, por tanto, su volumen es despreciable. En todo caso, aunque se considerasen los volúmenes elevados dados en la Tabla A3.CLXXXVII, la contribución de los mismos a la densidad de la fase vapor es despreciable, puesto que, según (A3.10.2), suman los recíprocos de los volúmenes ponderados a las composiciones: si éstas ya son bajas, al multiplicar por el recíproco de un número elevado, el valor resulta nimio.

Haciendo uso combinado de las ecuaciones (A3.10.2) y (A3.11), leyendo volúmenes molares de la tabla anterior, las composiciones de vapor de la Tabla A3.CLXXV y cambiando a unidades más convenientes:

	$\rho_v \cdot 10^5 \text{ (mol/cm}^3\text{)}$
<b>Destilado</b>	6,392
<b>Plato alimentación</b>	5,996
<b>Residuo</b>	8,251

Tabla. A3.CLXXXVIII. Estimación de las densidades molares de fase vapor

#### A3.C3.2.4. Viscosidad de la fase vapor

La viscosidad de la fase vapor, como para el caso de la fase líquida, requiere el concurso de dos métodos de estimación: uno para la determinación de viscosidad de los compuestos puros, y otro que proponga una regla de mezclado válida para encontrar la viscosidad de la fase.

Se ha seleccionado, del libro de *Reid*, la ecuación de *Lucas*, adecuada para el cálculo de viscosidades de sustancias puras polares y a baja presión. Pese a que los componentes presentes son

apolares, (o muy ligeramente polares), se seguirá aplicando el mismo método de los capítulos previos a fin de incurrir siempre en un error de método similar. Como regla de mezclado se empleará el método de *Wilke*, regla de rigurosidad intermedia, y suficiente en este caso, para obtener la viscosidad de la mezcla. Las expresiones de *Lucas* se mostraron en la expresión (A3.12).

Donde el factor  $F_p^0$  se presentó como coeficiente de corrección para polaridad, en función del momento dipolar reducido,  $\mu_r$ ; calculado a partir de la ecuación (A3.12.4) para cada componente en función de su momento dipolar,  $\mu$ . El factor  $F_Q^0$  prestaba corrección a desviaciones cuánticas para el caso de gases como el hidrógeno, helio o deuterio. A la sazón se consideró igual a la unidad, puesto que no era requerida, en el capítulo primero ni en sucesivos, corrección por efecto cuántico. Finalmente,  $\xi$  se definió como viscosidad reducida inversa y se calculó por la ecuación (A3.12.2), introduciendo las variables en las unidades especificadas.

Se listan a renglón seguido las propiedades necesarias para el cálculo de (A3.12):

<b>Propiedades de compuestos puros</b>			
$\mu_1$ (debyes)	0,3	$PM_1$ (g/mol)	56,108
$\mu_2$ (debyes)	0,0	$PM_2$ (g/mol)	54,092
$\mu_3$ (debyes)	0,3	$PM_3$ (g/mol)	56,108

Tabla. A3.CLXXXIX. Propiedades requeridas por la ecuación (A3.12)

Con las que pueden calcularse tanto el momento dipolar reducido, como la viscosidad reducida inversa, haciendo uso de las ecuaciones (A3.12.4) y (A3.12.2) respectivamente; así como de las tablas A3.CLXXVI, A3.CLXXXIV, (cambiando unidades) y A3.CLXXXIX:

$\mu_{r1}$	0,0011	$\xi_1$ ( $\mu P^{-1}$ )	$5,48 \cdot 10^{-3}$
$\mu_{r2}$	0,0000	$\xi_2$ ( $\mu P^{-1}$ )	$5,32 \cdot 10^{-3}$
$\mu_{r3}$	0,0010	$\xi_3$ ( $\mu P^{-1}$ )	$5,35 \cdot 10^{-3}$

Tabla. A3.CXC. Aplicación de (A3.12.4) y (A3.12.2)

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

A la luz de los momentos dipolares reducidos aportados por la Tabla. A3.CXC, y según las expresiones (A3.12.3), se aplicará, la primera expresión a los tres, (esto es, no recibirán corrección por polaridad). Con estas expresiones y los datos de las tablas A3.CLXXVI y A3.CLXXXII, se tienen los siguientes factores de corrección para cada una de las corrientes:

$F_{P1}^0$	1,0000	$F_{P1}^0$	1,0000	$F_{P1}^0$	1,0000
$F_{P2}^0$	1,0000	$F_{P2}^0$	1,0000	$F_{P2}^0$	1,0000
$F_{P3}^0$	1,0000	$F_{P3}^0$	1,0000	$F_{P3}^0$	1,0000
<b>Destilado</b>		<b>Alimentación</b>		<b>Residuo</b>	

Tabla. A3.CXCI. Factores de corrección para el método de *Lucas*

Finalmente, con los datos de las tablas A3.CXC a A3.CXCI y nuevamente, A3.CLXXXII, se estiman las viscosidades de los compuestos puros en cada corriente aplicando (A3.12.1):

	$\mu_1$ ( $\mu\text{P}$ )	$\mu_2$ ( $\mu\text{P}$ )	$\mu_3$ ( $\mu\text{P}$ )
<b>Destilado</b>	75,788	76,957	74,716
<b>Plato alimentación</b>	75,822	76,991	74,749
<b>Residuo</b>	78,188	79,395	77,085

Tabla. A3.CXCII. Estimación de viscosidad de los compuestos puros

La viscosidad de la mezcla se estima por aplicación del método de *Wilke*, tal como figura *ut supra* y se mostró en (A1.13). Su desarrollo para un sistema de tres componentes produce:

$$\mu_v = \frac{y_1\mu_1}{y_1 + y_2\phi_{12} + y_3\phi_{13}} + \frac{y_2\mu_2}{y_2 + y_1\phi_{21} + y_3\phi_{23}} + \frac{y_3\mu_3}{y_3 + y_1\phi_{31} + y_2\phi_{32}}$$

Se han eliminado directamente los  $\phi_{ii}$ , tal como indica (A3.13.2.3).

El cálculo de los coeficientes  $\phi_{ij}$  mediante la ecuación (A3.13.2.1) y los datos de las tablas A3.CLXXXIX y A3.CXCII, se tabula a continuación:

	$\phi_{12}$	$\phi_{13}$	$\phi_{23}$
<b>Destilado</b>	0,974	1,007	1,034
<b>Plato alimentación</b>	0,974	1,007	1,034
<b>Residuo</b>	0,974	1,007	1,034

Tabla. A3.CXCIII. Determinación de los  $\phi_{ij}$

El cálculo de los coeficientes  $\phi_{ji}$  mediante la ecuación (A3.13.2.2) y los datos de las tablas A3.CLXXXIX, A3.CXCII y A3.CXCIII, se tabula a continuación:

	$\phi_{21}$	$\phi_{31}$	$\phi_{32}$
<b>Destilado</b>	1,026	0,993	0,968
<b>Plato alimentación</b>	1,026	0,993	0,968
<b>Residuo</b>	1,026	0,993	0,968

Tabla. A3.CXCIV. Determinación de los  $\phi_{ji}$

Finalmente, el cálculo de las viscosidades de la fase vapor, haciendo uso de las tablas A3.CLXXV, A3.CXCII y A3.CXCIII a A3.CXCIV, por aplicación del desarrollo de la ecuación (A3.13.1), (cambiando unidades); queda recogido en la tabla siguiente:

	$\mu_v$ (cP)
<b>Destilado</b>	<b>0,0077</b>
<b>Plato alimentación</b>	<b>0,0077</b>
<b>Residuo</b>	<b>0,0077</b>

Tabla. A3.CXCV. Estimación de las viscosidades de fase vapor

### A3.C3.2.5. Tensión superficial de corrientes

Se empleará la correlación, tomada del libro de *Reid*, de *Macleod-Sugden* para la determinación de tensiones superficiales de mezclas no acuosas. Se mostró en la expresión (A3.14), válida para este caso cuando el sumatorio se trunca en el tercer componente.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

El único término no tabulado con anterioridad es  $[P_i]$ , el “parachor” de cada sustancia. Se trata de un término de unidades  $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{1/4} / \text{s}^{1/2}$ , relativo a la tensión superficial e inmanente a cada especie. Su puede determinar mediante un método de contribución de grupos denominado de *Sugden*.

En la siguiente tabla se listan los grupos contribuyentes de cada especie, su número y el parachor final calculado como suma de las contribuciones individuales:

Componente	Grupos	Contribución	Número	$[P_i]$
1	CH <sub>3</sub>	55,5	1	179,1
	CH <sub>2</sub> en -(CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> (n < 12)	40,0	1	
	Enlace etilénico terminal	19,1	1	
	C	9,0	2	
	H	15,5	3	
2	Enlace etilénico terminal	19,1	2	167,2
	C	9,0	4	
	H	15,5	6	
3	CH <sub>3</sub>	55,5	2	177,7
	Enlaces etilénicos 2,3	17,7	1	
	C	9,0	2	
	H	15,5	2	

Tabla. A3.CXCVI. Determinación de parachors por contribución de grupos

Con lo anterior, se está en condiciones de estimar la tensión superficial de cada corriente, haciendo uso de los datos ya tabulados en A3.CLXXIV a A3.CLXXV, A3.CLXXVIII, A3.CLXXXVIII y A3.CXCVI; por aplicación de la ecuación (A3.14):

	$\sigma$ (dyn/cm)
Destilado	13,957
Plato alimentación	13,982
Residuo	13,852

Tabla. A3.CXCVII. Estimación de las tensiones superficiales

### A3.C3.2.6. Difusividad del clave ligero en fase líquida

El episodio de determinación de propiedades concluye con la estimación de la difusividad del clave ligero en fase líquida. Tal como se menciona en la primera sección de este capítulo, el clave ligero, a la sazón, es el componente butadieno. La estimación empleará la ecuación del método de *Wilke-Chang* modificada por *Perkins y Geankoplis*, tomada del libro de *Reid*, para difusión de un componente en una mezcla líquida:

$$(A3.68) \left\{ \begin{array}{l} \mathcal{D}_{2,m} (\text{cm}^2/\text{s}) = 7,4 \cdot 10^{-8} \frac{T_L \sqrt{\varphi PM}}{\mu_L V_{b2}^{0,6}} \quad (1) \\ \varphi PM = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 2}}^n x_j \varphi_j PM_j = x_1 \varphi_1 PM_1 + x_3 \varphi_3 PM_3 \quad (2) \\ \text{con } T_L \text{ en K, } PM \text{ en g/mol, } \mu_L \text{ en cP y } V_{b2} \text{ en cm}^3/\text{mol} \end{array} \right.$$

Donde  $\mathcal{D}_{2,m}$ , es la difusividad del clave ligero, (butadieno), en la mezcla líquida. La ecuación requiere valores de  $\varphi$  y de  $V_{b2}$ . El resto de magnitudes y propiedades han sido estimadas en apartados anteriores. En el sumatorio (A3.65.2), no se considera la contribución del clave ligero.

Por una parte,  $\varphi$ , corresponde al factor de asociación de los distintos componentes. Se recomienda una serie de valores para distintos solventes entre los que no se encuentran los componentes involucrados. Para este caso, el método prevé emplear el valor de la unidad, por lo que  $\varphi_j = 1$ .

Por otra parte,  $V_{b2}$ , es el volumen molar del clave ligero a su temperatura de ebullición. Para estimar esta propiedad será necesario recurrir a la expresión de *Tyn y Calus*, en función del volumen crítico, tomada del libro de *Reid* y notada como ecuación (A3.16).

Presentadas las ecuaciones, puede procederse al desarrollo del cálculo. Haciendo uso de los datos consignados en la Tabla A3.CLXXVI, aplicando (A3.16) y cambiando unidades se determina:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

$V_{b2}$ (cm <sup>3</sup> /mol)	58,583
---------------------------------	--------

Tabla. A3.CXCVIII. Volumen molar del clave ligero a su T de ebullición

Empleando los datos tabulados en A3.CLXXIV, A3.CLXXXIX, A3.CLXXXI y A3.CXCVIII y aplicando (A3.68.2) y (A3.68.1) sucesivamente, se estiman las difusividades requeridas para cada corriente:

	$\varphi_{PM}$	$D_{2m}$ (cm <sup>2</sup> /s)
<b>Destilado</b>	9,558	$3,607 \cdot 10^{-5}$
<b>Plato alimentación</b>	10,453	$3,768 \cdot 10^{-5}$
<b>Residuo</b>	54,950	$8,137 \cdot 10^{-5}$

Tabla. A3.CXCIX. Difusividades del clave ligero en fase líquida

### A3.C3.3. Diseño hidráulico

El diseño hidráulico de columna tiene por objeto el dimensionamiento de la misma, esto es, la obtención del diámetro de platos, sus áreas características, disposición de sus elementos, (válvulas, campanas o perforaciones), pérdidas de carga, eficacia, tipo y pasos y un largo etcétera que se desgranará en la presente sección.

El primer aspecto que debe decidirse es el tipo de plato que se empleará. Por simplicidad de diseño, disponibilidad de ecuaciones suficientes en la bibliografía y coste económico más asequible, los platos de utilidad en este diseño serán: **Platos perforados**.

Son estos los platos de uso más extendido en el diseño de columnas de destilación y, sólo en el caso de que los requerimientos hidráulicos de los fluidos en juego superasen las prestaciones de los platos perforados, se plantearía la posibilidad de diseñar otro tipo de etapa de separación.

Dilucidado este primer aspecto se efectuará el siguiente procedimiento de cálculo:

- 
- Recopilación y conversión de datos y propiedades.
  - Determinación gráfica del número de pasos por columna.
  - Estimación de dimensiones previas.
  - Fijación de los límites de operación.
  - Cálculo reiterado de áreas de columna y otras dimensiones.
  - Verificaciones de las magnitudes calculadas con los límites de operación.
  - Estimación de las pérdidas de carga.

Se estudiará la hidráulica de la columna en tres zonas diferenciadas y para las que previamente se han estimado sus propiedades físicas:

- Plato primero o de destilado.
- Plato de alimentación.
- Plato último o de residuo.

A lo que cabe establecer el siguiente matiz. Dado que el método FUG no proporciona un perfil de composiciones a lo largo de la columna, no se tendrá en cuenta el hecho de que el último plato de columna corresponde al rehervidor o calderín, y se efectuarán los cálculos para diseño hidráulico considerando esta última etapa de equilibrio dentro de la columna. (Véase justificación en el capítulo primero).

El plato de alimentación es un punto crítico de la columna, y por ello se estudia su funcionamiento hidráulico, ya que supone la inserción de una corriente líquida a la operación, (la alimentación), lo que modifica ostensiblemente las condiciones de funcionamiento de la operación. Asimismo, se estudia el funcionamiento del plato de destilado, o primer plato de columna, que, pese a soportar *a priori* condiciones de funcionamiento más benignas que, por ejemplo, el primer plato de la sección de rectificación; es el plato que recibe el reflujo y, por ende está sometido a un choque de fluidos severo.

Dado que los platos seleccionados soportan las condiciones más exigentes, los datos arrojados por dichos puntos de operación, permitirán caracterizar las distintas zonas de columna, esto es, permitirán decidir si debe construirse la torre con distintos diámetros, además de, junto a la eficacia global; decidir si la altura final de la torre requiere segregar el tren de separación en varias columnas.

### A3.C3.3.1. Recopilación y conversión de datos y propiedades

En este primer apartado, se consignarán en tablas los valores de las propiedades involucradas en los cálculos, que se realizarán en el siguiente y sucesivos apartados. Todos estos datos han sido dados en tablas correspondientes a la sección anterior, a excepción del peso molecular promedio, para el que es de aplicación la expresión (A3.17) hasta el tercer componente; obteniéndose  $PM_L$  y  $PM_V$ , los pesos moleculares en g/mol, ponderados a sus respectivas composiciones, del líquido y el vapor.

Tomando datos de las tablas A3.CLXXVIII, A3.CLXXXVIII, A3.CLXXIII a A3.CLXXV, A3.CLXXXI, A3.CXCV y A3.CXCVII y aplicando (A3.17) sobre A3.CLXXXIX, se recopilan las siguientes tablas:

<b>Propiedades y composición del destilado</b>			
$\rho_L$ (mol/L)	11,486	$\rho_L$ (kg/m <sup>3</sup> )	625,218
$\rho_V$ (mol/L)	0,064	$\rho_V$ (kg/m <sup>3</sup> )	3,480
L (kmol/h)	3102,342	$\mu_L$ (cP)	0,158
V (kmol/h)	3815,943	$\mu_V$ (cP)	0,008
(L/V)	0,813	$\sigma$ (dyn/cm)	13,957
$x_1$	0,170	$y_1$	0,170
$x_2$	0,830	$y_2$	0,830
$x_3$	0,000	$y_3$	0,000
<b>PM (g/mol) (líquido)</b>		<b>PM (g/mol) (vapor)</b>	
54,435		54,435	

Tabla. A3.CC. Propiedades y composición de la corriente del primer plato

<b>Propiedades y composición de la corriente del plato de alimentación</b>			
$\rho_L$ (mol/L)	11,476	$\rho_L$ (kg/m <sup>3</sup> )	625,056
$\rho_V$ (mol/L)	0,060	$\rho_V$ (kg/m <sup>3</sup> )	3,268
L (kmol/h)	3830,292	$\mu_L$ (cP)	0,159
V (kmol/h)	3815,943	$\mu_V$ (cP)	0,008
(L/V)	1,004	$\sigma$ (dyn/cm)	13,982
$x_1$	0,167	$y_1$	0,184
$x_2$	0,814	$y_2$	0,800
$x_3$	0,019	$y_3$	0,015
<b>PM (g/mol) (líquido)</b>		<b>PM (g/mol) (vapor)</b>	
54,468		54,495	

Tabla. A3.CCI. Propiedades y composición de la corriente del plato de alimentación

<b>Propiedades y composición de la corriente del último plato</b>			
$\rho_L$ (mol/L)	10,952	$\rho_L$ (kg/m <sup>3</sup> )	614,057
$\rho_V$ (mol/L)	0,083	$\rho_V$ (kg/m <sup>3</sup> )	4,625
L (kmol/h)	3830,292	$\mu_L$ (cP)	0,174
V (kmol/h)	3815,943	$\mu_V$ (cP)	0,008
(L/V)	1,004	$\sigma$ (dyn/cm)	13,852
$x_1$	0,000	$y_1$	0,000
$x_2$	0,021	$y_2$	0,029
$x_3$	0,979	$y_3$	0,971
<b>M (g/mol) (líquido)</b>		<b>M (g/mol) (vapor)</b>	
56,066		56,050	

Tabla. A3.CCII. Propiedades y composición de la corriente del último plato

Las densidades en unidades SI se han obtenido multiplicando las molares por los pesos moleculares promedio.

**A3.C3.3.2. Determinación gráfica del número de pasos por columna**

La decisión del número de pasos se toma a partir de la gráfica\* mostrada en la Figura A3.1, que liga el flujo del líquido en galones estadounidenses por minuto (gpm) con el diámetro en pies de la columna. En las siguientes tablas se listan las variables convertidas a las unidades requeridas:

<b>Determinación de pasos: Plato de destilado</b>			
$Q_L$ (m <sup>3</sup> /s)	0,075	$Q_L$ (gal (US)/min)	1189,256
T (m)	8,5	T (ft)	27,887
<b>Nº de pasos (p)</b>		<b>2</b>	

Tabla. A3.CCIII. Determinación de los pasos en la zona de rectificación

<b>Determinación de pasos: Plato de alimentación</b>			
$Q_L$ (m <sup>3</sup> /s)	0,093	$Q_L$ (gal (US)/min)	1469,557
T (m)	9	T (ft)	29,528
<b>Nº de pasos (p)</b>		<b>3</b>	

Tabla. A3.CCIV. Determinación de los pasos por el plato de alimentación

<b>Determinación de pasos: Plato de residuo</b>			
$Q_L$ (m <sup>3</sup> /s)	0,097	$Q_L$ (gal (US)/min)	1539,790
T (m)	8,5	T (ft)	27,887
<b>Nº de pasos (p)</b>		<b>3</b>	

Tabla. A3.CCV. Determinación de los pasos por el plato de residuo

Donde el caudal de líquido,  $Q_L$ , se ha transformado de términos molares, como venía dado en las tablas A3.CC a A3.CCII, a términos volumétricos teniendo en cuenta (A3.18.1). El diámetro de columna se ha tomado de la reiteración del cálculo de áreas, que se mostrará en apartados ulteriores.

Finalmente, el número de pasos se ha decidido según la gráfica de la Figura A3.1, aplicando los datos de las tres tablas precedentes.

\* Operaciones de separación por etapas de equilibrio en Ingeniería Química. E. J. Henley, H. D. Seader. Reverté, año 2000.

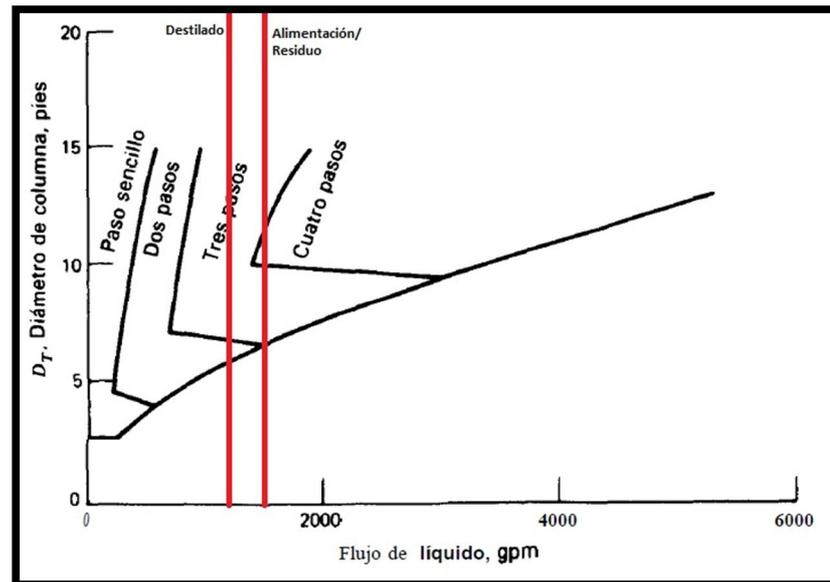


Figura. A3.19. Estimación del número de pasos según recomendaciones de la Koch Engineering Company. (E. J. Henley, J. D. Seader, 1999)

Se observa que la estimación queda fuera de escala a causa del elevado diámetro requerido. No obstante, dado que la Figura A3.19 permite efectuar una aproximación al número de pasos, se han tomado estos por extrapolación, ya que la comprobación rigurosa del funcionamiento de columna se verifica en próximos apartados.

#### A3.C3.3.3. Estimación de dimensiones previas

Como se especificó al inicio de la presente sección, los platos seleccionados para el desempeño de la operación en cuestión, son platos perforados. Las dimensiones previas requeridas para el cálculo de las distintas áreas y pérdidas de carga son las que siguen:

- Diámetro de las perforaciones, ( $d_0$ ).
- Separación y distribución de las perforaciones: pitch, ( $p'$ ).
- Razón de espesor del plato a diámetro de orificio, ( $e/d_0$ ).
- Espaciado entre platos, ( $t$ ).
- Razón de área de perforaciones a área activa, ( $A_0/A_a$ ).

Según artículos de investigación consultados\*, está probado que para un diámetro de perforaciones menor se tiene una buena mezcla entre fases mejorándose de esta forma la separación. De esta forma y atendiendo a la Figura A3.2, considerando que el material seleccionado es acero al carbono, (por los motivos que se argumentarán en los capítulos de diseño mecánico), el menor diámetro para el que se dispone de razón  $e/d_0$  es de 9 mm, siendo éste, por consiguiente el diámetro seleccionado.

La relación  $e/d_0$  correspondiente es 0,50.

Con el diámetro de las perforaciones decidido, debe plantearse cuál es la distribución oportuna de las mismas. Según criterios de diseño de torres de platos consultadas en el libro de *Treybal*, tal distribución corresponde a aquella donde las perforaciones se colocan en los vértices de triángulos equiláteros, disposición ésta denominada al tresbolillo, que se logra perforando el área activa del plato en filas de orificios equidistantes, que estarán desfasadas, una a una, media distancia entre orificios, de modo que coincidan las filas alternas.

Usualmente, la distancia entre centros de orificios, también conocida como pitch, ( $p'$ ), debe estar comprendida entre 2,5 y 5 veces el diámetro de los mismos. Como valor intermedio, se tomará 4 veces el diámetro de orificio, como se indicó en (A3.19). Se tiene:

$$p' = 4 \cdot 9 = 36 \text{ mm}$$

El espaciado entre platos es uno de los parámetros económicos de mayor peso en la toma de decisiones vinculada al diseño de las columnas de platos. Un espaciado elevado aumenta la altura de la unidad de separación, si bien mejora las condiciones de flujo, lo que se traduce en una disminución del diámetro de la columna. A la sazón, atendiendo a la bibliografía, se dispone de la tabla dada por la Figura A3.3.

\* Simulación del comportamiento hidráulico en platos perforados para la destilación de mezclas binarias mediante CFD. M. A. Rodríguez-Ángeles, A. R. Uribe Ramírez. Revista Enlace Químico, n° 10, marzo 2008.

Para el diámetro mínimo, (correspondiente a la zona de agotamiento), tomado de la tabla A3.CCV, el espaciado requerido es el máximo, de 0,90 m. Éste será por tanto el espaciado entre platos para toda la columna.

Por último, para una disposición al tresbolillo, la bibliografía, (libro de *Treybal*), recomienda para la razón área de orificios a área activa la expresión (A3.20), cuya aplicación, sobre y con los datos ya presentados en este apartado, se presentó en la Tabla A3.XXXVII, válida para el caso presente:

Dimensiones previas			
$d_0$ (mm)	9	$p'$ (mm)	36
$e/d_0$	0,5	$t$ (m)	0,9
	$A_0/A_a$	0,057	

Tabla A3.XXXVII. Dimensiones previas para las distintas zonas de columna

#### A3.C3.3.4. Fijación de los límites de operación

En este apartado se determinará el límite superior de la velocidad del vapor, ya que la velocidad mínima, también conocida como velocidad de lloriqueo, precisa de ciertos datos aún no dilucidados, lo que obliga a posponer su cálculo a posteriores apartados.

La velocidad de inundación, límite superior para el flujo del vapor, viene dada a partir de las expresiones\* (A3.21) a (A3.22).

Éstas requieren datos de tensión superficial, (en unidades SI, N/m), densidades de líquido y vapor y sus caudales, razón de área de perforaciones a área activa y espaciado de platos. Tales datos, se encuentran en las tablas A3.XXXVII y A3.CC a A3.CCII. Aplicando (A3.22.2), (A3.22.3), (A3.22.4), (A3.22.1) y (A3.21) sucesivamente, se obtiene el límite superior de flujo:

\* Tomadas del libro "Operaciones de transferencia de masa". R. E. *Treybal*. McGraw-Hill. 2ª Edición.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Límite superior de operación: Zona de rectificación			
PF	0,061	$\alpha$ (m)	0,062
	<b>0,1</b>	$\beta$ (m)	0,033
$C_F$ (m/s)	0,036	$v_F$ (m/s)	<b>0,482</b>
% permisible $v_F$	78	$v$ (m/s)	<b>0,376</b>

Tabla. A3.CCVI. Límite superior de operación para la zona de rectificación

Límite superior de operación: Plato de alimentación			
PF	0,073	$\alpha$ (m)	0,062
	<b>0,1</b>	$\beta$ (m)	0,033
$C_F$ (m/s)	0,036	$v_F$ (m/s)	<b>0,497</b>
% permisible $v_F$	78	$v$ (m/s)	<b>0,388</b>

Tabla. A3.CCVII. Límite superior de operación para el plato de alimentación

Límite superior de operación: Zona de agotamiento			
PF	0,087	$\alpha$ (m)	0,062
	<b>0,1</b>	$\beta$ (m)	0,033
$C_F$ (m/s)	0,037	$v_F$ (m/s)	<b>0,421</b>
% permisible $v_F$	78	$v$ (m/s)	<b>0,329</b>

Tabla. A3.CCVIII. Límite superior de operación para la zona de agotamiento

Debe señalarse que en este capítulo se está a las matizaciones que fueron referidas en el primero sobre aspectos tales como: valor final del parámetro de flujo, corrección de los coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$  y velocidad permitida del vapor según la expresión (A3.23).

### A3.C3.3.5. Cálculo reiterado de áreas de columna y otras dimensiones

La descripción de los platos empleados en cada zona requiere el cálculo de las distintas áreas que se enumeran a continuación.

- Área total o de plato, ( $A_t$ ).
- Área de vertederos, ( $A_v$ ).
- Área neta, ( $A_n$ ).
- Área activa o de burbujeo, ( $A_a$ ).
- Área de vigas, ( $A_{vig}$ ).

- Área de perforaciones, ( $A_0$ ).

Todas ellas han sido empleadas anteriormente por lo que se omite la descripción en detalle y se presenta el procedimiento de cálculo.

- Se halla el caudal de vapor en cada región de columna, empleando los datos consignados en las tablas A3.CC a A3.CCII y aplicando (A3.18.2). (Será necesario convertir a unidades SI).
- Se calcula el área neta en una primera aproximación teniendo en cuenta (A3.30), con  $Q_v$  el caudal de vapor en  $m^3/s$  y  $v$ , la velocidad admisible del vapor en  $m/s$ , tomada de las tablas A3.CCVI a A3.CCVIII.
- Se seleccionan las relaciones  $W/T$  y  $x/T$  de la Figura A3.6.
- Se calcula la razón  $A_v/A_t$  empleando la expresión, tomada del libro de *Treybal*, (A3.31).
- Se determina el área de torre por aplicación de (A3.32).
- Con el área de la torre disponible, puede hallarse el diámetro según (A3.33).
- En función del diámetro obtenido, se selecciona el valor comercial que se requerirá: el menor posible que verifique las comprobaciones hidráulicas y de pérdidas de carga que se presentan en apartados ulteriores.

El procedimiento descrito se recoge en las siguientes tablas para cada zona de columna.

Cálculo previo: Zona de rectificación			
$Q_v (m^3/s)$	16,583	$A_n (m^2)$	44,137
$W/T$	0,7	$A_v/A_t$	0,088
$x/T$	0,3562	$A_t (m^2)$	53,525
$T (m)$	8,255	$T (m)$	8,5

Tabla. A3.CCIX. Cálculo previo de áreas para la zona de rectificación

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

<b>Cálculo previo: Plato de alimentación</b>			
$Q_v$ (m <sup>3</sup> /s)	17,678	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	<b>45,569</b>
$W/T$	0,7	$A_v/A_t$	0,088
$x/T$	0,3562	$A_t$ (m <sup>2</sup> )	<b>61,837</b>
$T$ (m)	<b>8,873</b>	$T$ (m)	<b>9</b>

Tabla. A3.CCX. Cálculo previo de áreas para el plato de alimentación

<b>Cálculo previo: Zona de agotamiento</b>			
$Q_v$ (m <sup>3</sup> /s)	12,846	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	<b>39,095</b>
$W/T$	0,7	$A_v/A_t$	0,088
$x/T$	0,3562	$A_t$ (m <sup>2</sup> )	<b>53,052</b>
$T$ (m)	<b>8,219</b>	$T$ (m)	<b>8,5</b>

Tabla. A3.CCXI. Cálculo previo de áreas para la zona de agotamiento

Una vez decidido el diámetro de columna, debe reiterarse el cálculo del área total y neta, así como determinarse las distintas dimensiones detalladas en este apartado. El procedimiento es el siguiente:

- Se recalcula el área total empleando los diámetros  $T$  seleccionados, dados en las tablas A3.CCX a A3.CCXI, y aplicando (A3.24).
- Se determina el área de vertederos multiplicando el área total recalculada por la relación  $A_v/A_t$ , dada en las mismas tablas del guión anterior.
- Se recalcula el área neta por aplicación de (A3.25) y empleando los datos calculados en los guiones anteriores y el número de pasos según tablas A3.CCIII a A3.CCV.
- Se determina el área activa aplicando (A3.26) a los datos recalculados y al número de pasos.
- Se determina el área de las vigas por aplicación de (A3.27) a los datos obtenidos en estos guiones.
- Se determina el área de las perforaciones multiplicando el área activa, recién calculada, por la razón de área de perforaciones a área activa recogida en la Tabla A3.XXXVII.

- Se obtiene W, multiplicando la relación W/T seleccionada por el diámetro T comercial. Los datos se encuentran en las tablas A3.CCIX a A3.CCXI.
- Se obtiene x, de forma similar, multiplicando la relación x/T seleccionada por el diámetro T comercial. Los datos se encuentran de nuevo en las tablas A3.CCIX a A3.CCXI.
- Se obtiene Z, aplicando (A3.28) a los datos dilucidados en los dos guiones anteriores, según el número de pasos.
- Se obtiene e, multiplicando el diámetro de orificio consignado en la Tabla A3.XXXVII por la razón de espesor de plato a diámetro de orificio, dada en la misma tabla.
- Se obtiene o, por aplicación de (A3.29) a los datos de guiones anteriores.

Los resultados obtenidos al seguir el procedimiento anterior se consignan en las siguientes tablas:

<b>Áreas y otras dimensiones: Zona de rectificación</b>			
$A_t$ (m <sup>2</sup> )	<b>56,745</b>	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	<b>46,793</b>
$A_v$ (m <sup>2</sup> )	<b>4,976</b>	$A_a$ (m <sup>2</sup> )	<b>33,305</b>
$A_{vig}$ (m <sup>2</sup> )	<b>13,488</b>	$A_o$ (m <sup>2</sup> )	<b>1,888</b>
W (m)	<b>5,95</b>	x (m)	<b>3,0277</b>
Z (m)	<b>4,8331</b>	e (m)	<b>0,0045</b>
	<b>o</b>	<b>29677</b>	

Tabla. A3.CCXII. Cálculo de áreas y dimensiones para la zona de rectificación

<b>Áreas y otras dimensiones: Plato de alimentación</b>			
$A_t$ (m <sup>2</sup> )	<b>63,617</b>	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	<b>46,881</b>
$A_v$ (m <sup>2</sup> )	<b>5,579</b>	$A_a$ (m <sup>2</sup> )	<b>31,759</b>
$A_{vig}$ (m <sup>2</sup> )	<b>15,121</b>	$A_o$ (m <sup>2</sup> )	<b>1,800</b>
W (m)	<b>6,3</b>	x (m)	<b>3,2058</b>
Z (m)	<b>3,8232</b>	e (m)	<b>0,0045</b>
	<b>o</b>	<b>28300</b>	

Tabla. A3.CCXIII. Cálculo de áreas y dimensiones para el plato de alimentación

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Áreas y otras dimensiones: Zona de agotamiento			
$A_t$ (m <sup>2</sup> )	56,745	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	41,816
$A_v$ (m <sup>2</sup> )	4,976	$A_a$ (m <sup>2</sup> )	28,329
$A_{vig}$ (m <sup>2</sup> )	13,488	$A_o$ (m <sup>2</sup> )	1,606
$W$ (m)	5,95	$x$ (m)	3,0277
$Z$ (m)	3,611	$e$ (m)	0,0045
	o	25243	

Tabla. A3.CCXIV. Cálculo de áreas y dimensiones para la zona de agotamiento

### A3.C3.3.6. Verificaciones de las magnitudes calculadas con los límites de operación

Con la columna dimensionada, esto es, determinados en apartados precedentes tanto el diámetro de columna, como las distintas dimensiones de los platos y el espaciado de los mismos, se hace preciso constatar si el funcionamiento hidráulico es acorde a los límites fijados.

A este fin se dedica el presente apartado donde se realizarán las siguientes verificaciones:

- Verificación de inundación.
- Verificación de derrame o lloriqueo.
- Verificación de descarga.
- Verificación de arrastre fraccional.
- Verificación de máxima carga en vertederos.

Una vez se ha detallado en el capítulo primero el fundamento teórico de las verificaciones de rigor, se practican los cálculos pertinentes y se comprueba que se satisfacen las condiciones descritas. A este fin se sigue el procedimiento que se presenta a renglón seguido.

- Se calculan las distintas magnitudes requeridas:  $v_v$ , aplicando (A3.34) sobre los datos dados en las tablas A3.CCXIX a A3.CCXI y A3.CCXII a A3.CCXIV;  $v_{vm}$  y  $v_o$ , aplicando, res-

pectivamente, (A3.35) y (A3.36) a los datos en A3.CC a A3.CCII, A3.XXXVII y A3.CCXII a A3.CCXIV, ( $g_c$  se toma como la unidad al trabajar en unidades SI);  $v_{Lv}$  aplicando (A3.37) a los datos proporcionados por A3.CCIII a A3.CCV y A3.CCXII a A3.CCXIV; y  $Q_{Lv}$ , aplicando (A3.38) a los datos en las mismas tablas que  $v_{Lv}$ .

- Se cotejan las magnitudes recién obtenidas con los valores de las variables límite consignadas en el apartado homólogo al actual del primer capítulo:  $v_v$  menor que  $v$ ,  $v_{vm}$  menor que  $v_0$ ,  $v_{Lv}$  menor que 0,12 m/s,  $Q_{Lv}$  menor que 0,030 m<sup>3</sup>/m·s.
- Se verifica gráficamente que el arrastre fraccional es inferior al 10%, para la curva de velocidad permitida del 78%. En este caso, para las tres zonas, se verifica la curva mostrada en la Figura A3.7 de “Destilado” y “Alimentación”, a tenor de los parámetros de flujo encontrados para la presente operación y tabulados en A3.CCVI a A3.CCVIII.

Se aplica este procedimiento a las distintas zonas de columna y se decide si el proceso de cálculo ha sido correcto hasta el presente punto.

Verificaciones: Zona de rectificación					
Inundación	$v_v$ (m/s)	0,354	$v$ (m/s)	0,376	Verificado
Lloriqueo	$v_{vm}$ (m/s)	0,788	$v_0$ (m/s)	8,783	Verificado
Descarga	$v_{Lv}$ (m/s)	0,015	Arrastre fraccional	0,026	Verificados
Máx. carga en vertedero	$Q_{Lv}$ (m <sup>3</sup> /m·s)		0,013	Verificado	

Tabla. A3.CCXV. Verificaciones para la zona de rectificación

Verificaciones: Plato de alimentación					
Inundación	$v_v$ (m/s)	0,377	$v$ (m/s)	0,388	Verificado
Lloriqueo	$v_{vm}$ (m/s)	0,867	$v_0$ (m/s)	9,819	Verificado
Descarga	$v_{Lv}$ (m/s)	0,017	Arrastre fraccional	0,026	Verificados
Máx. carga en vertedero	$Q_{Lv}$ (m <sup>3</sup> /m·s)		0,015	Verificado	

Tabla. A3.CCXVI. Verificaciones para el plato de alimentación

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Verificaciones: Zona de agotamiento					
Inundación	$v_v$ (m/s)	0,307	$v$ (m/s)	0,329	Verificado
Lloriqueo	$v_{vm}$ (m/s)	0,663	$v_0$ (m/s)	8,000	Verificado
Descarga	$v_{Lv}$ (m/s)	0,020	Arrastre fraccional	0,026	Verificados
Máx. carga en vertedero	$Q_{Lv}$ (m <sup>3</sup> /m-s)			0,016	Verificado

Tabla. A3.CCXVII. Verificaciones para la zona de agotamiento

Dado que todas las verificaciones se han satisfecho, puede procederse a calcular el último y no menos trascendente aspecto del diseño hidráulico: las pérdidas de carga por plato.

### A3.C3.3.7. Estimación de las pérdidas de carga

Debido a la caída de presión que experimenta el líquido a su paso por el plato, motivada por los diferentes niveles de éste en el plato y el vertedero, es de esperar un cierto retroceso de líquido que, de estimarse excesivo, podría comprometer el adecuado funcionamiento hidráulico de la columna.

Un diseño seguro implica que la suma de alturas de líquido no supere la mitad del espaciado entre platos, como se muestra en la desigualdad (A3.54).

Se presenta el procedimiento de cálculos:

- Cálculo de  $h_w$ : Se aplica (A3.40) al espaciado de platos dado en la tabla A3.XXXVII.
- Cálculo de  $h_c$ : Se aplica el siguiente ciclo iterativo:
  - o Suponer un valor inicial para  $h_c$
  - o Calcular  $W_{ef}/W$  aplicando (A3.43), haciendo uso de los datos dados en las tablas A3.CCIX a A3.CCXI y el valor de  $h_c$  supuesto.
  - o Se introduce  $W/W_{ef}$  supuesto en base a  $h_c$  inicial en (A3.42), junto con el caudal de líquido dado en las tablas A3.CCIII a A3.CCV. Se obtiene  $h_c$  calculado.

- Se cotejan los valores de  $h_c$  calculado con  $h_c$  inicial y caso de coincidir razonablemente, se ha dilucidado  $h_c$ . Caso contrario se empleará  $h_c$  calculado sucesivamente tal como se indica desde el punto segundo, hasta alcanzar la convergencia.
- Cálculo de  $h_B$ : Precisa el cálculo de  $h_{VAP}$  y  $h_E$ . A su vez,  $h_{VAP}$  comprende  $h_D$ ,  $h_L$  y  $h_R$ . Una vez calculados todos, como se indica a continuación, se aplica (A3.45).
  - Cálculo de  $h_D$ : Se obtienen  $Re_o$  y  $f$ , aplicando (A3.47.3) y haciendo uso de la Figura A3.20. Los datos para ello, vienen dados en las tablas A3.CC a A3.CCII, A3.CCXV a A3.CCXVII y A3.XXXVII. Obtenido  $f$ , se calcula  $C_o$ , aplicando (A3.47.2) a datos de A3.XXXVII. Con lo anterior, (A3.47.1) y los datos dados en las tablas A3.CC a A3.CCII, A3.XXXVII y A3.CCXII a A3.CCXIV; se aplica (A3.46).
  - Cálculo de  $h_L$ : Se aplica (A3.49.1) y (A3.49.2) a los datos dados en las tablas A3.CCIX a A3.CCXIV. Con esto,  $h_w$  calculado en el primer guión y los datos dados en las tablas A3.CC a A3.CCV, se aplica (A3.48).
  - Cálculo de  $h_R$ : Se aplica (A3.50) a los datos (A3.47.1) y los consignados en las tablas A3.CC a A3.CCII y A3.XXXVII. Al trabajar en unidades SI,  $g_c$  adquiere valor unitario.
  - Cálculo de  $h_E$ : Debe decidirse el valor de  $A_{da}$ . Se aplica (A3.52) a  $h_w$  y a  $W$  dada en las tablas A3.CCXII a A3.CCXIV. Se decide según (A3.53), atendiendo a  $A_v$ , dada en las mismas tablas. Se aplica (A3.51) a  $g$  dada en (A3.47.1), al caudal de líquido dado en las tablas A3.CCIII a A3.CCV y a  $A_{da}$  dilucidada.
- Se verifica (A3.54).

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

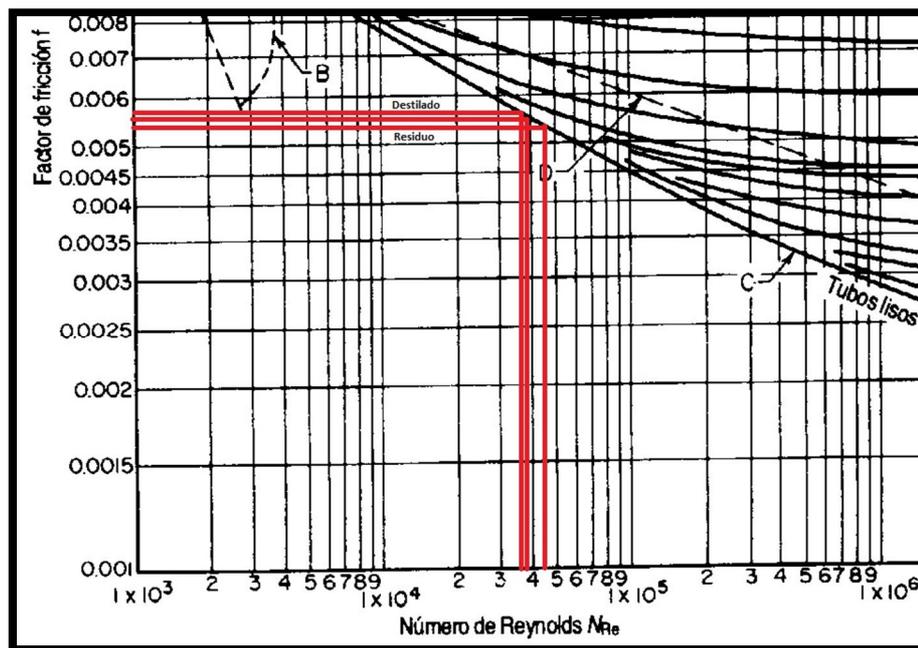


Figura. A3.20. Gráfico de *Moody*.

(Manual del Ingeniero Químico. *R. H. Perry, D. W. Green, J. O. Maloney, 6ª Edición*)

Las siguientes tablas muestran los resultados derivados de la aplicación del procedimiento.

Pérdidas de carga: Zona de rectificación			
$h_w$ (m)	0,09	$W_{ef}/W$	0,987
	$h_{ccalc}$ (m)	0,036	
$C_0$	1,296	$v_0$ (m/s)	8,783
$Re_0$	$3,58 \cdot 10^4$	$f$	0,0058
$4f$	0,0232	$h_D$ (m)	0,060
$v_a$ (m/s)	0,498	$z$ (m)	7,225
$h_L$ (m)	0,064	$h_R$ (m)	0,002
$A_L$ (m <sup>2</sup> )	0,387	$g$ (m/s <sup>2</sup> )	9,80665
$A_{da}$ (m <sup>2</sup> )	0,387	$h_E$ (m)	0,006
$h_{VAP}$ (m)	0,126	$h_B$ (m)	0,132
$\Delta$	0	Pérdidas (m)	0,258
<b>Verificado</b>			

Tabla. A3.CCXVIII. Verificación de pérdidas de carga. Zona de rectificación

<b>Pérdidas de carga: Plato de alimentación</b>			
$h_w$ (m)	<b>0,09</b>	$W_{ef}/W$	0,987
	$h_{ccalc}$ (m)	<b>0,040</b>	
$C_0$	1,296	$v_0$ (m/s)	13,534
$Re_0$	$3,76 \cdot 10^4$	$f$	0,0057
$4f$	0,0228	$h_D$ (m)	<b>0,071</b>
$v_a$ (m/s)	0,557	$z$ (m)	7,65
$h_L$ (m)	<b>0,065</b>	$h_R$ (m)	<b>0,002</b>
$A_L$ (m <sup>2</sup> )	0,410	$g$ (m/s <sup>2</sup> )	<b>9,80665</b>
$A_{da}$ (m <sup>2</sup> )	0,410	$h_E$ (m)	<b>0,008</b>
$h_{VAP}$ (m)	<b>0,137</b>	$h_B$ (m)	<b>0,145</b>
$\Delta$	<b>0</b>	Pérdidas (m)	<b>0,275</b>
<b>Verificado</b>			

Tabla. A3.CCXIX. Verificación de pérdidas de carga. Plato de alimentación

<b>Pérdidas de carga: Zona de agotamiento</b>			
$h_w$ (m)	<b>0,09</b>	$W_{ef}/W$	0,985
	$h_{ccalc}$ (m)	<b>0,043</b>	
$C_0$	1,296	$v_0$ (m/s)	8,000
$Re_0$	$4,32 \cdot 10^4$	$f$	0,0055
$4f$	0,022	$h_D$ (m)	<b>0,068</b>
$v_a$ (m/s)	0,453	$z$ (m)	7,225
$h_L$ (m)	<b>0,067</b>	$h_R$ (m)	<b>0,002</b>
$A_L$ (m <sup>2</sup> )	0,387	$g$ (m/s <sup>2</sup> )	<b>9,80665</b>
$A_{da}$ (m <sup>2</sup> )	0,387	$h_E$ (m)	<b>0,010</b>
$h_{VAP}$ (m)	<b>0,136</b>	$h_B$ (m)	<b>0,146</b>
$\Delta$	<b>0</b>	Pérdidas (m)	<b>0,279</b>
<b>Verificado</b>			

Tabla. A3.CCXX. Verificación de pérdidas de carga. Zona de agotamiento

El nivel de la cresta del líquido sobre el vertedero,  $h_c$ , que se ha proporcionado, coincide con el valor del último  $h_c$  supuesto, a su vez coincidente con el calculado hasta la diezmillonésima.

La suma de las pérdidas, dada por (A3.54), no debe superar la mitad del espaciado asumido, a la sazón, 0,45 m. Se comprueba que no sucede en ninguna región de columna, de donde se concluye que el diseño hidráulico es el adecuado a los requerimientos.

#### **A3.C3.4. Decisiones finales de diseño hidráulico**

A lo largo de este anexo de cálculo, se ha caracterizado el flujo de líquido y vapor a través de la operación “MÚLTIPLE”: se ha balanceado la unidad, determinado propiedades de corrientes, dimensionado columna y platos y verificado su funcionamiento hidráulico y pérdidas de carga.

Se hace precisa una última sección que determine aspectos fundamentales de construcción de la unidad, tales como el número real de platos, la diferenciación, si procede, de diámetros según zonas de la columna, la posición del plato de alimentación, altura, etc.

Estas decisiones finales no pueden acometerse sin conocerse la eficacia de la separación, que permitirá discriminar entre platos ideales calculados según el método FUG, en los capítulos correspondientes; y los platos reales requeridos.

Se dividirá esta sección final del capítulo en tres apartados:

- Determinación de eficacia por zonas.
- Evaluación de alternativas.
- Decisión final de columna.

##### **A3.C3.4.1. Determinación de eficacia por zonas**

Como se indicó en el apartado homólogo del capítulo primero, se realizarán varias estimaciones de la eficacia de la columna, de modo que pueda compararse la validez de los métodos empleados. Se estimará la eficacia global según el método gráfico de *O’Connell* y también se diferenciará por zonas, haciendo uso de la correlación de *Van Winkle et al.* Finalmente, se corregirá la más baja de las efica-

cias según la tabla de *Lockhart* y *Leggett*, que afinan la predicción conservadora del primer autor.

Para el cálculo de la eficacia global, es de aplicación el ajuste mostrado en (A3.56), para el que se precisarán datos promediados de viscosidad y volatilidad relativa. La segunda se estima, siguiendo indicaciones del capítulo primero, mediante la expresión (A3.57) y los datos consignados en las tablas A3.CLXXIV a A3.CLXXV. La primera se promedia entre cabeza y cola, (o destilado y residuo si se prefiere), de la Tabla A3.CLXXXI. Así, se obtiene:

Estimación de la eficacia global			
$\alpha_{\text{cabeza}}$	1	$\alpha_{\text{cola}}$	1,394
$\mu_{L, \text{cabeza}} \text{ (cP)}$	0,158	$\mu_{L, \text{cola}} \text{ (cP)}$	0,174
$\langle \alpha \mu \rangle \text{ (cP)}$	0,200	$E_o \text{ (%)}$	<b>73,7</b>

Tabla. A3.CCXXI. Eficacia global de columna. Ajuste de *Eduljee*

La correlación\* de *Van Winkle et al.*, para estimación de la eficacia de plato, es una ecuación potencial de módulos adimensionales que ligan distintas variables asociadas al diseño de platos. Se presentó en (A3.58). Su aplicación requiere las ecuaciones (A3.59).

El cálculo de los grupos adimensionales de la anterior expresión precisa los siguientes datos:

- (A3.59.1): Aplicación de (A3.59.4) tomando datos de las tablas A3.CCIX a A3.CCXIV.
- (A3.59.2): Requiere datos de las tablas A3.CC a A3.CCII y A3.CXCIX.
- (A3.59.3): Aplicación de (A3.59.5), tomando datos de las tablas A3.CCXII a A3.CCXIV. Una vez determinada (FA), se requerirán además datos de las tablas A3.CC a A3.CCII y A3.CCXVIII a A3.CCXX, así como  $u_v$  del primer guión.

\* Véase libro de *Towler*.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Resuelto lo anterior, puede aplicarse (A3.58) y obtenerse las eficacias para los platos críticos de la columna: primer plato, o de destilado, plato de alimentación y último plato, o de residuo. Los resultados se consignan en las siguientes tablas:

<b>Estimación de la eficacia del plato primero</b>			
Dg	301,493	$u_v$ (m/s)	0,292
Sc	70,243	FA	0,033
Re	17364,274	E	0,984

Tabla. A3.CCXXII. Estimación de la eficacia del plato primero

<b>Estimación de la eficacia del plato de alimentación</b>			
Dg	317,149	$u_v$ (m/s)	0,278
Sc	67,362	FA	0,028
Re	18201,131	E	0,984

Tabla. A3.CCXXIII. Estimación de la eficacia del plato de alimentación

<b>Estimación de la eficacia del último plato</b>			
Dg	352,314	$u_v$ (m/s)	0,226
Sc	34,758	FA	0,028
Re	19172,161	E	0,850

Tabla. A3.CCXXIV. Estimación de la eficacia del último plato

Como puede observarse, las eficacias de dichos platos críticos oscilan entre el 95%. La eficacia más baja corresponde a la zona de agotamiento, representada por el último plato de columna. Esto es debido a la resistencia creciente a la separación a medida que la mezcla elimina mayor cantidad de ligeros. En la separación que se produce en "MÚLTIPLE", el clave pesado presenta una volatilidad bastante menor que el clave y el no clave ligeros: a medida que la mezcla se hace muy rica en el clave pesado, la eficacia de la separación disminuye. En la zona de rectificación la eficacia es prácticamente del 100%, puesto que la más mínima cuantía de clave pesado que haya sido arrastrada, tiende a escindir de la mezcla prestando escasa resistencia.

Para concluir el primer apartado, se corregirá la predicción de la eficacia global, según la tabla de *Lockhart y Leggett*. La condición para esta corrección es que el producto promediado de la volatilidad relativa y la viscosidad esté comprendido entre 0,1 y 1 cP, como es el caso. La tabla de corrección se incluyó en el capítulo primero bajo la denominación A3.LVII, por lo que se omite en el actual. Procediendo como en el citado primer capítulo se obtiene, para cada zona:

Corrección para rectificación		Corrección para agotamiento	
Z (m)	4,833	Z (m)	3,823
Z (ft)	15,857	Z (ft)	12,543
FI (%)	27,000	FI (%)	26,017
<b>E<sub>o</sub>, corregida (%)</b>	<b>93,6</b>	<b>E<sub>o</sub>, corregida (%)</b>	<b>92,9</b>

Tabla. A3.CCXXV. Correcciones para las zonas de columna

Donde se ha tomado Z de las tablas A3.CCXII a A3.CCXIV. El factor de incremento se ha interpolado linealmente de la tabla A3.LVII y la corrección final se ha practicado sobre la eficacia global de *O'Connell*, que se ha tomado como la dada por el ajuste de *Eduljee*, a la sazón la más baja de las predicciones; en la Tabla A3.CCXXI, como queda explicado.

La corrección se ha practicado, para cada zona, según la expresión (A3.60) que ha requerido la eficacia global mínima, mencionada en el párrafo anterior, y los factores de incremento, de la misma tabla donde figuran las eficacias globales corregidas, Tabla. A3.CCXXV.

Las eficacias estimadas son considerablemente elevadas. Tras contrastar el funcionamiento de otras plantas similares a la proyectada, se constata que, pese al aluvión de inconvenientes derivados del proceso de purificación que intitula el PFC, cuando menos la eficacia de separación estimada se ajusta a valores operativos reales.

### A3.C3.4.2. Evaluación de alternativas

A la luz de los diámetros requeridos por las secciones de columna, (8,5 m para rectificación y 9 m para agotamiento), se decide en este apartado invertir el orden respecto al capítulo primero: en este punto procedería efectuar los cálculos finales para el escenario mostrado, si bien, puesto que la operación resultaría económica y logísticamente inviable, dado que, aun no superando los 10 m de diámetro, se están manejando dimensiones bastante elevadas; se hace preciso evaluar una alternativa factible.

El problema de los diámetros estriba en unos caudales de líquido y vapor demasiado elevados. Ello obliga a segregar la alimentación en dos corrientes, de modo que, al disminuir el caudal alimentado, el diámetro de las columnas requeridas sea asumible desde el punto de vista constructivo.

Un divisor de corrientes sólo introduce variación en los distintos caudales, (que, al reducirse a la mitad, exigen replantear el balance de materia), sin alterar la composición de las corrientes. De aquí se deduce que las propiedades estimadas en la sección segunda de este capítulo permanecen inalteradas. Por tanto se reharán los cálculos desde el apartado A3.C3.3.1 hasta obtener una tabla compilatoria para la decisión final.

En primer lugar, procede recalcular las corrientes por actualización del balance de materia. Dado que la alimentación se ha dividido en dos corrientes, así, los caudales se reducen a la mitad y el balance de materia, para una columna resulta:

<b>Balance de materia. Caso 2</b>					
<b>E (kmol/h)</b>	<b>363,975</b>	<b>G (kmol/h)</b>	<b>356,801</b>	<b>Y (kmol/h)</b>	<b>7,175</b>
<b>L (kmol/h)</b>	<b>1551,171</b>	<b>V (kmol/h)</b>	<b>1907,971</b>		
<b>L' (kmol/h)</b>	<b>1915,146</b>	<b>V' (kmol/h)</b>	<b>1907,971</b>		

Tabla. A3.CCXXVI. Caudales de las corrientes de "MÚLTIPLE". Caso 2

Se ha decidido denominar estos datos como pertenecientes al “caso 2”, al objeto de distinguirlos de aquellos ligados a la alimentación sin dividir. La Tabla A3.CCXXVI se ha obtenido dividiendo por la mitad los datos de A3.CLXXIII.

A continuación se rehacen las tablas A3.CC a A3.CCII incluyendo sólo los datos que difieren del caso anterior:

Propiedades del destilado		Propiedades del plato de alimentación		Propiedades del residuo	
<b>L (kmol/h)</b>	1551,171	<b>L' (kmol/h)</b>	1915,146	<b>L' (kmol/h)</b>	1915,146
<b>V (kmol/h)</b>	1907,971	<b>V' (kmol/h)</b>	1907,971	<b>V' (kmol/h)</b>	1907,971
<b>(L/V)</b>	0,813	<b>(L/V)</b>	1,004	<b>(L/V)</b>	1,004

Tabla. A3.CCXXVII. Propiedades de las distintas corrientes. Caso 2

Todos los datos que figuran en aquéllas y no en ésta última son coincidentes: composiciones y propiedades, tal queda advertido más atrás.

Seguidamente se recalcula el número de pasos por plato, aplicando el procedimiento señalado en el apartado A3.C3.3.2. Lo que requerirá la aplicación de la ecuación (A3.18) a la obtención de los caudales volumétricos de líquido y vapor, en cada uno de los platos. Tomando como datos las densidades indicadas en las tablas A3.CC a A3.CCII, válidas para el caso 2, los caudales de la Tabla A3.CCXXVII y el diámetro de la reiteración del cálculo de áreas, que se mostrará posteriormente para este segundo caso; cambiando convenientemente unidades se obtiene:

Determinación de pasos: Plato de destilado			
<b>Q<sub>L</sub> (m<sup>3</sup>/s)</b>	0,038	<b>Q<sub>L</sub> (gal (US)/min)</b>	594,628
<b>T (m)</b>	6	<b>T (ft)</b>	19,685
	<b>Nº de pasos (p)</b>		<b>1</b>

Tabla. A3.CCXXVIII. Determinación de pasos en zona de rectificación. Caso 2

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Determinación de pasos: Plato de alimentación			
$Q_L$ (m <sup>3</sup> /s)	0,046	$Q_L$ (gal (US)/min)	734,779
T (m)	6	T (ft)	19,685
Nº de pasos (p)		1	

Tabla. A3.CCXXIX. Determinación de pasos en el plato de alimentación. Caso 2

Determinación de pasos: Plato de residuo			
$Q_L$ (m <sup>3</sup> /s)	0,049	$Q_L$ (gal (US)/min)	769,895
T (m)	5,5	T (ft)	18,045
Nº de pasos (p)		1	

Tabla. A3.CCXXX. Determinación de pasos en zona de agotamiento. Caso 2

Los pasos se han estimado a partir del gráfico de la Figura A3.1, aplicando en esta ocasión los datos recién tabulados. Como justificación de dicha estimación, se presenta la figura siguiente:

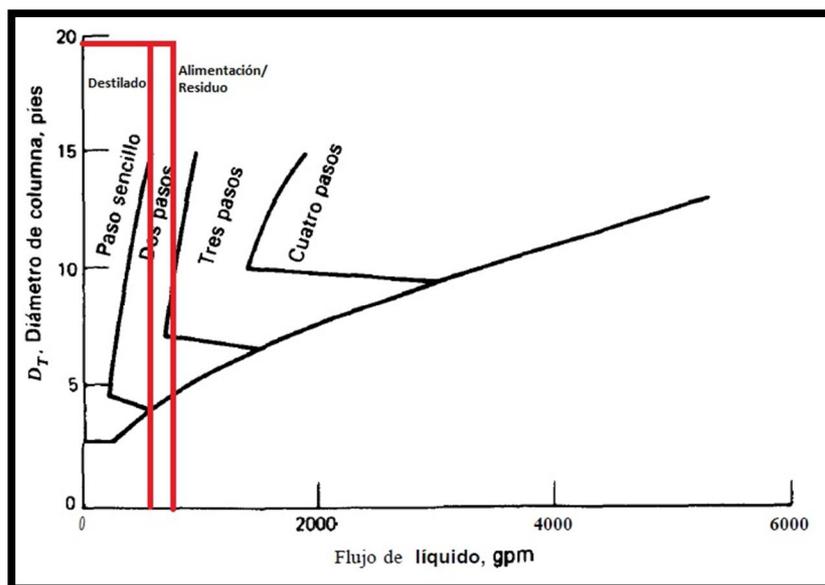


Figura. A3.21. Estimación del número de pasos según recomendaciones de la Koch Engineering Company. (E. J. Henley, J. D. Seader, 1999)

En este caso, por prolongación de la línea de paso sencillo, se encuentra que ambas zonas de columna precisarán sólo un paso de líquido por plato. Esta aproximación puede tomarse siempre que las

verificaciones de funcionamiento hidráulico y pérdidas de carga así lo consientan, como se mostrará seguidamente.

Dado que el diámetro de las secciones no recomienda variar el espaciado de platos y tomando en consideración las efectuadas en el apartado A3.C3.3.3, las dimensiones previas permanecen invariantes respecto al caso anterior, por lo que se remite a lo recogido en la Tabla A3.XXXVII.

En cuanto a los límites de operación, por depender estos de caudales volumétricos, como se muestra en la ecuación (A3.22), es preciso rehacer los cálculos. Para ello, se aplican la antedicha, como se explicó en A3.C3.3.4 y (A3.21) a los datos consignados en A3.XXXVII, A3.CC a A3.CCII y A3.CCXXVII; se obtiene:

<b>Límite superior de operación: Zona de rectificación</b>			
<b>PF</b>	0,061	<b><math>\alpha</math> (m)</b>	0,062
	<b>0,1</b>	<b><math>\beta</math> (m)</b>	0,033
<b><math>C_F</math> (m/s)</b>	0,036	<b><math>v_F</math> (m/s)</b>	<b>0,482</b>
<b>% permisible <math>v_F</math></b>	78	<b><math>v</math> (m/s)</b>	<b>0,376</b>

Tabla. A3.CCXXXI. Límite superior para la zona de rectificación. Caso 2

<b>Límite superior de operación: Plato de alimentación</b>			
<b>PF</b>	0,073	<b><math>\alpha</math> (m)</b>	0,062
	<b>0,1</b>	<b><math>\beta</math> (m)</b>	0,033
<b><math>C_F</math> (m/s)</b>	0,036	<b><math>v_F</math> (m/s)</b>	<b>0,497</b>
<b>% permisible <math>v_F</math></b>	78	<b><math>v</math> (m/s)</b>	<b>0,388</b>

Tabla. A3.CCXXXII. Límite superior para el plato de alimentación. Caso 2

<b>Límite superior de operación: Zona de agotamiento</b>			
<b>PF</b>	0,087	<b><math>\alpha</math> (m)</b>	0,062
	<b>0,1</b>	<b><math>\beta</math> (m)</b>	0,033
<b><math>C_F</math> (m/s)</b>	0,037	<b><math>v_F</math> (m/s)</b>	<b>0,421</b>
<b>% permisible <math>v_F</math></b>	78	<b><math>v</math> (m/s)</b>	<b>0,329</b>

Tabla. A3.CCXXXIII. Límite superior para la zona de agotamiento. Caso 2

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Donde, en los tres casos, la velocidad admisible del vapor se ha obtenido por aplicación de la ecuación (A3.23), en los términos participados previamente.

El cálculo de áreas y dimensiones de columna se practica siguiendo las indicaciones mencionadas en el apartado A3.C3.3.5. Por motivos de brevedad se omite referir nuevamente el procedimiento, si bien, deben indicarse los nuevos datos involucrados, pertenecientes a las tablas que seguidamente se enumeran: A3.CC a A3.CCII y A3.CCXXVII, (composiciones, propiedades y nuevos caudales), A3.CCXXXI a A3.CCXXXIII, (velocidad admisible del vapor) y A3.CCXXVIII a A3.CCXXX, (número de pasos por plato), por orden de necesidad en el desarrollo del cálculo. Así, se rehace el cálculo previo para obtener:

<b>Cálculo previo: Zona de rectificación</b>			
$Q_v$ (m <sup>3</sup> /s)	8,291	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	<b>22,069</b>
$W/T$	0,7	$A_v/A_t$	0,088
$x/T$	0,3562	$A_t$ (m <sup>2</sup> )	<b>24,190</b>
$T$ (m)	<b>5,550</b>	$T$ (m)	<b>6</b>

Tabla. A3.CCXXXIV. Cálculo previo de áreas. Zona de rectificación. Caso 2

<b>Cálculo previo: Plato de alimentación</b>			
$Q_v$ (m <sup>3</sup> /s)	8,839	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	<b>22,785</b>
$W/T$	0,7	$A_v/A_t$	0,088
$x/T$	0,3562	$A_t$ (m <sup>2</sup> )	<b>24,975</b>
$T$ (m)	<b>5,639</b>	$T$ (m)	<b>6</b>

Tabla. A3.CCXXXV. Cálculo previo de áreas. Plato de alimentación. Caso 2

<b>Cálculo previo: Zona de agotamiento</b>			
$Q_v$ (m <sup>3</sup> /s)	6,423	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	<b>19,548</b>
$W/T$	0,7	$A_v/A_t$	0,088
$x/T$	0,3562	$A_t$ (m <sup>2</sup> )	<b>21,427</b>
$T$ (m)	<b>5,223</b>	$T$ (m)	<b>5,5</b>

Tabla. A3.CCXXXVI. Cálculo previo de áreas. Zona de agotamiento. Caso 2

Una vez decidido el diámetro de columna, debe reiterarse el cálculo del área total y neta, así como determinarse las distintas dimensiones señaladas en A3.C3.3.5. El procedimiento se detalla en dicho apartado y los datos requeridos figuran en las tablas siguientes: A3.CCXXXIV a A3.CCXXXVI, (cálculos previos), A3.CCXXXVIII a A3.CCXXX, (número de pasos por plato) y A3.XXXVII, (dimensiones previas), por orden de necesidad en el desarrollo del cálculo. Así, se rehace el cálculo previo para obtener:

<b>Áreas y otras dimensiones: Zona de rectificación</b>			
$A_t$ (m <sup>2</sup> )	28,274	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	25,795
$A_v$ (m <sup>2</sup> )	2,479	$A_a$ (m <sup>2</sup> )	19,074
$A_{vig}$ (m <sup>2</sup> )	6,721	$A_o$ (m <sup>2</sup> )	1,081
W (m)	4,2	x (m)	2,1372
Z (m)	4,2744	e (m)	0,0045
	o		16996

Tabla. A3.CCXXXVII. Áreas y dimensiones. Zona de rectificación. Caso 2

<b>Áreas y otras dimensiones: Plato de alimentación</b>			
$A_t$ (m <sup>2</sup> )	28,274	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	25,795
$A_v$ (m <sup>2</sup> )	2,479	$A_a$ (m <sup>2</sup> )	19,074
$A_{vig}$ (m <sup>2</sup> )	6,721	$A_o$ (m <sup>2</sup> )	1,081
W (m)	4,2	x (m)	2,1372
Z (m)	4,2744	e (m)	0,0045
	o		16996

Tabla. A3.CCXXXVIII. Áreas y dimensiones. Plato de alimentación. Caso 2

<b>Áreas y otras dimensiones: Zona de agotamiento</b>			
$A_t$ (m <sup>2</sup> )	23,758	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	21,675
$A_v$ (m <sup>2</sup> )	2,083	$A_a$ (m <sup>2</sup> )	16,028
$A_{vig}$ (m <sup>2</sup> )	5,647	$A_o$ (m <sup>2</sup> )	0,909
W (m)	3,85	x (m)	1,9591
Z (m)	3,9182	e (m)	0,0045
	o		14282

Tabla. A3.CCXXXIX. Áreas y dimensiones. Zona de agotamiento. Caso 2

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Rediseñadas las columnas, es pertinente rehacer las verificaciones del apartado A3.C3.3.6. Siguiendo el procedimiento y ecuaciones mostradas en dicho apartado, se requerirán datos de las siguientes tablas: A3.CCXXXIV a A3.CCXXXIX, (caudales de vapor y áreas netas recalculadas y distintas dimensiones, respectivamente), A3.CCXXXI a A3.CCXXXIII, (velocidad admisible del vapor y parámetros de flujo), A3.CC a A3.CCII, (propiedades), A3.XXXVII, (dimensiones previas) y A3.CCXXVIII a A3.CCXXX, (caudales de líquido). Se obtiene, para las distintas zonas de columna:

Verificaciones: Zona de rectificación					
Inundación	$v_v$ (m/s)	0,321	$v$ (m/s)	0,376	Verificado
Lloriqueo	$v_{vm}$ (m/s)	0,793	$v_0$ (m/s)	7,668	Verificado
Descarga	$v_{Lv}$ (m/s)	0,015	Arrastre fraccional	0,026	Verificados
Máx. carga en vertedero	$Q_{Lv}$ (m <sup>3</sup> /m·s)		0,009	Verificado	

Tabla. A3.CCXL. Verificaciones para la zona de rectificación. Caso 2

Verificaciones: Plato de alimentación					
Inundación	$v_v$ (m/s)	0,343	$v$ (m/s)	0,388	Verificado
Lloriqueo	$v_{vm}$ (m/s)	0,832	$v_0$ (m/s)	8,175	Verificado
Descarga	$v_{Lv}$ (m/s)	0,019	Arrastre fraccional	0,026	Verificados
Máx. carga en vertedero	$Q_{Lv}$ (m <sup>3</sup> /m·s)		0,011	Verificado	

Tabla. A3.CCXLI. Verificaciones para el plato de alimentación. Caso 2

Verificaciones: Zona de agotamiento					
Inundación	$v_v$ (m/s)	0,296	$v$ (m/s)	0,329	Verificado
Lloriqueo	$v_{vm}$ (m/s)	0,638	$v_0$ (m/s)	7,070	Verificado
Descarga	$v_{Lv}$ (m/s)	0,023	Arrastre fraccional	0,026	Verificados
Máx. carga en vertedero	$Q_{Lv}$ (m <sup>3</sup> /m·s)		0,013	Verificado	

Tabla. A3.CCXLII. Verificaciones para la zona de agotamiento. Caso 2

Donde los límites de A3.C3.3.6 para la velocidad de descarga, el arrastre fraccional y la carga máxima sobre vertederos siguen siendo válidos, por lo que queda verificado el correcto funcionamiento de la columna en el caso 2. Para la justificación gráfica de la comprobación de arrastre fraccional, véase la Figura A3.7, donde se veri-

fica la curva mostrada para “Destilado” y “Alimentación”, a tenor de los parámetros de flujo encontrados y tabulados en A3.CCXL a A3.CCXLII.

Deben asimismo estimarse las pérdidas de carga para las nuevas condiciones de operación. Se remite a las ecuaciones citadas en el apartado A3.C3.3.7, que aplican sobre los datos de las siguientes tablas: A3.XXXVII, (espaciado entre platos y diámetro de perforaciones), A3.CCXXVIII a A3.CCXXX, (caudales de líquido), A3.CCXXXIV a A3.CCXXXIX, (distintas dimensiones y relaciones), A3.CC a A3.CCII, (propiedades) y A3.CCXL a A3.CCXLII, (velocidades de vapor a través de orificios). Cuando se rehacen los cálculos para los nuevos datos se obtiene:

<b>Pérdidas de carga: Zona de rectificación</b>			
$h_w$ (m)	<b>0,09</b>	$W_{ef}/W$	0,986
	$h_{ccalc}$ (m)	<b>0,029</b>	
$C_0$	1,296	$v_0$ (m/s)	7,668
$Re_0$	$3,13 \cdot 10^4$	$f$	0,0058
$4f$	0,0232	$h_D$ (m)	<b>0,046</b>
$v_a$ (m/s)	0,435	$z$ (m)	5,1
$h_L$ (m)	<b>0,063</b>	$h_R$ (m)	<b>0,002</b>
$A_L$ (m <sup>2</sup> )	0,273	$g$ (m/s <sup>2</sup> )	<b>9,80665</b>
$A_{da}$ (m <sup>2</sup> )	0,273	$h_E$ (m)	<b>0,003</b>
$h_{VAP}$ (m)	<b>0,110</b>	$h_B$ (m)	<b>0,113</b>
$\Delta$	<b>0</b>	Pérdidas (m)	<b>0,232</b>
<b>Verificado</b>			

Tabla. A3.CCXLIII. Pérdidas de carga para la zona de rectificación. Caso 2

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

<b>Pérdidas de carga: Plato de alimentación</b>			
$h_w$ (m)	<b>0,09</b>	$W_{ef}/W$	0,984
	$h_{ccalc}$ (m)	<b>0,033</b>	
$C_0$	1,296	$v_0$ (m/s)	8,175
$Re_0$	$3,13 \cdot 10^4$	$f$	0,0058
$4f$	0,0232	$h_D$ (m)	<b>0,049</b>
$v_a$ (m/s)	0,463	$z$ (m)	5,1
$h_L$ (m)	<b>0,065</b>	$h_R$ (m)	<b>0,002</b>
$A_L$ (m <sup>2</sup> )	0,273	$g$ (m/s <sup>2</sup> )	<b>9,80665</b>
$A_{da}$ (m <sup>2</sup> )	0,273	$h_E$ (m)	<b>0,004</b>
$h_{VAP}$ (m)	<b>0,115</b>	$h_B$ (m)	<b>0,119</b>
$\Delta$	<b>0</b>	Pérdidas (m)	<b>0,243</b>
<b>Verificado</b>			

Tabla. A3.CCXLIV. Pérdidas de carga para el plato de alimentación. Caso 2

<b>Pérdidas de carga: Zona de agotamiento</b>			
$h_w$ (m)	<b>0,09</b>	$W_{ef}/W$	0,980
	$h_{ccalc}$ (m)	<b>0,036</b>	
$C_0$	1,296	$v_0$ (m/s)	7,070
$Re_0$	$3,81 \cdot 10^4$	$f$	0,0057
$4f$	0,0228	$h_D$ (m)	<b>0,052</b>
$v_a$ (m/s)	0,401	$z$ (m)	4,675
$h_L$ (m)	<b>0,066</b>	$h_R$ (m)	<b>0,002</b>
$A_L$ (m <sup>2</sup> )	0,250	$g$ (m/s <sup>2</sup> )	<b>9,80665</b>
$A_{da}$ (m <sup>2</sup> )	0,250	$h_E$ (m)	<b>0,006</b>
$h_{VAP}$ (m)	<b>0,120</b>	$h_B$ (m)	<b>0,125</b>
$\Delta$	<b>0</b>	Pérdidas (m)	<b>0,252</b>
<b>Verificado</b>			

Tabla. A3.CCXLV. Pérdidas de carga para la zona de agotamiento. Caso 2

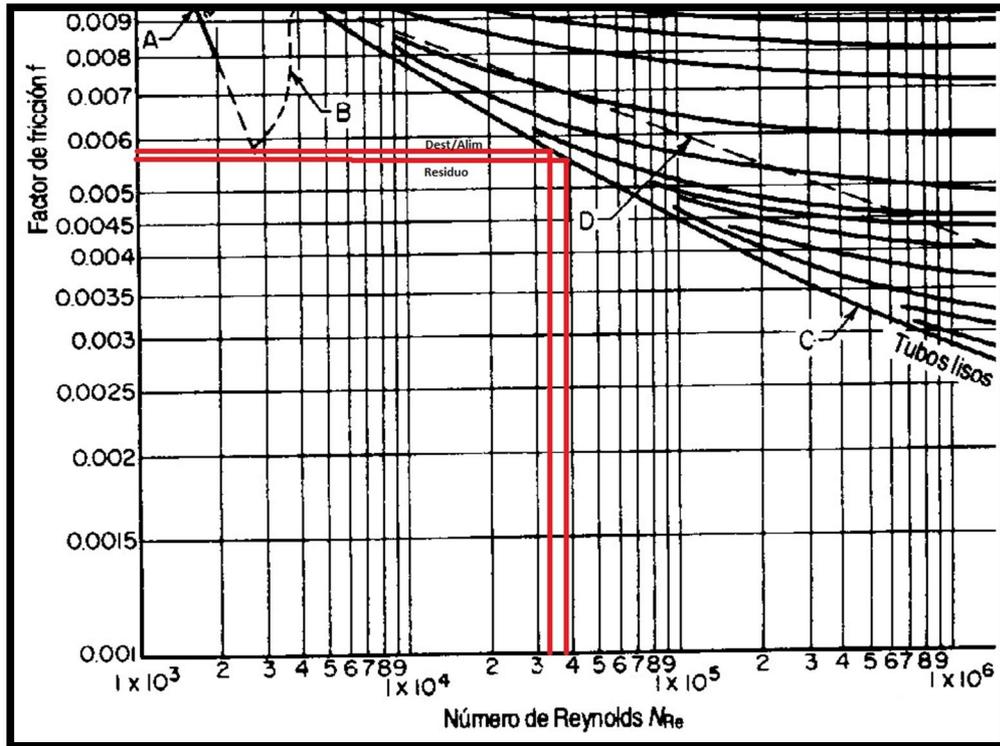


Figura. A3.22. Gráfico de *Moody*.

(Manual del Ingeniero Químico. *R. H. Perry, D. W. Green, J. O. Maloney, 6ª Edición*)

Se encuentran verificadas, en cada caso, las pérdidas de carga para el caso 2. La justificación gráfica del factor de *Fanning*, viene dada en la Figura A3.22.

Con lo anterior, se han recalculado las áreas y dimensiones de columna, número de pasos y demás magnitudes para el caso segundo en estudio. A continuación se precisa reevaluar las eficacias, a fin de estimar el número de platos reales concordante a las nuevas condiciones. Se procede como en el apartado A3.C3.4.1:

- Eficacia global: Se aplica el ajuste de *Eduljee*, sobre datos de las tablas A3.CLXXIV a A3.CLXXV y A3.CLXXXI.
- Eficacias de plato de *Van Winkle et al.*: Se aplica la correlación dada por (A3.59) a los datos de las tablas A3.CCXXXIV a A3.CCXXXIX, (caudales de vapor y distintas dimensiones), A3.CC a A3.CCII, (propiedades), A3.CXCIX, (difusividad del

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

clave ligero en fase líquida) y A3.CCXLIII a A3.CCXLV, (altura de la presa).

- Correcciones de *Lockhart y Leggett*. Sobre el dato más bajo de eficacia, se aplica (A3.60). Se toma Z de las tablas A3.CCXXXVII y A3.CCXXXVIII, (platos de destilado y alimentación, que representan respectivamente las zonas de rectificación y agotamiento). El factor de incremento se interpola linealmente de la Tabla A3.LVII, conocido Z. La condición para la validez de la corrección, obliga a tener un producto promedio de volatilidad relativa y viscosidad entre 0,1 y 1 cP. Condición que se satisface, a tenor de lo mostrado en A3.CCXLVI.

Se obtiene, aplicando lo anterior:

Estimación de la eficacia global			
$\alpha_{\text{cabeza}}$	1	$\alpha_{\text{cola}}$	1,394
$\mu_{L, \text{cabeza}} \text{ (cP)}$	0,158	$\mu_{L, \text{cola}} \text{ (cP)}$	0,174
$\langle \alpha \rangle$	1,197	$\langle \mu \rangle \text{ (cP)}$	0,166
$\langle \alpha \mu \rangle \text{ (cP)}$	0,200	$E_o \text{ (%)}$	<b>73,7</b>

Tabla. A3.CCXLVI. Eficacia global de columna. Ajuste de *Eduljee*. Caso 2

Estimación de la eficacia del plato primero			
Dg	300,450	$u_v \text{ (m/s)}$	0,293
Sc	70,243	FA	0,038
Re	15159,531	E	<b>0,973</b>

Tabla. A3.CCXLVII. Estimación de la eficacia del plato primero. Caso 2

Estimación de la eficacia del plato de alimentación			
Dg	281,910	$u_v \text{ (m/s)}$	0,313
Sc	67,362	FA	0,038
Re	15152,811	E	<b>0,954</b>

Tabla. A3.CCXLVIII. Estimación de la eficacia del plato de alimentación. Caso 2

<b>Estimación de la eficacia del último plato</b>			
<b>Dg</b>	<b>295,017</b>	<b>u<sub>v</sub> (m/s)</b>	0,270
<b>Sc</b>	<b>34,758</b>	<b>FA</b>	0,038
<b>Re</b>	<b>16943,216</b>	<b>E</b>	<b>0,821</b>

Tabla. A3.CCXLIX. Estimación de la eficacia del último plato. Caso 2

<b>Corrección para rectificación</b>		<b>Corrección para agotamiento</b>	
<b>Z (m)</b>	4,274	<b>Z (m)</b>	4,274
<b>Z (ft)</b>	14,024	<b>Z (ft)</b>	14,024
<b>FI (%)</b>	26,609	<b>FI (%)</b>	26,609
<b>E<sub>o, corregida</sub> (%)</b>	<b>93,3</b>	<b>E<sub>o, corregida</sub> (%)</b>	<b>93,3</b>

Tabla. A3.CCL. Correcciones de eficacia. Caso 2

Se observa que, dado que las propiedades no han variado, por no hacerlo las composiciones de las corrientes; la eficacia global se mantiene invariante respecto del caso anterior. Por su parte, cuando se vincula la estimación de las eficacias a dimensiones de columna, recalculadas éstas, se obtienen nuevas eficacias de plato. En este caso, se tiene la menor estimación de la eficacia la que corresponde al plato de residuo. No obstante es la eficacia global la que se corrige en las últimas tablas, como criterio conservador.

Finalmente, con todo lo recalculado en las tablas A3.CCXXVI a A3.CCL, se está en disposición de procurar los datos operativos finales concernientes a la unidad de separación denominada “MÚLTIPLE”.

#### A3.C3.4.3. Decisión final de columna

Sean los siguientes datos:

- Secciones.
- Diámetro de cada una.
- Ídem para el espaciado de platos.
- Ídem para el número de platos ideales.
- Ídem para la eficacia global corregida.

- Ídem para el número de platos reales.
- Altura de cada sección.
- Altura total.
- Decisión de número de columnas.
- Altura de cada columna, (si procediere).
- Decisión de reducción de diámetro.

Se procede a describir someramente cada dato.

La columna constará de dos secciones diferenciadas: rectificación y agotamiento.

El diámetro de la sección de rectificación coincidirá con el obtenido para el plato primero, mientras que el de la sección de agotamiento coincidirá con el obtenido para el plato de alimentación; siendo estos los diámetros restrictivos, por comportar las mayores dimensiones. De la misma forma, cada sección estará representada por las dimensiones calculadas para el primer plato, (sección de rectificación) y el plato de alimentación, (sección de agotamiento). Estos datos se toman de las tablas A3.CCXXXIV y A3.CCXXXVII, y A3.CCXXXV y A3.CCXXXVIII.

El espaciado de platos, se toma de la Tabla A3.XXXVII.

El número de platos ideales viene dado directamente por la aplicación del método de FUG a la corriente de alimentación, (véase anexo correspondiente).

La eficacia global corregida difiere ligeramente en cada una de las dos secciones de la columna, según lo recogido en la Tabla. A3.CCL.

El número de platos reales se calcula a partir de los datos descritos en los dos párrafos anteriores, según la ecuación (A3.61), para cada zona.

---

Como número de platos reales para la zona de rectificación, debe tomarse el número dado por (A3.61) truncado en la unidad y aproximado siempre a la siguiente, como criterio conservador. Para la zona de agotamiento procedería, de la misma forma, tomar un plato más, si bien, y dado que debe considerarse el calderín como etapa de equilibrio, los platos reales obtenidos se aproximarán a la unidad anterior.

La altura de cada sección es el resultado de multiplicar el espaciado de platos por el número de platos reales.

La altura total es el total de las alturas de las secciones de rectificación y agotamiento.

En función de la altura total, y como criterio de diseño, se observará la segregación de la columna en un tren de separación,, compuesto por varias columnas, cuando la altura total dividida por 212 pies y truncada en la unidad sea cercana a dos. El número apropiado de columnas será el redondeo del cociente indicado. En todo caso, ninguna columna individual superará los 90 m de altura.

Caso de segregar el tren de separación en varias columnas, la altura de cada columna se dilucida dividiendo la altura total por el número de columnas seleccionado, cambiando convenientemente unidades.

Finalmente, se comprobará la diferencia porcentual entre los diámetros de cada sección. Como criterio operativo, se mantendrá el diámetro superior como diámetro de toda la columna, siempre que la diferencia de diámetros no supere el 20%. La diferencia porcentual de diámetros se calcula según (A3.62).

Considerando lo anterior, se obtiene:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Decisión de columna			
Rectificación		Agotamiento	
<b>T (m)</b>	6	<b>T (m)</b>	6
<b>t (m)</b>	0,9	<b>t (m)</b>	0,9
<b>NPI<sub>rect.</sub></b>	74,638	<b>NPI<sub>agot.</sub></b>	39,921
<b>E<sub>o, corregida</sub></b>	93,3	<b>E<sub>o, corregida</sub></b>	93,3
<b>NPR<sub>rect.</sub></b>	79,993	<b>NPR<sub>agot.</sub></b>	42,785
	80		42
<b>h<sub>rect.</sub> (m)</b>	72	<b>h<sub>agot.</sub> (m)</b>	37,8
<b>h<sub>total</sub> (m)</b>		109,8	
<b>h<sub>total</sub> (ft)</b>		360,2	
<b>Criterio 212 ft</b>		1,699 ≈ 2 columnas	
<b>Decisión (m/torre)</b>		54,9	
<b>% ΔT</b>		0	

Tabla. A3.CCLI. Datos para la decisión final de columna

La unidad “MÚLTIPLE” se alimenta por la corriente E, procedente de “EXTRACTIVA 2”, dividida en dos. Cada una de estas dos corrientes en que se ha dividido la alimentación, que se denominarán E<sub>1</sub> y E<sub>2</sub>, a su vez alimentan sendas subunidades gemelas consistentes en dos columnas de 54,9 m cada una.

Los datos de A3.CCLI, se refieren a una de las subunidades, puesto que suponen el cálculo para la mitad de la corriente de alimentación.

En cada subunidad, la sección de rectificación es la más lueña y consta de 80 platos, en tanto que la sección de agotamiento consta de 42. Ambas secciones suponen 122 platos distribuidos de la siguiente forma:

- 1ª columna: Sección de agotamiento: 42 platos separados 0,9 m suponen 37,8 m de altura. Sección de rectificación: Descontada la sección de agotamiento, restan 17,1 m repartidos a 0,9 m de espaciado, resultan 19 platos de rectificación.

- 2ª columna: Sección de rectificación: 54,9 m de altura repartidos a 0,9 m de espaciado, resultan 61 platos de rectificación.

La suma de los 42 platos de agotamiento y los 19 de rectificación de la primera columna, amén de los 61 platos de la segunda, supone 122 platos: el reparto es correcto y la disposición final, la que sigue:

- 1ª columna: Sección de agotamiento: 42 platos de paso sencillo, del 122 al 81; 37,8 m de altura. Sección de rectificación: 19 platos de paso sencillo, del 80 al 62; 17,1 m de altura. Total de la 1ª columna: 54,9 m.
- 2ª columna: Sección de rectificación: 61 platos de paso sencillo, del 61 al 1; 54,9 m de altura.

Los platos se numeran del 1 al 122, tomando como primer plato el de cabeza de la columna segunda y como último, el de cola de la columna primera. Si se suman las alturas, el total coincide con  $h_{total}$  dada en la Tabla. A3.CCLI.

La alimentación se inserta entre los platos 80 y 81, a su temperatura de ebullición, es decir, entre el primer plato de la sección de agotamiento, (81), y el último de la sección de rectificación, (80).

La decisión final sobre la reducción de diámetros es negativa, puesto que el cálculo de diámetros indica aplicar el mismo para las dos secciones de columna: ambas columnas se construirán con platos de paso sencillo y 6 m de diámetro.

Las conexiones se efectúan de la siguiente forma:

- El vapor del plato 62, primer plato de la primera columna, se introduce en el plato 61, último plato de la segunda columna. Asimismo, el líquido del plato 61, se bombea al plato 62.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

---

- El vapor del plato 1, esto es, el destilado, se condensa totalmente y la fracción determinada por la relación de reflujo, se retorna como líquido al mismo plato.
- El líquido del plato 122, esto es, el residuo de columna, se calienta a la temperatura indicada por los datos de equilibrio y se retorna el vapor correspondiente al mismo plato.
- El líquido no retornado a la segunda columna en el plato 1, constituye el destilado de "MÚLTIPLE" y, según el diagrama de flujo, constituye la alimentación de "BINARIA".
- El líquido en equilibrio con el vapor retornado a la primera columna en el plato 122, se retira como residuo de "MÚLTIPLE" y se dirige a "TANQUES de CORRIENTES", según el diagrama de flujo.

### **Capítulo A3.C4. Diseño hidráulico de “BINARIA”**

#### **A3.C4.1. Datos previos**

El diseño hidráulico de las columnas de platos requiere la evaluación de una serie de ecuaciones en las que se involucran diversas consideraciones, acerca del flujo de fluidos que en ésta acontece.

Parámetros como las velocidades de inundación y lloriqueo, el arrastre fraccional de líquido y su correcto flujo, así como las pérdidas de carga entre platos, pueden estimarse a través de distintas ecuaciones y gráficas que vinculan distintas propiedades físicas.

El objeto de este anexo radica en proveer de tales propiedades al proceso de dimensionamiento de la columna, así como del propio diseño hidráulico de la torre denominada “BINARIA”.

El diseño hidráulico de las columnas de platos viene necesariamente precedido de la obtención de propiedades físicas de las corrientes circulantes. A la sazón, se hace preciso definir los caudales y composiciones de las mismas, como información preliminar a la hora de generar las antedichas propiedades.

La alimentación de “BINARIA” consistirá en la siguiente corriente:

<b>Componente</b>	<b><math>x_{Fi}</math></b>	<b><math>(Mmol/año)_i</math></b>
<b>1-Buteno (1)</b>	0,170	1064,881
<b>Butadieno (2)</b>	0,830	5186,266
<b>G (Mmol/año)</b>	<b>6251,148</b>	

Tabla. A3.CCLII. Corriente G, alimentación de “BINARIA”

Los componentes de la alimentación se han ordenado por volatilidad creciente. El método de diseño para una operación de destilación binaria no requiere distinguir clave pesado de ligero. En todo caso, es bastante claro que el compuesto menos volátil, (componente de interés, butadieno) haría las veces de clave pesado, mientras que

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

el componente más volátil, (componente 1-buteno), constituiría el clave ligero. Esta diferenciación será necesaria para la estimación de la difusividad del clave ligero en fase líquida. Una vez se establecen los porcentajes de cada uno de los componentes en las corrientes de destilado y residuo, estas últimas quedan definidas según:

Componente	$x_{Di}$	(Mmol/año) <sub>i</sub>	Componente	$x_{Wi}$	(Mmol/año) <sub>i</sub>
1-Buteno (1)	0,752	1060,525	1-Buteno (1)	0,001	4,357
Butadieno (2)	0,248	349,747	Butadieno (2)	0,999	4836,519
H (Mmol/año)	<b>1410,272</b>		Z (Mmol/año)	<b>4840,876</b>	

Tabla. A3.CCLIII. Composiciones de las corrientes H y Z, destilado y residuo de “BINARIA”

Donde se ha decidido la composición del destilado en base a los datos de equilibrio, mientras que la del residuo viene marcada por el objetivo del presente PFC. Conocidas la corriente de alimentación y de destilado y residuo, pueden balancearse el resto de las corrientes de columna, partiendo del balance al condensador total y los datos obtenidos a partir de la resolución por el método FUG, (véase anexo correspondiente):

$$(A3.69) \begin{cases} V = L + H & (1) \\ R = L/V \cong 0,98 & (2) \end{cases}$$

Se tienen V y L, donde V es el vapor saliente de columna que se dirige al condensador, L es el líquido condensado totalmente y retornado a columna y H es el destilado, la fracción de líquido que se retira de la unidad y se destina en parte a “BLENDING de EXTRACTIVA 1” y en parte a “TANQUES de CORRIENTES”. Por su parte, R es la relación de reflujo interna, conocida a partir de la relación mínima estimada gráficamente según el método de *McCabe-Thiele*.

Operando con los datos de la Tabla A3.CCLIII y aplicando la ecuación (A3.69), se obtiene:

$$\begin{cases} L = RV \Rightarrow V = RV + H \Rightarrow V = \frac{H}{1-R} = \frac{1410,272}{1-0,98} \cong 70513,605 \text{ Mmol/año} \\ L = 0,98 \cdot 70513,605 \cong 69103,332 \text{ Mmol/año} \end{cases}$$

Considerando a continuación el balance al plato de alimentación:

$$(A3.70) \begin{cases} L' = L + \phi G \quad (1) \\ V = V' + (1 - \phi)G \quad (2) \end{cases}$$

Donde  $\phi$  es la condición de alimentación, a la sazón la unidad por tratarse ésta de un líquido a su temperatura de ebullición; se tiene:

$$\begin{cases} L' = L + G = 69103,332 + 6251,148 \cong 75354,480 \text{ Mmol/año} \\ V = V' \cong 70513,605 \text{ Mmol/año} \end{cases}$$

Las corrientes  $L'$  y  $V'$ , responden al flujo de líquido y vapor en la sección de agotamiento. Multiplicando las corrientes por el factor de conversión:  $\frac{1000 \text{ kmol}}{1 \text{ Mmol}} \cdot \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ días}} \cdot \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}}$ , se obtienen los siguientes resultados en unidades más convenientes:

Balance de materia					
G (kmol/h)	713,601	G (kmol/h)	160,990	Y (kmol/h)	552,611
	L (kmol/h)	7888,508	V (kmol/h)	8049,498	
	L' (kmol/h)	8602,110	V' (kmol/h)	8049,498	

Tabla. A3.CCLIV. Caudales de las corrientes de "BINARIA"

La experiencia de capítulos anteriores indica que, para los caudales presentados en A3.CCLIV, el diámetro de la columna requerida será constructivamente inviable. Por tanto, se decide introducir un divisor de corriente que reparta la alimentación, en esta ocasión, en tres trenes de separación. La debida descripción acerca de la disposición final de la operación "BINARIA", se proporcionará como remate del capítulo. Entre tanto, dividiendo cada corriente de la tabla anterior por tres, se obtiene el balance de materia correspondiente a una de las corrientes en que se subdivide la alimentación.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Balance de materia por subunidad					
G (kmol/h)	237,867	G (kmol/h)	53,663	Y (kmol/h)	184,204
L (kmol/h)	2629,503	V (kmol/h)	2683,166		
L' (kmol/h)	2867,370	V' (kmol/h)	2683,166		

Tabla. A3.CCLV. Caudales de las corrientes de “BINARIA” en cada subunidad

Con las corrientes y sus composiciones definidas, puede procederse a la determinación de las propiedades requeridas para el procedimiento de diseño hidráulico de la columna. Tales propiedades son las que siguen: Densidad de fase líquida,  $\rho_L$ , y densidad de fase vapor,  $\rho_V$ , viscosidad de fase líquida y fase vapor,  $\mu_L$  y  $\mu_V$  respectivamente, tensión superficial del líquido,  $\sigma$ , y difusividad del componente clave ligero en fase líquida.

Dado que el diseño hidráulico de las zonas de rectificación y agotamiento de la columna dependerá de las características del flujo, se determinarán las propiedades del destilado, el residuo y el fluido que alimenta a la columna, siendo éstas las regiones críticas de la misma. De esta forma, las composiciones de líquido y vapor en las mencionadas regiones, así como las temperaturas correspondientes se consignan en las siguientes tablas:

	Composición fase líquida		
	$x_1$	$x_2$	$T_L$ (K)
<b>Destilado</b>	0,752	0,248	298,781
<b>Plato alimentación</b>	0,170	0,830	299,913
<b>Residuo</b>	0,001	0,999	300,769

Tabla. A3.CCLVI. Composición y T del líquido para las distintas corrientes

	Composición fase vapor		
	$y_1$	$y_2$	$T_V$ (K)
<b>Destilado</b>	0,752	0,248	298,781
<b>Plato alimentación</b>	0,187	0,813	299,913
<b>Residuo</b>	0,001	0,999	300,769

Tabla. A3.CCLVII. Composición y T del vapor para las distintas corrientes

Donde las corrientes de alimentación y residuo se encuentran en equilibrio, (de ahí las temperaturas coincidentes del líquido y el vapor), mientras que el destilado presenta una composición equivalente al vapor saliente de columna, al ser este condensado totalmente y retornado parcialmente a columna. Es por ello que la fase líquida y vapor del destilado no se encuentran en equilibrio y, como consecuencia, las temperaturas de ambas fases no son coincidentes, (aunque en este caso sí lo son hasta el tercer decimal). Se incidirá sobre este punto en el anexo de diseño de cambiadores de calor asociados a las columnas.

### **A3.C4.2. Determinación de propiedades físicas**

#### **A3.C4.2.1. Densidad de la fase líquida**

El cálculo de la densidad de la fase líquida se practica haciendo uso de la ecuación de *Rackett*<sup>\*</sup> para la estimación de volumen de líquido saturado, según la expresión (A3.3), que requiere volúmenes críticos,  $V_{ci}$ , y factores de compresibilidad críticos,  $Z_{ci}$ , de las sustancias puras involucradas en la operación. También se requerirán las temperaturas críticas de las mismas, a fin de hallar la temperatura reducida según (A3.3.2). Las propiedades críticas requeridas se recogen en la tabla que sigue:

Propiedades críticas					
$T_{c1}$ (K)	419,6	$V_{c1}$ (L/mol)	0,240	$Z_{c1}$	0,277
$T_{c2}$ (K)	425,0	$V_{c2}$ (L/mol)	0,221	$Z_{c2}$	0,270

Tabla. A3.CCLVIII. Propiedades críticas requeridas por la ecuación (A3.3)

Con los datos de las tablas A3.CCLVIII y A3.CCLVI y aplicando (A3.3), se tiene:

\* H. G. Rackett. J. Chem. Eng. Data, vol. 15, pgs. 514-517, 1970.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

	$T_{r1}$	$T_{r2}$	$V_1^{Lsat}$	$V_2^{Lsat}$
<b>Destilado</b>	0,712	0,703	0,098	0,088
<b>Plato alimentación</b>	0,715	0,706	0,098	0,088
<b>Residuo</b>	0,717	0,708	0,098	0,088

Tabla. A3.CCLIX. Aplicación de (A3.3)

Donde los volúmenes de líquido saturados, según la ecuación de Rackett, presentan las mismas unidades que los volúmenes críticos, L/mol. Considerando que el recíproco de los volúmenes saturados coincide con la densidad molar de las sustancias puras, y ponderando según las composiciones de las mismas como regla de mezclado, se obtiene la densidad molar de las tres corrientes, como queda indicado en la expresión (A3.4). Por aplicación de ésta, hasta el tercer componente, sobre los volúmenes saturados de la Tabla A3.CCLIX, las composiciones en A3.CCLVI y convirtiendo a unidades más convenientes, se obtiene para cada corriente:

	$\rho_L$ (mol/cm <sup>3</sup> )
<b>Destilado</b>	0,011
<b>Plato alimentación</b>	0,011
<b>Residuo</b>	0,011

Tabla. A3.CCLX. Estimación de las densidades molares de fase líquida

### A3.C4.2.2. Viscosidad de la fase líquida

El cálculo de viscosidades para la fase líquida involucra distintos procedimientos: un método para las viscosidades de compuestos puros y otro método, o regla de mezclado, para la obtención de la viscosidad de la fase líquida binaria. Las viscosidades puras se dilucidan mediante el procedimiento *API 11A2.1*, contenido en el libro técnico citado en la bibliografía consultada\*. Este procedimiento, similar a la ecuación de *Antoine* para el cálculo de presiones de vapor, viene dado por la ecuación (A3.5).

\* Se refiere a *Technical Data Book-Petroleum Refining*, American Petroleum Institute (API), 6ª Edición, abril 1997.

El procedimiento precisa el valor de los coeficientes A, B, C, D y E de las sustancias puras, que figuran tabulados en el libro técnico citado, en las páginas que suceden a la expresión anterior. Para las sustancias en juego tales coeficientes son los que se consignan a continuación:

<b>Coeficientes para API 11A2.1</b>			
<b>A<sub>1</sub></b>	$-1,9161 \cdot 10^0$	<b>A<sub>2</sub></b>	$2,0489 \cdot 10^1$
<b>B<sub>1</sub></b>	$6,0498 \cdot 10^2$	<b>B<sub>2</sub></b>	$-5,5836 \cdot 10^2$
<b>C<sub>1</sub></b>	$-1,2860 \cdot 10^0$	<b>C<sub>2</sub></b>	$-4,5060 \cdot 10^0$
<b>D<sub>1</sub></b>	$0,0000 \cdot 10^0$	<b>D<sub>2</sub></b>	$0,0000 \cdot 10^0$
<b>E<sub>1</sub></b>	$0,0000 \cdot 10^0$	<b>E<sub>2</sub></b>	$0,0000 \cdot 10^0$

Tabla. A3.CCLXI. Coef. para estimación de viscosidad de sustancias puras

Haciendo uso de la Tabla A3.CCLXI y de la citada ecuación (A3.5), se obtiene para las distintas corrientes:

	<b>T<sub>L</sub> (R)</b>	<b>μ<sub>1</sub> (cP)</b>	<b>μ<sub>2</sub> (cP)</b>
<b>Destilado</b>	537,806	<b>0,140</b>	<b>0,139</b>
<b>Plato alimentación</b>	539,843	<b>0,138</b>	<b>0,137</b>
<b>Residuo</b>	541,385	<b>0,137</b>	<b>0,136</b>

Tabla. A3.CCLXII. Estimación de viscosidad de compuestos puros

Donde se han convertido las temperaturas correspondientes a cada corriente, dadas en la Tabla A3.CCLVI a Rankine, la unidad de temperatura solicitada por la ecuación (A3.5).

Una vez determinadas las viscosidades de los compuestos puros, la de la mezcla se estima por la aplicación de la regla tomada del libro técnico de *API* mostrada en (A3.7).

Haciendo uso de nuevo de las composiciones de la Tabla A3.CCLVI, así como de las viscosidades de la Tabla A3.CCLXII, por aplicación de (A3.7) para dos componentes, se obtiene:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

	$\mu_l$ (cP)
Destilado	0,139
Plato alimentación	0,137
Residuo	0,136

Tabla. A3.CCLXIII. Estimación de las viscosidades de fase líquida

Como comentario a los métodos utilizados, debe mencionarse el hecho de que estos corresponden a estimaciones de la viscosidad a baja presión, como es el caso. Es por ello que las desviaciones esperadas del comportamiento experimental deben ser asumibles.

### A3.C4.2.3. Densidad de la fase vapor

La estimación de las corrientes de vapor, se ha realizado a partir de la ecuación de *Pitzer*<sup>\*</sup>, presentada en (A3.8), conjunto de ecuaciones que requería de la definición de presión parcial según la ley de *Dalton*, ecuación (A3.9).

La presión de operación se especificó en el anexo de generación de datos termodinámicos:  $P = 3$  atm. De esta forma, puede estimarse el factor de compresibilidad,  $Z_i$ , para sustancias puras. Atendiendo a las ecuaciones (A3.10), puede obtenerse tanto el volumen de compuesto puro en cada corriente, como la densidad, de modo similar al empleado para la fase líquida.

El cálculo final de la densidad de vapor se efectúa a través de la regla de mezclado dada por (A3.11), a la sazón truncada para dos componentes.

Haciendo uso de la Tabla A3.CCLVII, la Tabla A3.CCLVIII y la ecuación (A3.8.5), se determinan las siguientes temperaturas reducidas:

<sup>\*</sup> Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química. *J. M. Smith, H. C. Van Ness, M. M. Abbott*. McGraw-Hill. 6ª Edición, pgs. 108-112.

	$T_{r1}$	$T_{r2}$
<b>Destilado</b>	0,712	0,703
<b>Plato alimentación</b>	0,715	0,706
<b>Residuo</b>	0,717	0,708

Tabla. A3.CCLXIV. Temperaturas reducidas de fase vapor

Se sigue el procedimiento empleando la Tabla A3.CCLVII y aplicando la ecuación (A3.9):

	$P_1$ (atm)	$P_2$ (atm)
<b>Destilado</b>	2,256	0,744
<b>Plato alimentación</b>	0,561	2,439
<b>Residuo</b>	0,003	2,997

Tabla. A3.CCLXV. Presiones parciales de fase vapor

El siguiente paso de cálculo requiere como dato las presiones de vapor críticas. En la siguiente tabla se proporcionarán también los factores acéntricos críticos:

<b>Propiedades críticas</b>			
$P_{c1}$ (atm)	39,7	$\omega_1$	0,187
$P_{c2}$ (atm)	42,7	$\omega_2$	0,195

Tabla. A3.CCLXVI. Propiedades críticas requeridas por la ecuación (A3.8)

Por medio de las dos tablas anteriores y por aplicación de (A3.8.4), se obtienen las presiones reducidas:

	$P_{r1}$	$P_{r2}$
<b>Destilado</b>	0,057	0,017
<b>Plato alimentación</b>	0,014	0,057
<b>Residuo</b>	0,000	0,070

Tabla. A3.CCLXVII. Presiones reducidas de fase vapor

La aplicación de la ecuación (A3.8) generará los factores de compresibilidad de cada componente en su correspondiente vapor,

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

haciendo uso de los datos de las tablas A3.CCLXIV y A3.CCLXVI a A3.CCLXVII:

	$Z_1$	$Z_2$
<b>Destilado</b>	0,940	0,981
<b>Plato alimentación</b>	0,985	0,938
<b>Residuo</b>	1,000	0,924

Tabla. A3.CCLXVIII. Factores de compresibilidad de fase vapor

La tabla anterior, por aplicación de la ecuación (A3.10.1), proporciona volúmenes de cada especie en fase vapor. La presión parcial se toma de la Tabla A3.CCLXV y la temperatura de la Tabla A3.CCLVII:

	$V_1$ (L/mol)	$V_2$ (L/mol)
<b>Destilado</b>	10,216	32,317
<b>Plato alimentación</b>	43,223	9,460
<b>Residuo</b>	8569,861	7,608

Tabla. A3.CCLXIX. Volúmenes por componente en fase vapor

Donde se ha tomado  $R = 0,082057 \text{ atm}\cdot\text{L/mol}\cdot\text{K}$ . Los volúmenes correspondientes a especies sin composición, o con valores muy bajos, en las distintas corrientes, (v. gr. en el residuo apenas aparece 1-buteno); se han supuesto nulos, (si carece de composición, no ha de tener volumen). Como puede observarse, debido a la mínima composición de disolvente en la fase vapor, su presión parcial es también un valor muy bajo, por lo que al sustituir en (A3.10.1), el volumen resulta un valor muy elevado.

En todo caso, aunque se considerasen los volúmenes elevados dados en la Tabla A3.CCLXIX, la contribución de los mismos a la densidad de la fase vapor es despreciable, puesto que, según (A3.10.2), suman los recíprocos de los volúmenes ponderados a las composiciones: si éstas ya son bajas, al multiplicar por el recíproco de un número elevado, el valor resulta nimio.

Haciendo uso combinado de las ecuaciones (A3.10.2) y (A3.11), leyendo volúmenes molares de la tabla anterior, las composiciones de vapor de la Tabla A3.CCLVII y cambiando a unidades más convenientes:

	$\rho_v \cdot 10^5 \text{ (mol/cm}^3\text{)}$
Destilado	8,129
Plato alimentación	9,027
Residuo	13,131

Tabla. A3.CCLXX. Estimación de las densidades molares de fase vapor

#### A3.C4.2.4. Viscosidad de la fase vapor

La viscosidad de la fase vapor, como para el caso de la fase líquida, requiere el concurso de dos métodos de estimación: uno para la determinación de viscosidad de los compuestos puros, y otro que proponga una regla de mezclado válida para encontrar la viscosidad de la fase.

Se ha seleccionado, del libro de *Reid*, la ecuación de *Lucas*, adecuada para el cálculo de viscosidades de sustancias puras polares y a baja presión. Pese a que los componentes presentes son apolares, (o muy ligeramente polares), se seguirá aplicando el mismo método de los capítulos previos a fin de incurrir siempre en un error de método similar. Como regla de mezclado se empleará el método de *Wilke*, regla de rigurosidad intermedia, y suficiente en este caso, para obtener la viscosidad de la mezcla. Las expresiones de *Lucas* se mostraron en la expresión (A3.12).

Donde el factor  $F_p^0$  se presentó como coeficiente de corrección para polaridad, en función del momento dipolar reducido,  $\mu_r$ ; calculado a partir de la ecuación (A3.12.4) para cada componente en función de su momento dipolar,  $\mu$ . El factor  $F_Q^0$  prestaba corrección a desviaciones cuánticas para el caso de gases como el hidrógeno, helio o deuterio. A la sazón se consideró igual a la unidad, puesto que no era requerida, en el capítulo primero ni en sucesivos, corrección

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

por efecto cuántico. Finalmente,  $\xi$  se definió como viscosidad reducida inversa y se calculó por la ecuación (A3.12.2), introduciendo las variables en las unidades especificadas.

Se listan a renglón seguido las propiedades necesarias para el cálculo de (A3.12):

Propiedades de compuestos puros			
$\mu_1$ (debyes)	0,3	$PM_1$ (g/mol)	56,108
$\mu_2$ (debyes)	0,0	$PM_2$ (g/mol)	54,092

Tabla. A3.CCLXXI. Propiedades requeridas por la ecuación (A3.12)

Con las que pueden calcularse tanto el momento dipolar reducido, como la viscosidad reducida inversa, haciendo uso de las ecuaciones (A3.12.4) y (A3.12.2) respectivamente; así como de las tablas A3.CCLVIII, A3.CCLXVI, (cambiando unidades) y A3.CCLXXI:

$\mu_{r1}$	0,0011	$\xi_1$ ( $\mu P^{-1}$ )	$5,48 \cdot 10^{-3}$
$\mu_{r2}$	0,0000	$\xi_2$ ( $\mu P^{-1}$ )	$5,32 \cdot 10^{-3}$

Tabla. A3.CCLXXII. Aplicación de (A3.12.4) y (A3.12.2)

A la luz de los momentos dipolares reducidos aportados por la Tabla. A3.CCLXXII, y según las expresiones (A3.12.3), se aplicará, la primera expresión a los dos, (esto es, no recibirán corrección por polaridad). Con estas expresiones y los datos de las tablas A3.CCLVIII y A3.CCLXIV, se tienen los siguientes factores de corrección para cada una de las corrientes:

$F_{P1}^0$	1,0000	$F_{P1}^0$	1,0000	$F_{P1}^0$	1,0000
$F_{P2}^0$	1,0000	$F_{P2}^0$	1,0000	$F_{P2}^0$	1,0000
<b>Destilado</b>		<b>Alimentación</b>		<b>Residuo</b>	

Tabla. A3.CCLXXIII. Factores de corrección para el método de *Lucas*

Finalmente, con los datos de las tablas A3.CCLXXII a A3.CCLXXIII y nuevamente, A3.CCLXIV, se estiman las viscosidades de los compuestos puros en cada corriente aplicando (A3.12.1):

	$\mu_1$ ( $\mu\text{P}$ )	$\mu_2$ ( $\mu\text{P}$ )
<b>Destilado</b>	78,857	80,074
<b>Plato alimentación</b>	79,156	80,378
<b>Residuo</b>	79,382	80,608

Tabla. A3.CCLXXIV. Estimación de viscosidad de los compuestos puros

La viscosidad de la mezcla se estima por aplicación del método de *Wilke*, tal como figura *ut supra* y se mostró en (A1.13). Su desarrollo para un sistema binario produce:

$$\mu_v = \frac{y_1\mu_1}{y_1 + y_2\phi_{12}} + \frac{y_2\mu_2}{y_2 + y_1\phi_{21}}$$

Se han eliminado directamente los  $\phi_{ii}$ , tal como indica (A3.13.2.3).

El cálculo de los coeficientes  $\phi_{ij}$  mediante la ecuación (A3.13.2.1) y los datos de las tablas A3.CCLXXI y A3.CCLXXIV, se tabula a continuación:

	$\phi_{12}$
<b>Destilado</b>	0,974
<b>Plato alimentación</b>	0,974
<b>Residuo</b>	0,974

Tabla. A3.CCLXXV. Determinación de los  $\phi_{ij}$

El cálculo de los coeficientes  $\phi_{ji}$  mediante la ecuación (A3.13.2.2) y los datos de las tablas A3.CCLXXI, A3.CCLXXIV y A3.CCLXXV, se tabula a continuación:

	$\phi_{21}$
<b>Destilado</b>	1,026
<b>Plato alimentación</b>	1,026
<b>Residuo</b>	1,026

Tabla. A3.CCLXXVI. Determinación de los  $\phi_{ji}$

Finalmente, el cálculo de las viscosidades de la fase vapor, haciendo uso de las tablas A3.CCLVII, A3.CCLXXIV y A3.CCLXXV a

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

A3.CCLXXVI, por aplicación del desarrollo de la ecuación (A3.13.1), (cambiando unidades); queda recogido en la tabla siguiente:

	$\mu_v$ (cP)
Destilado	0,0079
Plato alimentación	0,0080
Residuo	0,0081

Tabla. A3.CCLXXVII. Estimación de las viscosidades de fase vapor

### A3.C4.2.5. Tensión superficial de corrientes

Se empleará la correlación, tomada del libro de *Reid*, de *Macleod-Sugden* para la determinación de tensiones superficiales de mezclas no acuosas. Se mostró en la expresión (A3.14), válida para este caso cuando el sumatorio se trunca para dos componentes.

El único término no tabulado con anterioridad es  $[P_i]$ , el “parachor” de cada sustancia. Se trata de un término de unidades  $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{1/4} / \text{s}^{1/2}$ , relativo a la tensión superficial e inmanente a cada especie. Su puede determinar mediante un método de contribución de grupos denominado de *Sugden*.

En la siguiente tabla se listan los grupos contribuyentes de cada especie, su número y el parachor final calculado como suma de las contribuciones individuales:

Componente	Grupos	Contribución	Número	$[P_i]$
1	CH <sub>3</sub>	55,5	1	179,1
	CH <sub>2</sub> en -(CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> (n < 12)	40,0	1	
	Enlace etilénico terminal	19,1	1	
	C	9,0	2	
	H	15,5	3	
2	Enlace etilénico terminal	19,1	2	167,2
	C	9,0	4	
	H	15,5	6	

Tabla. A3.CCLXXVIII. Determinación de parachors por contribución de grupos

Con lo anterior, se está en condiciones de estimar la tensión superficial de cada corriente, haciendo uso de los datos ya tabulados en A3.CCLVI a A3.CCLVII, A3.CCLX, A3.CCLXX y A3.CCLXXVIII; por aplicación de la ecuación (A3.14):

	$\sigma$ (dyn/cm)
Destilado	11,495
Plato alimentación	12,452
Residuo	12,467

Tabla. A3.CCLXXIX. Estimación de las tensiones superficiales

#### A3.C4.2.6. Difusividad del clave ligero en fase líquida

El episodio de determinación de propiedades concluye con la estimación de la difusividad del clave ligero en fase líquida. Tal como se menciona en la primera sección de este capítulo, el clave ligero, a la sazón, se considera el componente 1-buteno. La estimación empleará la ecuación del método de *Wilke-Chang* modificada por *Perkins* y *Geankoplis*, tomada del libro de *Reid*, para difusión de un componente en una mezcla líquida:

$$(A3.71) \left\{ \begin{array}{l} \mathcal{D}_{1,m} (\text{cm}^2/\text{s}) = 7,4 \cdot 10^{-8} \frac{T_L \sqrt{\varphi PM}}{\mu_L V_{b1}^{0,6}} (1) \\ \varphi PM = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 1}}^n x_j \varphi_j PM_j = x_2 \varphi_2 PM_2 (2) \\ \text{con } T_L \text{ en K, } PM \text{ en g/mol, } \mu_L \text{ en cP y } V_{b1} \text{ en cm}^3/\text{mol} \end{array} \right.$$

Donde  $\mathcal{D}_{1,m}$ , es la difusividad del clave ligero, (1-buteno), en la mezcla líquida. La ecuación requiere valores de  $\varphi$  y de  $V_{b1}$ . El resto de magnitudes y propiedades han sido estimadas en apartados anteriores. En el sumatorio (A3.65.2), no se considera la contribución del clave ligero.

Por una parte,  $\varphi$ , corresponde al factor de asociación de los distintos componentes. Se recomienda una serie de valores para distintos solventes entre los que no se encuentran los componentes invo-

lucrados. Para este caso, el método prevé emplear el valor de la unidad, por lo que  $\varphi_j = 1$ .

Por otra parte,  $V_{b1}$ , es el volumen molar del clave ligero a su temperatura de ebullición. Para estimar esta propiedad será necesario recurrir a la expresión de *Tyn y Calus*, en función del volumen crítico, tomada del libro de *Reid* y notada como ecuación (A3.16).

Presentadas las ecuaciones, puede procederse al desarrollo del cálculo. Haciendo uso de los datos consignados en la Tabla A3.CCLVIII, aplicando (A3.16) y cambiando unidades se determina:

$V_{b1}$ (cm <sup>3</sup> /mol)	63,871
---------------------------------	--------

Tabla. A3.CCLXXX. Volumen molar del clave ligero a su T de ebullición

Empleando los datos tabulados en A3.CCLVI, A3.CCLXXI, A3.CCLXIII y A3.CCLXXX y aplicando (A3.71.2) y (A3.71.1) sucesivamente, se estiman las difusividades requeridas para cada corriente:

	$\varphi_{PM}$	$D_{1m}$ (cm <sup>2</sup> /s)
<b>Destilado</b>	13,415	<b>4,795·10<sup>-5</sup></b>
<b>Plato alimentación</b>	44,877	<b>8,933·10<sup>-5</sup></b>
<b>Residuo</b>	54,048	<b>9,943·10<sup>-5</sup></b>

Tabla. A3.CCLXXXI. Difusividades del clave ligero en fase líquida

### **A3.C4.3. Diseño hidráulico**

El diseño hidráulico de columna tiene por objeto el dimensionamiento de la misma, esto es, la obtención del diámetro de platos, sus áreas características, disposición de sus elementos, (válvulas, campanas o perforaciones), pérdidas de carga, eficacia, tipo y pasos y un largo etcétera que se desgranará en la presente sección.

El primer aspecto que debe decidirse es el tipo de plato que se empleará. Por simplicidad de diseño, disponibilidad de ecuaciones

suficientes en la bibliografía y coste económico más asequible, los platos de utilidad en este diseño serán: **Platos perforados**.

Son estos los platos de uso más extendido en el diseño de columnas de destilación y, sólo en el caso de que los requerimientos hidráulicos de los fluidos en juego superasen las prestaciones de los platos perforados, se plantearía la posibilidad de diseñar otro tipo de etapa de separación.

Dilucidado este primer aspecto se efectuará el siguiente procedimiento de cálculo:

- Recopilación y conversión de datos y propiedades.
- Determinación gráfica del número de pasos por columna.
- Estimación de dimensiones previas.
- Fijación de los límites de operación.
- Cálculo reiterado de áreas de columna y otras dimensiones.
- Verificaciones de las magnitudes calculadas con los límites de operación.
- Estimación de las pérdidas de carga.

Se estudiará la hidráulica de la columna en tres zonas diferenciadas y para las que previamente se han estimado sus propiedades físicas:

- Plato primero o de destilado.
- Plato de alimentación.
- Plato último o de residuo.

A lo que cabe establecer el siguiente matiz. Dado que el método FUG no proporciona un perfil de composiciones a lo largo de la columna, no se tendrá en cuenta el hecho de que el último plato de columna corresponde al rehervidor o calderín, y se efectuarán los cálculos para diseño hidráulico considerando esta última etapa de equilibrio dentro de la columna. (Véase justificación en el capítulo primero).

El plato de alimentación es un punto crítico de la columna, y por ello se estudia su funcionamiento hidráulico, ya que supone la inserción de una corriente líquida a la operación, (la alimentación), lo que modifica ostensiblemente las condiciones de funcionamiento de la operación. Asimismo, se estudia el funcionamiento del plato de destilado, o primer plato de columna, que, pese a soportar *a priori* condiciones de funcionamiento más benignas que, por ejemplo, el primer plato de la sección de rectificación; es el plato que recibe el reflujo y, por ende está sometido a un choque de fluidos severo.

Dado que los platos seleccionados soportan las condiciones más exigentes, los datos arrojados por dichos puntos de operación, permitirán caracterizar las distintas zonas de columna, esto es, permitirán decidir si debe construirse la torre con distintos diámetros, además de, junto a la eficacia global; decidir si la altura final de la torre requiere segregar el tren de separación en varias columnas.

#### A3.C4.3.1. Recopilación y conversión de datos y propiedades

En este primer apartado, se consignarán en tablas los valores de las propiedades involucradas en los cálculos, que se realizarán en el siguiente y sucesivos apartados. Todos estos datos han sido dados en tablas correspondientes a la sección anterior, a excepción del peso molecular promedio, para el que es de aplicación la expresión (A3.17) hasta el tercer componente; obteniéndose  $PM_L$  y  $PM_V$ , los pesos moleculares en g/mol, ponderados a sus respectivas composiciones, del líquido y el vapor.

Tomando datos de las tablas A3.CCLX, A3.CCLXX, A3.CCLV a A3.CCLVII, A3.CCLXIII, A3.CCLXXVII y A3.CCLXXIX y aplicando (A3.17) sobre A3.CCLXXII, se recopilan las siguientes tablas:

**Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas**

Documento 1. Anexos a la memoria

<b>Propiedades y composición del destilado</b>			
$\rho_L$ (mol/L)	10,534	$\rho_L$ (kg/m <sup>3</sup> )	585,800
$\rho_V$ (mol/L)	0,081	$\rho_V$ (kg/m <sup>3</sup> )	4,520
L (kmol/h)	2629,503	$\mu_L$ (cP)	0,139
V (kmol/h)	2683,166	$\mu_V$ (cP)	0,008
(L/V)	0,980	$\sigma$ (dyn/cm)	11,495
$x_1$	0,752	$y_1$	0,752
$x_2$	0,248	$y_2$	0,248
<b>PM (g/mol) (líquido)</b>		<b>PM (g/mol) (vapor)</b>	
55,608		55,608	

Tabla. A3.CCLXXXII. Propiedades y composición. Corriente del primer plato

<b>Propiedades y composición de la corriente del plato de alimentación</b>			
$\rho_L$ (mol/L)	11,191	$\rho_L$ (kg/m <sup>3</sup> )	609,182
$\rho_V$ (mol/L)	0,090	$\rho_V$ (kg/m <sup>3</sup> )	4,917
L (kmol/h)	2867,370	$\mu_L$ (cP)	0,137
V (kmol/h)	2683,166	$\mu_V$ (cP)	0,008
(L/V)	1,069	$\sigma$ (dyn/cm)	12,452
$x_1$	0,170	$y_1$	0,187
$x_2$	0,830	$y_2$	0,813
<b>PM (g/mol) (líquido)</b>		<b>PM (g/mol) (vapor)</b>	
54,435		54,469	

Tabla. A3.CCLXXXIII. Propiedades y composición. Corriente del plato de alimentación

<b>Propiedades y composición de la corriente del último plato</b>			
$\rho_L$ (mol/L)	11,369	$\rho_L$ (kg/m <sup>3</sup> )	614,992
$\rho_V$ (mol/L)	0,131	$\rho_V$ (kg/m <sup>3</sup> )	7,103
L (kmol/h)	2867,370	$\mu_L$ (cP)	0,136
V (kmol/h)	2683,166	$\mu_V$ (cP)	0,008
(L/V)	1,069	$\sigma$ (dyn/cm)	12,467
$x_1$	0,001	$y_1$	0,001
$x_2$	0,999	$y_2$	0,999
<b>M (g/mol) (líquido)</b>		<b>M (g/mol) (vapor)</b>	
54,094		54,094	

Tabla. A3.CCLXXXIV. Propiedades y composición. Corriente del último plato

Las densidades en unidades SI se han obtenido multiplicando las molares por los pesos moleculares promedio.

### A3.C4.3.2. Determinación gráfica del número de pasos por columna

La decisión del número de pasos se toma a partir de la gráfica\* mostrada en la Figura A3.1, que liga el flujo del líquido en galones estadounidenses por minuto (gpm) con el diámetro en pies de la columna. En las siguientes tablas se listan las variables convertidas a las unidades requeridas:

<b>Determinación de pasos: Plato de destilado</b>			
$Q_L$ (m <sup>3</sup> /s)	0,069	$Q_L$ (gal (US)/min)	1098,999
T (m)	7	T (ft)	22,966
<b>Nº de pasos (p)</b>		<b>2</b>	

Tabla. A3.CCLXXXV. Determinación de los pasos en la zona de rectificación

<b>Determinación de pasos: Plato de alimentación</b>			
$Q_L$ (m <sup>3</sup> /s)	0,071	$Q_L$ (gal (US)/min)	1128,117
T (m)	6,5	T (ft)	21,325
<b>Nº de pasos (p)</b>		<b>2</b>	

Tabla. A3.CCLXXXVI. Determinación de los pasos por el plato de alimentación

<b>Determinación de pasos: Plato de residuo</b>			
$Q_L$ (m <sup>3</sup> /s)	0,070	$Q_L$ (gal (US)/min)	1110,443
T (m)	6,5	T (ft)	21,325
<b>Nº de pasos (p)</b>		<b>2</b>	

Tabla. A3.CCLXXXVII. Determinación de los pasos por el plato de residuo

Donde el caudal de líquido,  $Q_L$ , se ha transformado de términos molares, como venía dado en las tablas A3.CCLXXXII a A3.CCLXXXIV, a términos volumétricos teniendo en cuenta (A3.18.1). El diámetro de columna se ha tomado de la reiteración del cálculo de áreas, que se mostrará en apartados ulteriores.

Finalmente, el número de pasos se ha decidido según la gráfica de la Figura A3.1, aplicando los datos de las tres tablas precedentes.

\* Operaciones de separación por etapas de equilibrio en Ingeniería Química. E. J. Henley, H. D. Seader. Reverté, año 2000.

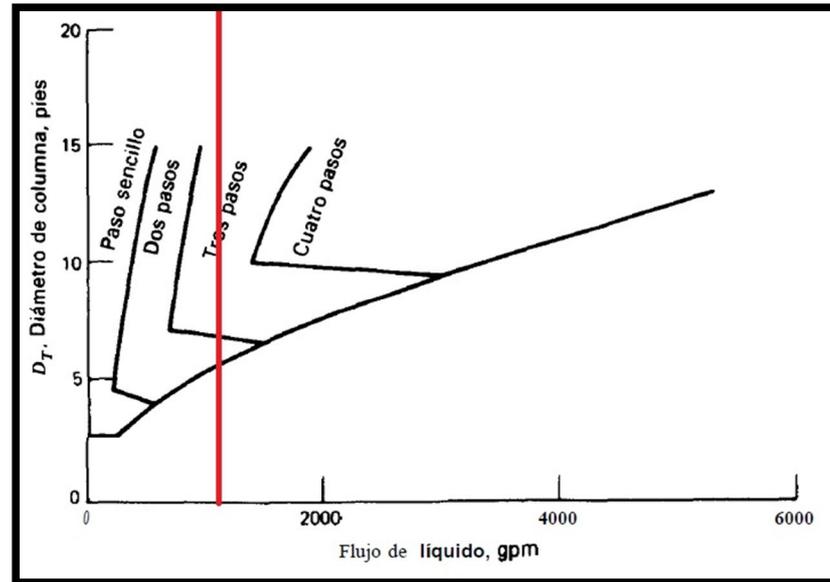


Figura. A3.23. Estimación del número de pasos según recomendaciones de la Koch Engineering Company. (E. J. Henley, J. D. Seader, 1999)

Donde la curva representa indistintamente cualquiera de los tres platos críticos. Se observa que la estimación queda fuera de escala a causa del elevado diámetro requerido. No obstante, dado que la Figura A3.19 permite efectuar una aproximación al número de pasos, se han tomado estos por extrapolación, ya que la comprobación rigurosa del funcionamiento de columna se verifica en próximos apartados.

#### A3.C4.3.3. Estimación de dimensiones previas

Como se especificó al inicio de la presente sección, los platos seleccionados para el desempeño de la operación en cuestión, son platos perforados. Las dimensiones previas requeridas para el cálculo de las distintas áreas y pérdidas de carga son las que siguen:

- Diámetro de las perforaciones, ( $d_0$ ).
- Separación y distribución de las perforaciones: pitch, ( $p'$ ).
- Razón de espesor del plato a diámetro de orificio, ( $e/d_0$ ).
- Espaciado entre platos, ( $t$ ).
- Razón de área de perforaciones a área activa, ( $A_0/A_a$ ).

Según artículos de investigación consultados\*, está probado que para un diámetro de perforaciones menor se tiene una buena mezcla entre fases mejorándose de esta forma la separación. De esta forma y atendiendo a la Figura A3.2, considerando que el material seleccionado es acero al carbono, (por los motivos que se argumentarán en los capítulos de diseño mecánico), el menor diámetro para el que se dispone de razón  $e/d_0$  es de 9 mm, siendo éste, por consiguiente el diámetro seleccionado.

La relación  $e/d_0$  correspondiente es 0,50.

Con el diámetro de las perforaciones decidido, debe plantearse cuál es la distribución oportuna de las mismas. Según criterios de diseño de torres de platos consultadas en el libro de *Treybal*, tal distribución corresponde a aquella donde las perforaciones se colocan en los vértices de triángulos equiláteros, disposición ésta denominada al tresbolillo, que se logra perforando el área activa del plato en filas de orificios equidistantes, que estarán desfasadas, una a una, media distancia entre orificios, de modo que coincidan las filas alternas.

Usualmente, la distancia entre centros de orificios, también conocida como pitch, ( $p'$ ), debe estar comprendida entre 2,5 y 5 veces el diámetro de los mismos. Como valor intermedio, se tomará 4 veces el diámetro de orificio, como se indicó en (A3.19). Se tiene:

$$p' = 4 \cdot 9 = 36 \text{ mm}$$

El espaciado entre platos es uno de los parámetros económicos de mayor peso en la toma de decisiones vinculada al diseño de las columnas de platos. Un espaciado elevado aumenta la altura de la unidad de separación, si bien mejora las condiciones de flujo, lo que se traduce en una disminución del diámetro de la columna. A la sazón, atendiendo a la bibliografía, se dispone de la tabla dada por la Figura A3.3.

\* Simulación del comportamiento hidráulico en platos perforados para la destilación de mezclas binarias mediante CFD. M. A. Rodríguez-Ángeles, A. R. Uribe Ramírez. Revista Enlace Químico, n° 10, marzo 2008.

Para el diámetro mínimo, (correspondiente a la zona de agotamiento), tomado de la tabla A3.CCLXXXVII, el espaciado requerido es el máximo, de 0,90 m. Éste será por tanto el espaciado entre platos para toda la columna.

Por último, para una disposición al tresbolillo, la bibliografía, (libro de *Treybal*), recomienda para la razón área de orificios a área activa la expresión (A3.20), cuya aplicación, sobre y con los datos ya presentados en este apartado, se presentó en la Tabla A3.XXXVII, válida para el caso presente:

Dimensiones previas			
$d_0$ (mm)	9	$p'$ (mm)	36
$e/d_0$	0,5	$t$ (m)	0,9
	$A_0/A_a$	0,057	

Tabla A3.XXXVII. Dimensiones previas para las distintas zonas de columna

#### A3.C4.3.4. Fijación de los límites de operación

En este apartado se determinará el límite superior de la velocidad del vapor, ya que la velocidad mínima, también conocida como velocidad de lloriqueo, precisa de ciertos datos aún no dilucidados, lo que obliga a posponer su cálculo a posteriores apartados.

La velocidad de inundación, límite superior para el flujo del vapor, viene dada a partir de las expresiones\* (A3.21) a (A3.22).

Éstas requieren datos de tensión superficial, (en unidades SI, N/m), densidades de líquido y vapor y sus caudales, razón de área de perforaciones a área activa y espaciado de platos. Tales datos, se encuentran en las tablas A3.XXXVII y A3.CCLXXXII a A3.CCLXXXIV. Aplicando (A3.22.2), (A3.22.3), (A3.22.4), (A3.22.1) y (A3.21) sucesivamente, se obtiene el límite superior de flujo:

\* Tomadas del libro "Operaciones de transferencia de masa". R. E. *Treybal*. McGraw-Hill. 2ª Edición.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Límite superior de operación: Zona de rectificación			
PF	0,086	$\alpha$ (m)	0,062
	<b>0,1</b>	$\beta$ (m)	0,033
$C_F$ (m/s)	0,035	$v_F$ (m/s)	<b>0,398</b>
% permisible $v_F$	78	$v$ (m/s)	<b>0,311</b>

Tabla. A3.CCLXXXVIII. Límite superior de operación. Zona de rectificación

Límite superior de operación: Plato de alimentación			
PF	0,096	$\alpha$ (m)	0,062
	<b>0,1</b>	$\beta$ (m)	0,033
$C_F$ (m/s)	0,035	$v_F$ (m/s)	<b>0,388</b>
% permisible $v_F$	78	$v$ (m/s)	<b>0,303</b>

Tabla. A3.CCLXXXIX. Límite superior de operación. Plato de alimentación

Límite superior de operación: Zona de agotamiento			
PF	0,115	$\alpha$ (m)	0,062
	<b>0,115</b>	$\beta$ (m)	0,033
$C_F$ (m/s)	0,034	$v_F$ (m/s)	<b>0,311</b>
% permisible $v_F$	78	$v$ (m/s)	<b>0,242</b>

Tabla. A3.CCXC. Límite superior de operación. Zona de agotamiento

Debe señalarse que en este capítulo se está a las matizaciones que fueron referidas en el primero sobre aspectos tales como: valor final del parámetro de flujo, corrección de los coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$  y velocidad permitida del vapor según la expresión (A3.23).

### A3.C4.3.5. Cálculo reiterado de áreas de columna y otras dimensiones

La descripción de los platos empleados en cada zona requiere el cálculo de las distintas áreas que se enumeran a continuación.

- Área total o de plato, ( $A_t$ ).
- Área de vertederos, ( $A_v$ ).
- Área neta, ( $A_n$ ).
- Área activa o de burbujeo, ( $A_a$ ).
- Área de vigas, ( $A_{vig}$ ).

- Área de perforaciones, ( $A_0$ ).

Todas ellas han sido empleadas anteriormente por lo que se omite la descripción en detalle y se presenta el procedimiento de cálculo.

- Se halla el caudal de vapor en cada región de columna, empleando los datos consignados en las tablas A3.CCLXXXII a A3.CCLXXXIV y aplicando (A3.18.2). (Será necesario convertir a unidades SI).
- Se calcula el área neta en una primera aproximación teniendo en cuenta (A3.30), con  $Q_v$  el caudal de vapor en  $m^3/s$  y  $v$ , la velocidad admisible del vapor en  $m/s$ , tomada de las tablas A3.CCLXXXVIII a A3.CCXC.
- Se seleccionan las relaciones  $W/T$  y  $x/T$  de la Figura A3.6.
- Se calcula la razón  $A_v/A_t$  empleando la expresión, tomada del libro de *Treybal*, (A3.31).
- Se determina el área de torre por aplicación de (A3.32).
- Con el área de la torre disponible, puede hallarse el diámetro según (A3.33).
- En función del diámetro obtenido, se selecciona el valor comercial que se requerirá: el menor posible que verifique las comprobaciones hidráulicas y de pérdidas de carga que se presentan en apartados ulteriores.

El procedimiento descrito se recoge en las siguientes tablas para cada zona de columna.

Cálculo previo: Zona de rectificación			
$Q_v (m^3/s)$	9,169	$A_n (m^2)$	29,510
$W/T$	0,7	$A_v/A_t$	0,088
$x/T$	0,3562	$A_t (m^2)$	35,787
$T (m)$	6,750	$T (m)$	7

Tabla. A3.CCXCI. Cálculo previo de áreas para la zona de rectificación

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

<b>Cálculo previo: Plato de alimentación</b>			
$Q_v$ (m <sup>3</sup> /s)	8,257	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	<b>27,254</b>
$W/T$	0,7	$A_v/A_t$	0,088
$x/T$	0,3562	$A_t$ (m <sup>2</sup> )	<b>33,051</b>
$T$ (m)	<b>6,487</b>	$T$ (m)	<b>6,5</b>

Tabla. A3.CCXCI. Cálculo previo de áreas para el plato de alimentación

<b>Cálculo previo: Zona de agotamiento</b>			
$Q_v$ (m <sup>3</sup> /s)	5,676	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	<b>23,425</b>
$W/T$	0,7	$A_v/A_t$	0,088
$x/T$	0,3562	$A_t$ (m <sup>2</sup> )	<b>28,407</b>
$T$ (m)	<b>6,014</b>	$T$ (m)	<b>6,5</b>

Tabla. A3.CCXCI. Cálculo previo de áreas para la zona de agotamiento

Una vez decidido el diámetro de columna, debe reiterarse el cálculo del área total y neta, así como determinarse las distintas dimensiones detalladas en este apartado. El procedimiento es el siguiente:

- Se recalcula el área total empleando los diámetros  $T$  seleccionados, dados en las tablas A3.CCXCI a A3.CCXCI, y aplicando (A3.24).
- Se determina el área de vertederos multiplicando el área total recalculada por la relación  $A_v/A_t$ , dada en las mismas tablas del guión anterior.
- Se recalcula el área neta por aplicación de (A3.25) y empleando los datos calculados en los guiones anteriores y el número de pasos según tablas A3.CCLXXXV a A3.CCLXXXVII.
- Se determina el área activa aplicando (A3.26) a los datos recalculados y al número de pasos.
- Se determina el área de las vigas por aplicación de (A3.27) a los datos obtenidos en estos guiones.

- Se determina el área de las perforaciones multiplicando el área activa, recién calculada, por la razón de área de perforaciones a área activa recogida en la Tabla A3.XXXVII.
- Se obtiene W, multiplicando la relación W/T seleccionada por el diámetro T comercial. Los datos se encuentran en las tablas A3.CCXCI a A3.CCXCIII.
- Se obtiene x, de forma similar, multiplicando la relación x/T seleccionada por el diámetro T comercial. Los datos se encuentran de nuevo en las tablas A3.CCXCI a A3.CCXCIII.
- Se obtiene Z, aplicando (A3.28) a los datos dilucidados en los dos guiones anteriores, según el número de pasos.
- Se obtiene e, multiplicando el diámetro de orificio consignado en la Tabla A3.XXXVII por la razón de espesor de plato a diámetro de orificio, dada en la misma tabla.
- Se obtiene o, por aplicación de (A3.29) a los datos de guiones anteriores.

Los resultados obtenidos al seguir el procedimiento anterior se consignan en las siguientes tablas:

<b>Áreas y otras dimensiones: Zona de rectificación</b>			
$A_t$ (m <sup>2</sup> )	38,485	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	31,735
$A_v$ (m <sup>2</sup> )	3,375	$A_a$ (m <sup>2</sup> )	22,587
$A_{vig}$ (m <sup>2</sup> )	9,148	$A_o$ (m <sup>2</sup> )	1,280
W (m)	4,9	x (m)	2,4934
Z (m)	3,9802	e (m)	0,0045
	o		20127

Tabla. A3.CCXCIIV. Cálculo de áreas y dimensiones para la zona de rectificación

<b>Áreas y otras dimensiones: Plato de alimentación</b>			
$A_t$ (m <sup>2</sup> )	33,183	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	27,363
$A_v$ (m <sup>2</sup> )	2,910	$A_a$ (m <sup>2</sup> )	19,476
$A_{vig}$ (m <sup>2</sup> )	7,887	$A_o$ (m <sup>2</sup> )	1,104
W (m)	4,55	x (m)	2,3153
Z (m)	3,6959	e (m)	0,0045
	o		17354

Tabla. A3.CCXCV. Cálculo de áreas y dimensiones para el plato de alimentación

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Áreas y otras dimensiones: Zona de agotamiento			
$A_t$ (m <sup>2</sup> )	33,183	$A_n$ (m <sup>2</sup> )	27,363
$A_v$ (m <sup>2</sup> )	2,910	$A_a$ (m <sup>2</sup> )	19,476
$A_{vig}$ (m <sup>2</sup> )	7,887	$A_o$ (m <sup>2</sup> )	1,104
$W$ (m)	4,55	$x$ (m)	2,3153
$Z$ (m)	3,6959	$e$ (m)	0,0045
	o	17354	

Tabla. A3.CCXCVI. Cálculo de áreas y dimensiones para la zona de agotamiento

### A3.C4.3.6. Verificaciones de las magnitudes calculadas con los límites de operación

Con la columna dimensionada, esto es, determinados en apartados precedentes tanto el diámetro de columna, como las distintas dimensiones de los platos y el espaciado de los mismos, se hace preciso constatar si el funcionamiento hidráulico es acorde a los límites fijados.

A este fin se dedica el presente apartado donde se realizarán las siguientes verificaciones:

- Verificación de inundación.
- Verificación de derrame o lloriqueo.
- Verificación de descarga.
- Verificación de arrastre fraccional.
- Verificación de máxima carga en vertederos.

Una vez se ha detallado en el capítulo primero el fundamento teórico de las verificaciones de rigor, se practican los cálculos pertinentes y se comprueba que se satisfacen las condiciones descritas. A este fin se sigue el procedimiento que se presenta a renglón seguido.

- Se calculan las distintas magnitudes requeridas:  $v_v$ , aplicando (A3.34) sobre los datos dados en las tablas A3.CCXCI a A3.CCXCIII y A3.CCXCIV a A3.CCXCVI;  $v_{vm}$  y  $v_o$ , aplicando,

respectivamente, (A3.35) y (A3.36) a los datos en A3.CCLXXXII a A3.CCLXXXIV, A3.XXXVII y A3.CCXCIV a A3.CCXCVI, ( $g_c$  se toma como la unidad al trabajar en unidades SI);  $v_{Lv}$  aplicando (A3.37) a los datos proporcionados por A3.CCLXXXV a A3.CCLXXXVII y A3.CCXCIV a A3.CCXCVI; y  $Q_{Lv}$ , aplicando (A3.38) a los datos en las mismas tablas que  $v_{Lv}$ .

- Se cotejan las magnitudes recién obtenidas con los valores de las variables límite consignadas en el apartado homólogo al actual del primer capítulo:  $v_v$  menor que  $v$ ,  $v_{vm}$  menor que  $v_0$ ,  $v_{Lv}$  menor que 0,12 m/s,  $Q_{Lv}$  menor que 0,030 m<sup>3</sup>/m·s.
- Se verifica gráficamente que el arrastre fraccional es inferior al 10%, para la curva de velocidad permitida del 78%. Véase nuevamente la Figura A3.7, válida para el caso presente a tenor de los parámetros de flujo encontrados y tabulados en A3.CCLXXXVIII a A3.CCXC.

Se aplica este procedimiento a las distintas zonas de columna y se decide si el proceso de cálculo ha sido correcto hasta el presente punto.

Verificaciones: Zona de rectificación					
Inundación	$v_v$ (m/s)	0,289	$v$ (m/s)	0,311	Verificado
Lloriqueo	$v_{vm}$ (m/s)	0,569	$v_0$ (m/s)	7,161	Verificado
Descarga	$v_{Lv}$ (m/s)	0,021	Arrastre fraccional	0,026	Verificados
Máx. carga en vertedero	$Q_{Lv}$ (m <sup>3</sup> /m·s)			0,014	Verificado

Tabla. A3.CCXC VII. Verificaciones para la zona de rectificación

Verificaciones: Plato de alimentación					
Inundación	$v_v$ (m/s)	0,302	$v$ (m/s)	0,303	Verificado
Lloriqueo	$v_{vm}$ (m/s)	0,574	$v_0$ (m/s)	7,478	Verificado
Descarga	$v_{Lv}$ (m/s)	0,024	Arrastre fraccional	0,026	Verificados
Máx. carga en vertedero	$Q_{Lv}$ (m <sup>3</sup> /m·s)			0,016	Verificado

Tabla. A3.CCXC VIII. Verificaciones para el plato de alimentación

Verificaciones: Zona de agotamiento					
Inundación	$v_v$ (m/s)	0,207	$v$ (m/s)	0,242	Verificado
Lloriqueo	$v_{vm}$ (m/s)	0,436	$v_0$ (m/s)	5,141	Verificado
Descarga	$v_{Lv}$ (m/s)	0,024	Arrastre fraccional	0,02	Verificados
Máx. carga en vertedero	$Q_{Lv}$ (m <sup>3</sup> /m-s)			0,015	Verificado

Tabla. A3.CCXCIX. Verificaciones para la zona de agotamiento

Dado que todas las verificaciones se han satisfecho, puede procederse a calcular el último y no menos trascendente aspecto del diseño hidráulico: las pérdidas de carga por plato.

#### A3.C4.3.7. Estimación de las pérdidas de carga

Debido a la caída de presión que experimenta el líquido a su paso por el plato, motivada por los diferentes niveles de éste en el plato y el vertedero, es de esperar un cierto retroceso de líquido que, de estimarse excesivo, podría comprometer el adecuado funcionamiento hidráulico de la columna.

Un diseño seguro implica que la suma de alturas de líquido no supere la mitad del espaciado entre platos, como se muestra en la desigualdad (A3.54).

Se presenta el procedimiento de cálculos:

- Cálculo de  $h_w$ : Se aplica (A3.40) al espaciado de platos dado en la tabla A3.XXXVII.
- Cálculo de  $h_c$ : Se aplica el siguiente ciclo iterativo:
  - o Suponer un valor inicial para  $h_c$
  - o Calcular  $W_{ef}/W$  aplicando (A3.43), haciendo uso de los datos dados en las tablas A3.CCXCI a A3.CCXCIII y el valor de  $h_c$  supuesto.
  - o Se introduce  $W/W_{ef}$  supuesto en base a  $h_c$  inicial en (A3.42), junto con el caudal de líquido dado en las tablas A3.CCLXXXV a A3.CCLXXXVII. Se obtiene  $h_c$  calculado.

- Se cotejan los valores de  $h_c$  calculado con  $h_c$  inicial y caso de coincidir razonablemente, se ha dilucidado  $h_c$ . Caso contrario se empleará  $h_c$  calculado sucesivamente tal como se indica desde el punto segundo, hasta alcanzar la convergencia.
- Cálculo de  $h_B$ : Precisa el cálculo de  $h_{VAP}$  y  $h_E$ . A su vez,  $h_{VAP}$  comprende  $h_D$ ,  $h_L$  y  $h_R$ . Una vez calculados todos, como se indica a continuación, se aplica (A3.45).
  - Cálculo de  $h_D$ : Se obtienen  $Re_o$  y  $f$ , aplicando (A3.47.3) y haciendo uso de la Figura A3.24. Los datos para ello, vienen dados en las tablas A3.XXXVII, A3.CCLXXXII a A3.CCLXXXIV y A3.CCXCIV a A3.CCXCIX. Obtenido  $f$ , se calcula  $C_o$ , aplicando (A3.47.2) a datos de A3.XXXVII. Con lo anterior, (A3.47.1) y los datos dados en las tablas A3.CCLXXXII a A3.CCLXXXIV, A3.XXXVII y A3.CCXCIV a A3.CCXCVI; se aplica (A3.46).
  - Cálculo de  $h_L$ : Se aplica (A3.49.1) y (A3.49.2) a los datos dados en las tablas A3.CCXCIV a A3.CCXCVI. Con esto,  $h_w$  calculado en el primer guión y los datos dados en las tablas A3.CCLXXXII a A3.CCLXXXVII, se aplica (A3.48).
  - Cálculo de  $h_R$ : Se aplica (A3.50) a los datos (A3.47.1) y los consignados en las tablas A3.CCLXXXII a A3.CCLXXXIV y A3.XXXVII. Al trabajar en unidades SI,  $g_c$  adquiere valor unitario.
  - Cálculo de  $h_E$ : Debe decidirse el valor de  $A_{da}$ . Se aplica (A3.52) a  $h_w$  y a  $W$  dada en las tablas A3.CCXCIV a A3.CCXCVI. Se decide según (A3.53), atendiendo a  $A_v$ , dada en las mismas tablas. Se aplica (A3.51) a  $g$  dada en (A3.47.1), al caudal de líquido dado en las tablas A3.CCLXXXV a A3.CCLXXXVII y a  $A_{da}$  dilucidada.
- Se verifica (A3.54).

# Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

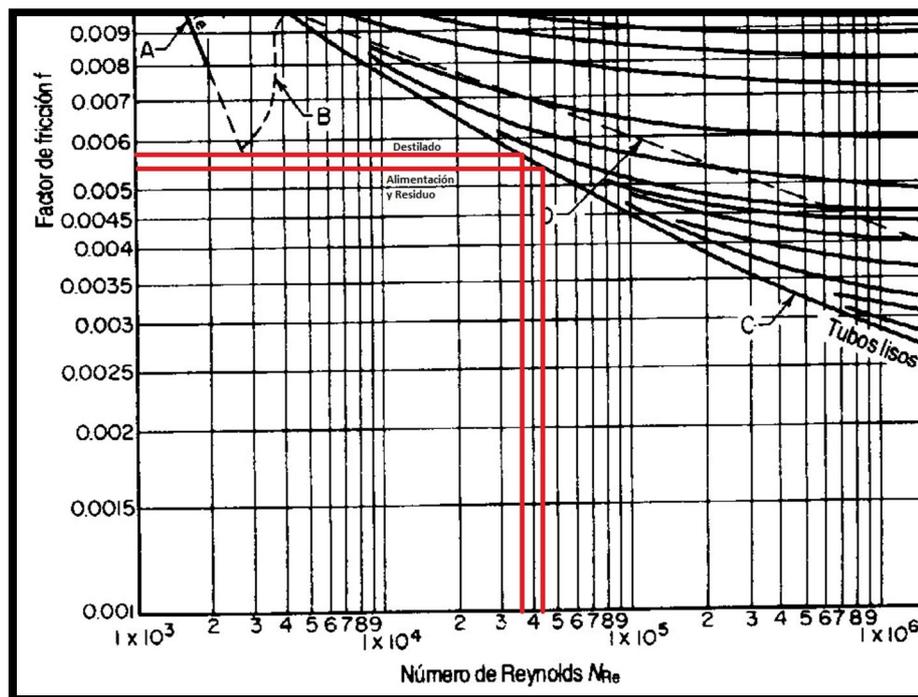


Figura. A3.24. Gráfico de *Moody*.

(Manual del Ingeniero Químico. R. H. Perry, D. W. Green, J. O. Maloney, 6ª Edición)

Las siguientes tablas muestran los resultados derivados de la aplicación del procedimiento.

Pérdidas de carga: Zona de rectificación			
$h_w$ (m)	0,09	$W_{ef}/W$	0,983
	$h_{ccalc}$ (m)	0,039	
$C_0$	1,296	$v_0$ (m/s)	7,161
$Re_0$	$3,68 \cdot 10^4$	$f$	0,0058
$4f$	0,0232	$h_D$ (m)	0,055
$v_a$ (m/s)	0,406	$z$ (m)	5,95
$h_L$ (m)	0,067	$h_R$ (m)	0,001
$A_L$ (m <sup>2</sup> )	0,319	$g$ (m/s <sup>2</sup> )	9,80665
$A_{da}$ (m <sup>2</sup> )	0,319	$h_E$ (m)	0,007
$h_{VAP}$ (m)	0,124	$h_B$ (m)	0,131
$\Delta$	0	Pérdidas (m)	0,260
<b>Verificado</b>			

Tabla. A3.CCC. Verificación de pérdidas de carga. Zona de rectificación

<b>Pérdidas de carga: Plato de alimentación</b>			
$h_w$ (m)	<b>0,09</b>	$W_{ef}/W$	0,981
	$h_{ccalc}$ (m)	<b>0,042</b>	
$C_0$	1,296	$v_0$ (m/s)	7,478
$Re_0$	$4,13 \cdot 10^4$	$f$	0,0055
$4f$	0,022	$h_D$ (m)	<b>0,063</b>
$v_a$ (m/s)	0,424	$z$ (m)	5,525
$h_L$ (m)	<b>0,067</b>	$h_R$ (m)	<b>0,001</b>
$A_L$ (m <sup>2</sup> )	0,296	$g$ (m/s <sup>2</sup> )	<b>9,80665</b>
$A_{da}$ (m <sup>2</sup> )	0,296	$h_E$ (m)	<b>0,009</b>
$h_{VAP}$ (m)	<b>0,132</b>	$h_B$ (m)	<b>0,140</b>
$\Delta$	<b>0</b>	Pérdidas (m)	<b>0,273</b>
<b>Verificado</b>			

Tabla. A3.CCCI. Verificación de pérdidas de carga. Plato de alimentación

<b>Pérdidas de carga: Zona de agotamiento</b>			
$h_w$ (m)	<b>0,09</b>	$W_{ef}/W$	0,981
	$h_{ccalc}$ (m)	<b>0,042</b>	
$C_0$	1,296	$v_0$ (m/s)	5,141
$Re_0$	$4,08 \cdot 10^4$	$f$	0,0055
$4f$	0,022	$h_D$ (m)	<b>0,043</b>
$v_a$ (m/s)	0,291	$z$ (m)	5,525
$h_L$ (m)	<b>0,070</b>	$h_R$ (m)	<b>0,001</b>
$A_L$ (m <sup>2</sup> )	0,296	$g$ (m/s <sup>2</sup> )	<b>9,80665</b>
$A_{da}$ (m <sup>2</sup> )	0,296	$h_E$ (m)	<b>0,009</b>
$h_{VAP}$ (m)	<b>0,114</b>	$h_B$ (m)	<b>0,123</b>
$\Delta$	<b>0</b>	Pérdidas (m)	<b>0,255</b>
<b>Verificado</b>			

Tabla. A3.CCCII. Verificación de pérdidas de carga. Zona de agotamiento

El nivel de la cresta del líquido sobre el vertedero,  $h_c$ , que se ha proporcionado, coincide con el valor del último  $h_c$  supuesto, a su vez coincidente con el calculado hasta la diezmillonésima.

La suma de las pérdidas, dada por (A3.54), no debe superar la mitad del espaciado asumido, a la sazón, 0,45 m. Se comprueba que no sucede en ninguna región de columna, de donde se concluye que el diseño hidráulico es el adecuado a los requerimientos.

#### **A3.C4.4. Decisiones finales de diseño hidráulico**

A lo largo de este anexo de cálculo, se ha caracterizado el flujo de líquido y vapor a través de la operación "BINARIA": se ha balanceado la unidad, determinado propiedades de corrientes, dimensionado columna y platos y verificado su funcionamiento hidráulico y pérdidas de carga.

Se hace precisa una última sección que determine aspectos fundamentales de construcción de la unidad, tales como el número real de platos, la diferenciación, si procede, de diámetros según zonas de la columna, la posición del plato de alimentación, altura, etc.

Estas decisiones finales no pueden acometerse sin conocerse la eficacia de la separación, que permitirá discriminar entre platos ideales calculados según el método FUG, en los capítulos correspondientes; y los platos reales requeridos.

Se dividirá esta sección final del capítulo en dos apartados:

- Determinación de eficacia por zonas.
- Decisión final de columna.

##### **A3.C4.4.1. Determinación de eficacia por zonas**

Como se indicó en el apartado homólogo del capítulo primero, se realizarán varias estimaciones de la eficacia de la columna, de modo que pueda compararse la validez de los métodos empleados. Se estimará la eficacia global según el método gráfico de *O'Connell* y también se diferenciará por zonas, haciendo uso de la correlación de *Van Winkle et al.* Finalmente, se corregirá la más baja de las efica-

cias según la tabla de *Lockhart* y *Leggett*, que afinan la predicción conservadora del primer autor.

Para el cálculo de la eficacia global, es de aplicación el ajuste mostrado en (A3.56), para el que se precisarán datos promediados de viscosidad y volatilidad relativa. La segunda se estima, siguiendo indicaciones del capítulo primero, mediante la expresión (A3.57) y los datos consignados en las tablas A3.CCLVI a A3.CCLVII. La primera se promedia entre cabeza y cola, (o destilado y residuo si se prefiere), de la Tabla A3.CCLXIII. Así, se obtiene:

Estimación de la eficacia global			
$\alpha_{\text{cabeza}}$	1	$\alpha_{\text{cola}}$	1,168
$\mu_{L, \text{cabeza}} \text{ (cP)}$	0,139	$\mu_{L, \text{cola}} \text{ (cP)}$	0,136
$\langle \alpha \mu \rangle \text{ (cP)}$	0,149	$E_o \text{ (\%)}$	<b>77,9</b>

Tabla. A3.CCCIII. Eficacia global de columna. Ajuste de *Eduljee*

La correlación\* de *Van Winkle et al.*, para estimación de la eficacia de plato, es una ecuación potencial de módulos adimensionales que ligan distintas variables asociadas al diseño de platos. Se presentó en (A3.58). Su aplicación requiere las ecuaciones (A3.59).

El cálculo de los grupos adimensionales de la anterior expresión precisa los siguientes datos:

- (A3.59.1): Aplicación de (A3.59.4) tomando datos de las tablas A3.CCXCI a A3.CCXCVI.
- (A3.59.2): Requiere datos de las tablas A3.CCLXXXII a A3.CCLXXXIV y A3.CCLXXXI.
- (A3.59.3): Aplicación de (A3.59.5), tomando datos de las tablas A3.CCXCVI a A3.CCXCVI. Una vez determinada (FA), se requerirán además datos de las tablas A3.CCLXXXII a A3.CCLXXXIV y A3.CCC a A3.CCCII, así como  $u_v$  del primer guión.

\* Véase libro de *Towler*.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Resuelto lo anterior, puede aplicarse (A3.58) y obtenerse las eficacias para los platos críticos de la columna: primer plato, o de destilado, plato de alimentación y último plato, o de residuo. Los resultados se consignan en las siguientes tablas:

<b>Estimación de la eficacia del plato primero</b>			
<b>Dg</b>	<b>345,993</b>	<b><math>u_v</math> (m/s)</b>	0,238
<b>Sc</b>	<b>49,643</b>	<b>FA</b>	0,033
<b>Re</b>	<b>20891,763</b>	<b>E</b>	<b>0,934</b>

Tabla. A3.CCCIV. Estimación de la eficacia del plato primero

<b>Estimación de la eficacia del plato de alimentación</b>			
<b>Dg</b>	<b>364,191</b>	<b><math>u_v</math> (m/s)</b>	0,249
<b>Sc</b>	<b>25,252</b>	<b>FA</b>	0,033
<b>Re</b>	<b>24082,891</b>	<b>E</b>	<b>0,803</b>

Tabla. A3.CCCV. Estimación de la eficacia del plato de alimentación

<b>Estimación de la eficacia del último plato</b>			
<b>Dg</b>	<b>536,357</b>	<b><math>u_v</math> (m/s)</b>	0,171
<b>Sc</b>	<b>22,223</b>	<b>FA</b>	0,033
<b>Re</b>	<b>24186,958</b>	<b>E</b>	<b>0,822</b>

Tabla. A3.CCCVI. Estimación de la eficacia del último plato

Como puede observarse, las eficacias de dichos platos críticos oscilan entre el 85%. La eficacia más baja corresponde al plato de alimentación y es próxima a la encontrada para la zona de agotamiento, representada por el último plato. Teniendo en consideración la similitud de carácter y propiedades químicas entre los compuestos involucrados, es de esperar que en la sección que afine más la composición, (a la sazón la de agotamiento para proporcionar una corriente cuasi pura), la eficacia sea menor.

Para concluir el primer apartado, se corregirá la predicción de la eficacia global, según la tabla de *Lockhart y Leggett*. La condición para esta corrección es que el producto promediado de la volatilidad relativa y la viscosidad esté comprendido entre 0,1 y 1 cP, como es el

caso. La tabla de corrección se incluyó en el capítulo primero bajo la denominación A3.LVII, por lo que se omite en el actual. Procediendo como en el citado primer capítulo se obtiene, para cada zona:

Corrección para rectificación		Corrección para agotamiento	
Z (m)	3,980	Z (m)	3,696
Z (ft)	13,058	Z (ft)	12,126
FI (%)	26,223	FI (%)	25,850
E <sub>o, corregida</sub> (%)	<b>98,3</b>	E <sub>o, corregida</sub> (%)	<b>98,0</b>

Tabla. A3.CCCVII. Correcciones para las zonas de columna

Donde se ha tomado Z de las tablas A3.CCXCIV a A3.CCXCVI. El factor de incremento se ha interpolado linealmente de la tabla A3.LVII y la corrección final se ha practicado sobre la eficacia global de *O'Connell*, que se ha tomado como la dada por el ajuste de *Edu-lee*, a la sazón la más baja de las predicciones; en la Tabla A3.CCIII, como queda explicado.

La corrección se ha practicado, para cada zona, según la expresión (A3.60) que ha requerido la eficacia global mínima, mencionada en el párrafo anterior, y los factores de incremento, de la misma tabla donde figuran las eficacias globales corregidas, Tabla. A3.CCCVII.

Las eficacias estimadas son considerablemente elevadas. Tras contrastar el funcionamiento de otras plantas similares a la proyectada, se constata que, pese al aluvión de inconvenientes derivados del proceso de purificación que intitula el PFC, cuando menos la eficacia de separación estimada se ajusta a valores operativos reales.

Finalmente, con lo calculado en apartados precedentes, se está en disposición de procurar los datos operativos finales concernientes a la unidad de separación denominada "BINARIA".

En este caso no se han barajado más alternativas, como se efectúo en otros capítulos, ya que se ha decidido directamente,

(véase la primera sección del capítulo actual), dividir la alimentación en tres corrientes como mejor opción para esta última operación.

#### A3.C4.4.2. Decisión final de columna

Sean los siguientes datos:

- Secciones.
- Diámetro de cada una.
- Ídem para el espaciado de platos.
- Ídem para el número de platos ideales.
- Ídem para la eficacia global corregida.
- Ídem para el número de platos reales.
- Altura de cada sección.
- Altura total.
- Decisión de número de columnas.
- Altura de cada columna, (si procediere).
- Decisión de reducción de diámetro.

Se procede a describir someramente cada dato.

La columna constará de dos secciones diferenciadas: rectificación y agotamiento.

El diámetro de la sección de rectificación coincidirá con el obtenido para el plato primero, mientras que el de la sección de agotamiento coincidirá con el obtenido para el plato de alimentación; siendo estos los diámetros restrictivos, por comportar las mayores dimensiones. De la misma forma, cada sección estará representada por las dimensiones calculadas para el primer plato, (sección de rectificación) y el plato de alimentación, (sección de agotamiento). Estos datos se toman de las tablas A3.CCXCI y A3.CCXIV, y A3.CCXCI y A3.CCXCV.

El espaciado de platos, se toma de la Tabla A3.XXXVII.

---

El número de platos ideales viene dado directamente por la aplicación del método de FUG a la corriente de alimentación, (véase anexo correspondiente).

La eficacia global corregida difiere ligeramente en cada una de las dos secciones de la columna, según lo recogido en la Tabla. A3.CCCVII.

El número de platos reales se calcula a partir de los datos descritos en los dos párrafos anteriores, según la ecuación (A3.61), para cada zona.

Como número de platos reales para la zona de rectificación, debe tomarse el número dado por (A3.61) truncado en la unidad y aproximado siempre a la siguiente, como criterio conservador. Para la zona de agotamiento procedería, de la misma forma, tomar un plato más, si bien, y dado que debe considerarse el calderín como etapa de equilibrio, los platos reales obtenidos se aproximarán a la unidad anterior.

La altura de cada sección es el resultado de multiplicar el espaciado de platos por el número de platos reales.

La altura total es el total de las alturas de las secciones de rectificación y agotamiento.

En función de la altura total, y como criterio de diseño, se observará la segregación de la columna en un tren de separación,, compuesto por varias columnas, cuando la altura total dividida por 212 pies y truncada en la unidad sea cercana a dos. El número apropiado de columnas será el redondeo del cociente indicado. En todo caso, ninguna columna individual superará los 90 m de altura.

Caso de segregar el tren de separación en varias columnas, la altura de cada columna se dilucida dividiendo la altura total por el número de columnas seleccionado, cambiando convenientemente unidades.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Finalmente, se comprobará la diferencia porcentual entre los diámetros de cada sección. Como criterio operativo, se mantendrá el diámetro superior como diámetro de toda la columna, siempre que la diferencia de diámetros no supere el 20%. La diferencia porcentual de diámetros se calcula según (A3.62).

Considerando lo anterior, se obtiene:

<b>Decisión de columna</b>			
<b>Rectificación</b>		<b>Agotamiento</b>	
<b>T (m)</b>	7	<b>T (m)</b>	6,5
<b>t (m)</b>	0,9	<b>t (m)</b>	0,9
<b>NPI<sub>rect.</sub></b>	135	<b>NPI<sub>agot.</sub></b>	75
<b>E<sub>o, corregida</sub></b>	98,3	<b>E<sub>o, corregida</sub></b>	98,0
<b>NPR<sub>rect.</sub></b>	137,363	<b>NPR<sub>agot.</sub></b>	76,539
	138		76
<b>h<sub>rect.</sub> (m)</b>	124,2	<b>h<sub>agot.</sub> (m)</b>	68,4
<b>h<sub>total</sub> (m)</b>		192,6	
<b>h<sub>total</sub> (ft)</b>		631,9	
<b>Criterio 212 ft</b>		2,981 ≈ 3 columnas	
<b>Decisión (m/torre)</b>		64,2	
<b>% ΔT</b>		7,7	

Tabla. A3.CCCVIII. Datos para la decisión final de columna

La unidad “BINARIA” se alimenta por la corriente G, procedente de “MÚLTIPLE”, dividida en tres. Cada una de estas corrientes en que se ha dividido la alimentación, que se denominarán G<sub>1</sub>, G<sub>2</sub> y G<sub>3</sub>, a su vez alimentan otras tantas subunidades gemelas consistentes en tres columnas de 64,2 m cada una.

Los datos de A3.CCCVIII, se refieren a una de las subunidades, puesto que suponen el cálculo para un tercio de la corriente de alimentación.

En cada subunidad, la sección de rectificación es la más luega y consta de 138 platos, en tanto que la sección de agotamiento

consta de 76. Ambas secciones suponen 214 platos distribuidos de la siguiente forma:

- 1ª columna: Sección de agotamiento: 64,2 m de altura repartidos a 0,9 m de espaciado, resultan 71 platos de agotamiento.
- 2ª columna: Sección de agotamiento: 5 platos separados 0,9 m suponen 4,5 m de altura. Sección de rectificación: Descontada la sección de agotamiento, restan 59,7 m repartidos a 0,9 m de espaciado, resultan 66 platos de rectificación.
- 3ª columna: Sección de rectificación: 64,2 m de altura repartidos a 0,9 m de espaciado, resultan 71 platos de rectificación.

La suma de los 71 platos de agotamiento de la primera columna y los 5 de la segunda, amén de los 66 platos de rectificación de la segunda columna y los 71 restantes de la tercera; supone 213 platos: resta acomodar un último plato de rectificación, lo que se procurará en la segunda columna. De esta forma, la disposición es la que sigue:

- 1ª columna: Sección de agotamiento: 71 platos de paso doble, del 214 al 144; 63,9 m de altura.
- 2ª columna: Sección de agotamiento: 5 platos de paso doble, del 143 al 139; 4,5 m de altura. Sección de rectificación: 67 platos de paso doble, del 138 al 72; 60,3 m de altura. Total de la 2ª columna: 64,8 m.
- 3ª columna: Sección de rectificación: 71 platos de paso doble, del 71 al 1; 63,9 m de altura.

Los platos se numeran del 1 al 214, tomando como primer plato el de cabeza de la columna tercera y como último, el de cola de la columna primera. Si se suman las alturas, el total coincide con  $h_{total}$  dada en la Tabla. A3.CCCVIII.

La alimentación se inserta entre los platos 138 y 139, a su temperatura de ebullición, es decir, entre el primer plato de la sección de agotamiento, (139), y el último de la sección de rectificación, (138).

La decisión final sobre la reducción de diámetros es negativa, puesto que la diferencia estimada entre diámetros, para las zonas de rectificación y agotamiento, no excede el 20% tomado como criterio. Sin perjuicio de lo anterior, se construirá la primera columna, (constituida íntegramente por platos de agotamiento), con platos de 6,5 m de diámetro. Las dos restantes se construyen con platos de 7 m de diámetro. Todos los platos serán de paso doble.

Las conexiones se efectúan de la siguiente forma:

- El vapor del plato 144, primer plato de la primera columna, se introduce en el plato 143, último plato de la segunda columna. Asimismo, el líquido del plato 143, se bombea al plato 144.
- El vapor del plato 72, primer plato de la segunda columna, se introduce en el plato 71, último plato de la tercera columna. Asimismo, el líquido del plato 71, se bombea al plato 72.
- El vapor del plato 1, esto es, el destilado, se condensa totalmente y la fracción determinada por la relación de reflujo, se retorna como líquido al mismo plato.
- El líquido del plato 214, esto es, el residuo de columna, se calienta a la temperatura indicada por los datos de equilibrio y se retorna el vapor correspondiente al mismo plato.
- El líquido no retornado a la tercera columna en el plato 1, constituye el destilado de "BINARIA" y, según el diagrama de flujo, se dirige en parte a "BLENDING de EXTRACTIVA 1" y en parte a "TANQUES de CORRIENTES".
- El líquido en equilibrio con el vapor retornado a la primera columna en el plato 214, pese a ser retirado como residuo de "BINARIA", es la corriente purísima en butadieno y se dirige en parte al "TANQUE de PRODUCTO TERMINADO" y en parte a "BLENDING de EXTRACTIVA 1".

# Documento 1. Memoria

---

## Anexo 4. Diseño mecánico de unidades

1. Diseño mecánico de "EXTRACTIVA 1"
2. Diseño mecánico de unidades principales



---

## **Capítulo A4.C1. Diseño mecánico de “EXTRACTIVA 1”**

### **A4.C1.1. Introducción**

El anexo primero, de generación de datos termodinámicos, ha permitido caracterizar las condiciones de presión, temperatura y composición de las distintas corrientes que involucrará el proceso de separación que intitula el presente PFC.

Por su parte, en el segundo anexo se trató el balanceo de unidades de forma conjunta al diseño de las mismas. Lo primero permitió conocer el flujo de las corrientes que parten de cada una ellas, al tiempo que lo segundo procuró las ecuaciones precisas para obtener la solución de separación idónea, esto es, obtención del número de platos y de la relación de reflujo óptima. Finalmente, el anexo tercero y previo, se abordó la solución hidráulica al problema, esto es el dimensionado de los equipos.

Mientras que el primer párrafo del presente capítulo atañe a cada operación de separación, el segundo únicamente afecta a aquéllas que se efectúan en columna de platos. Excepcionalmente se incluyeron en el anexo segundo el dimensionado y diseño mecánico de los equipos de separación en etapa única: “SIMPLE” y “RECUPERACIÓN”.

De la misma forma que se abordó el diseño mecánico de los aparatos concernientes a las últimas operaciones indicadas, se procederá en este anexo cuarto, donde, de nuevo para los equipos de separación en columna de platos, debe cubrirse el apartado de selección de materiales y diseño resistente.

De forma más concreta, este capítulo y los sucesivos describirán los siguientes aspectos genéricos con modificaciones según convenga:

- Diseño mecánico (I). Determinación de la presión de diseño.

- Diseño mecánico (II). Determinación de espesores para el casco y los cabezales sometidos a presión interna.
- Diseño mecánico (III). Determinación del espesor del aislamiento y de la chapa envolvente.
- Diseño mecánico (IV). Determinación del espesor requerido para soportar la carga por viento.
- Diseño mecánico (V). Determinación del peso del aparato en operación.
- Diseño mecánico (VI). Determinación del espesor del faldón.
- Diseño mecánico (VII). Determinación del espesor requerido para soportar la carga sísmica.
- Diseño mecánico (VIII). Diseño del anillo de la base.
- Diseño mecánico (IX). Cálculo de las tubuladuras y refuerzos.
- Diseño mecánico (X). Iteración de cálculos.
- Diseño mecánico (XI). Comprobaciones.
- Cálculo de orejas de izado y pintado del casco y cabezales.

Lo que a expensas del presupuesto cerrará el cálculo para las unidades principales de proceso.

#### **A4.C1.2. Diseño mecánico de “EXTRACTIVA 1”**

Esta segunda sección se dividirá en varios apartados imbricados en el diseño mecánico de la misma. No se incluirán aspectos como el diseño de la red de tuberías, si bien, se indicarán los diámetros nominales requeridos en las bridas de entrada y salida a la unidad de “EXTRACTIVA 1”. Se remite al lector a la Figura A2.30 del segundo anexo, donde se muestra un esquema de la unidad.

##### **A4.C1.2.1. Diseño mecánico (I). Determinación de la presión de diseño**

En el primer apartado de diseño mecánico debe establecerse cuál es la presión para la que se diseñará el equipo. Debe distinguirse entre la presión de operación y la de diseño. La primera es la pre-

sión habitual de trabajo a que se someterá el equipo, (como se ha mencionado en anexos anteriores supone 3 atm). La segunda es la presión sobredimensionada que garantice el correcto desempeño mecánico, frente a eventualidades de funcionamiento.

Según normas *ASME*, la presión de diseño se obtiene sumando a la de operación la cantidad mayor entre un 10% de la misma ó 30 psi, (libras fuerza por pulgada cuadrada). Adicionalmente, para la prueba hidráulica, se considerará la presión que ejercería sobre las paredes del recipiente, el peso de un volumen de agua equivalente al volumen interno del aparato. Véase ecuaciones (A2.23).

Donde la presión de operación equivale a 3 atm, como queda indicado,  $P_{\text{agua}}$  es la presión que ejercería el agua sobre las paredes del recipiente completamente lleno,  $p_{\text{agua}}$  es el peso del agua, que según la segunda ley de *Newton*, es igual al producto de la masa de agua,  $m_{\text{agua}}$  y la aceleración de la gravedad,  $g$ . Por su parte, la masa de agua es el producto de la densidad de la misma por el volumen que ocupa, esto es, el volumen interno del casco, (no se considera el volumen de los cabezales).

Antes de efectuar consideraciones geométricas, sea la siguiente tabla, a modo de resumen de los datos proporcionados por los anteriores anexos para “EXTRACTIVA 1”:

Datos de las torres							
Torre primera		Torre primera		Torre segunda		Torre tercera	
Agotamiento		Rectificación		Rectificación		Rectificación	
<b>NPR</b>	50	<b>NPR</b>	26	<b>NPR</b>	75	<b>NPR</b>	75
<b>T (ft)</b>	21,325	<b>T (ft)</b>	16,404	<b>T (ft)</b>	16,404	<b>T (ft)</b>	16,404
<b>t (ft)</b>	2,953						
<b>H<sub>L</sub> (ft)</b>	12	<b>H<sub>C-P</sub> (ft)</b>	0,656	<b>H<sub>L</sub> (ft)</b>	12	<b>H<sub>L</sub> (ft)</b>	12
<b>H<sub>P-C</sub> (ft)</b>	0,656	<b>H<sub>P-S</sub> (ft)</b>	4	<b>H<sub>P-S</sub> (ft)</b>	4	<b>H<sub>P-S</sub> (ft)</b>	4

Tabla. A4.I. Datos de los cuerpos cilíndricos de las torres de “EXTRACTIVA 1”

Se tienen tres torres: una primera con reducción de diámetro y otras dos gemelas, en cuanto a altura y diámetro. La Tabla A4.I re-

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

coge datos de número de platos reales, NPR, diámetro, T y espaciado de platos, t. El resto de magnitudes corresponden al espacio entre el último plato y el fondo,  $H_L$ , (que incluye, por tanto al nivel de líquido en la zona de descarga de líquido de la columna), el espacio entre plato y cono de reducción,  $H_{P-C}$  y  $H_{C-P}$  y el espacio entre el primer plato y la descarga de cabeza,  $H_S$ . Puesto que se trabaja con expresiones en unidades anglosajonas, se han proporcionado las magnitudes, tomadas del anexo segundo, en tales unidades. Los espacios entre platos y fondo y cabeza se han tomado de acuerdo a la bibliografía\*, mientras que la distancia entre plato y cono se toma, a criterio del proyectista, como la mínima para insertar la brida de alimentación en el cuerpo cilíndrico.

Las magnitudes geométricas de volumen y superficie internos,  $V_{int}$  y  $S_{int}$  respectivamente, deberán distinguirse según qué torre se trate. En la primera, se consideran dos cuerpos cilíndricos, el inferior de mayor diámetro, unidos por un cuerpo troncocónico que efectúa la transición de diámetros. En la segunda y tercera torres, (que, como se apuntó *ut supra*, son gemelas y por tanto coincidentes en los valores calculados), sólo se considerará el cuerpo cilíndrico de las dimensiones tabuladas en A4.I. Las magnitudes de volumen y superficie para cada cuerpo se calculan según:

- Cuerpos cilíndricos: Aplíquense las ecuaciones (A2.24) a los diámetros y alturas que se indican en la Tabla A4.II.
- Cuerpo cónico: Aplíquense las siguientes:

$$(A4.1) \left\{ \begin{array}{l} V_{int} = \frac{\pi}{12} \cdot H \cdot (D_i^2 + D_i d_i + d_i^2) (1) \\ S_{int} = \frac{\pi}{2} \cdot c \cdot (D_i + d_i) = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{D_i + d_i}{2 \cdot \operatorname{sen} \alpha} \cdot (D_i + d_i) (2) \\ H = \frac{D_i + d_i}{2 \cdot \operatorname{tg} \alpha} (3) \end{array} \right.$$

\* Operaciones de separación por etapas de equilibrio en Ingeniería Química. E. J. Henley, H. D. Seader. Reverté, año 2000.

Obsérvese la siguiente figura con las dimensiones del cuerpo troncocónico:

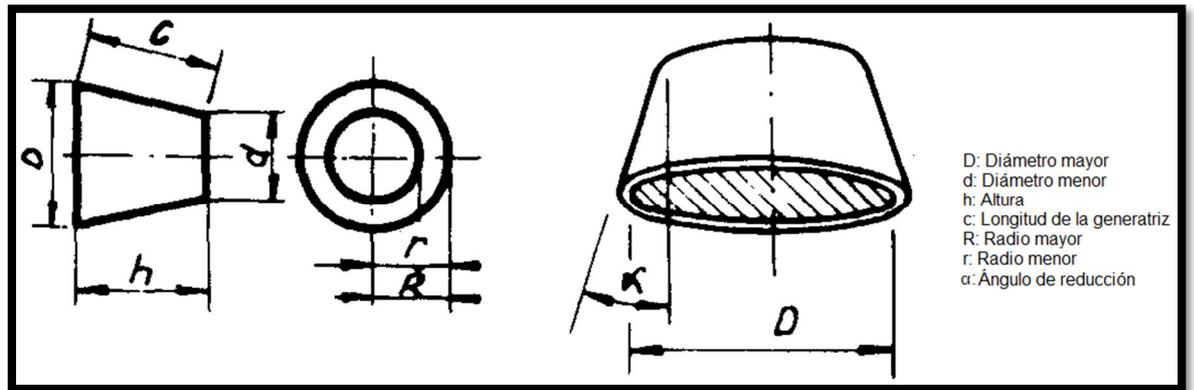


Figura. A4.1. Dimensiones del cono truncado. (E. F. Megyesy, 1992)

De donde, aplicando herramientas trigonométricas, se ha ligado la longitud de la generatriz al ángulo de reducción y los diámetros, como figura directamente expresado en (A4.1.2)

Con lo anterior, se está en disposición de calcular la presión de diseño para cada torre:

Torre primera				Torres segunda y tercera			
Cálculo para $P_{\text{agua}}$		Cálculo para $P_{\text{diseño}}$		Cálculo para $P_{\text{agua}}$		Cálculo para $P_{\text{diseño}}$	
$H_{\text{agot}}$ (ft)	160,294	$P_{\text{operación}}$ (atm)	3	H (ft)	237,457	$P_{\text{operación}}$ (atm)	3
$H_{\text{rect}}$ (ft)	81,428	10% P (atm)	0,3	T (ft)	16,404	10% P (atm)	0,3
$T_{\text{agot}}$ (ft)	21,325	30 psi (atm)	2,041	V ( $\text{m}^3$ )	1421,115	30 psi (atm)	2,041
$T_{\text{rect}}$ (ft)	16,404	$P_{\text{diseño}}$ (psi)	76,242	S ( $\text{m}^2$ )	1136,892	$P_{\text{diseño}}$ (psi)	75,866
$\alpha$ (rad)	0,524 ( $30^\circ$ )			$m_{\text{agua}}$ (kg)	1421115		
$H_{\text{cono}}$ (ft)	4,262			$p_{\text{agua}}$ (N)	13936379		
V ( $\text{m}^3$ )	2142,493			$P_{\text{agua}}$ (atm)	0,121		
S ( $\text{m}^2$ )	1414,645						
$m_{\text{agua}}$ (kg)	2142493						
$p_{\text{agua}}$ (N)	21010677						
$P_{\text{agua}}$ (atm)	0,146						

Tabla. A4.II. Cálculo de la presión de diseño

El procedimiento para el cálculo de la presión de diseño es idéntico al descrito en el primer capítulo del anexo segundo, por lo

que se remite tanto a dicho procedimiento como a los datos requeridos, tabulados en A2.XXIX. Las alturas  $H_{\text{agot}}$ ,  $H_{\text{rect}}$  y  $H_{\text{cono}}$  corresponden a las de los cuerpos cilíndricos que contienen la sección de agotamiento y rectificación, cuya altura se ha calculado sumando el producto del número de platos por el espaciado y los espacios entre fondo y último plato y entre plato y cono truncado, en el caso de la sección de agotamiento, y sumando el mismo producto en la sección de rectificación, el espacio entre plato y cono truncado y entre plato superior y descarga de vapor. Los datos para estas dos alturas vienen tabulados en A4.I. La altura del cono truncado, se ha calculado según (A4.1.3) sobre los datos de la Tabla A4.II. La altura del cuerpo cilíndrico de las torres segunda y tercera se obtiene por suma del producto del número de platos por el espaciado, la distancia entre el último plato y el fondo y aquella existente entre el primer plato y la descarga, magnitudes todas ellas tabuladas en A4.I.

*Ídem* a lo indicado para las alturas puede referirse sobre los diámetros con  $T_{\text{agot}}$  y  $T_{\text{rect}}$ , siendo éstos, respectivamente, los diámetros mayor y menor, del cono truncado. El volumen y la superficie de la torre primera resultan la suma de los volúmenes y superficies de sus cuerpos, respectivamente, dados por las ecuaciones (A2.24) y (A4.1.1) y (A4.1.2). Por su parte, el volumen y superficie de las torres segunda y tercera se ha calculado por aplicación de (A2.24), puesto que están constituidas por un único cuerpo cilíndrico.

#### A4.C1.2.2. Diseño mecánico (II). Determinación de espesores para el casco, los cabezales y el cono reductor sometidos a presión interna

El recipiente para la columna primera, consiste básicamente en un cuerpo formado por un casco cilíndrico unido a un segundo casco, de igual forma e inferior diámetro, por un casco troncocónico que hace las veces de reductor. El casco cilíndrico inferior, (de mayor diámetro), y el superior quedan cerrados por dos cabezales o tapas.

El recipiente para las columnas segunda y tercera consiste en un único cuerpo cilíndrico cerrado por cabezales. La construcción de

los recipientes requiere una serie de consideraciones técnicas de diseño que comienzan a estipularse en este apartado.

El casco es la envoltura metálica que constituye el cuerpo del recipiente. Se construye a partir de la soldadura de una serie de chapas o virolas, entendiéndose por virola la porción de casco curvado y soldado longitudinalmente, (por la generatriz del cilindro que se forma al curvar la chapa plana). Las virolas se sueldan unas a otras circunferencialmente, es decir, siguiendo la línea de circunferencia perpendicular al plano del eje del cilindro.

Los cabezales que cierran el casco son de muy diversas formas, dependiendo fundamentalmente de la presión.

La bibliografía consultada\* recomienda utilizar cierres toriesféricos cuando se trabaja a presiones de operación inferiores a 10 atm, como es el caso.

Un cabezal toriesférico es el resultado de abombar una chapa plana por estampación, hasta lograr un cuerpo geométrico que supone la intersección entre un toro de revolución, (o toroide) y un casquete esférico que lo corona. La Figura A2.4 del anexo segundo ilustra lo descrito: el toro de revolución viene generado por un círculo de radio  $R_k$  que gira sobre un eje circunferencial perpendicular a dicho círculo generador, mientras que el casquete esférico presenta un radio de curvatura  $R_c$ .

El valor de  $R_c$  se tomará igual al diámetro del casco cuando la presión de operación no supere  $7 \text{ kg/cm}^2$ , (6,8 atm), como es el caso. Estos fondos se conocen como "*fondo Klopper*", mientras que para presiones de operación comprendidas entre 6,8 y 10 atm, se utilizan fondos "*Korboggen*", con un radio  $R_c$  de 0,8 veces el diámetro del casco.

---

\* Chemical Engineering Design. G. Towler, R. Sinnott. Butterworth-Heinemann, año 2008.

En todos los fondos sucede una transición entre la figura bombeada y la cilíndrica del casco. Esta línea de tangencia está sometida a gran carga axial, por lo que supone el punto más débil de los recipientes a presión. Por este motivo, no es recomendable aplicar el cordón de soldadura justo en la línea de tangencia entre el casco y el cabezal; en su lugar los cabezales se construyen con una faldilla o extensión cilíndrica de los mismos, con una altura determinada, proporcionada por el fabricante.

El recipiente compuesto por el casco y sus correspondientes cabezales, debe diseñarse para soportar tanto su propio peso, como las cargas debidas al viento, sismos, nieve si procediese, peso del líquido en operación y del agua de prueba hidráulica, entre otras. Los recipientes verticales se soportan principalmente sobre faldones: estructuras cilíndricas soldadas a tope al cabezal inferior, de modo que su diámetro externo coincida con el de éste.

Por último, el recipiente incluye distintos registros: entrada y salida de fluidos, *ídem* para aparatos de medición y control, venteos de seguridad, válvulas de seguridad, bocas de hombre, etc.

El presente apartado contempla el dimensionado de las virolas del casco y de los cabezales sometidos a presión interna. A este objetivo contribuyen distintas expresiones tomadas del libro de *Megyesy*<sup>\*</sup>, compendio de distintos códigos de diseño y construcción de recipientes a presión.

Para el espesor de casco sometido a presión interna *Megyesy* recoge las expresiones (A2.25), las variables y su procedencia se comentaron junto a las mismas en el anexo segundo. En particular, por radio se tomará la mitad de los diámetros de cada cuerpo en el cálculo de su espesor requerido a presión interna.

---

<sup>\*</sup> Manual de recipientes a presión. *E. F. Megyesy*. Limusa. Grupo Noriega Editores, año 1992.

El material seleccionado para el casco es acero al carbono, según especificación SA-515 grado 70. La elección se justifica en el costo: para fluidos no corrosivos como son los tratados, (lo que se verifica tras la lectura del capítulo de corrosión en *Megyesy*), puede seleccionarse el acero al carbono más económico posible, gracias asimismo a los bajos requerimientos mecánicos derivados de una operación a presión baja, (inferior a 5 atm, como es el caso).

Para los separadores gas-líquido de la operación "SIMPLE" se seleccionó acero al carbono según SA-285 grado C, un material algo más económico y con una resistencia menor. En este caso, puesto que seleccionar el mismo material supondría un espesor excesivo, se decide cambiar por un acero de superior resistencia y recomendado por fabricantes para el uso que se le otorgará. La resistencia para el material seleccionado, en una horquilla de temperatura de -20 a 650 °F (-28,9 a 343,3 °C) es de  $S = 17500$  psi. Se empleará el mismo material para los cabezales.

Por su parte, la eficacia de soldadura para las juntas del casco se toma como 0,85, (juntas a tope examinadas por zonas). En la Figura A2.5, se presenta la tabla de *Megyesy*, que proporciona las distintas eficacias requeridas, necesarias para los capítulos de diseño mecánico.

Con estos datos puede aplicarse (A.25.1) a fin de obtener el espesor del casco. A este espesor debe sumársele un margen de corrosión, C.A. (del inglés *Corrosion Allowance*), que, como criterio de diseño, se toma de 5 milésimas de pulgada por año de vida proyectado.

Finalmente, la suma del espesor y el margen de corrosión, se redondeará a la suma de fracciones de 1/16 de pulgada más próxima a la obtenida y se introducirá en (A2.25.2) para obtener la presión admitida. Si tal presión excede a la de diseño el cálculo es conforme, puesto que las prestaciones iniciales del material superan las expec-

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

tativas de diseño, con vistas a la prevención, tomada genéricamente, para prevenir la corrosión. Se obtiene:

Espesor por presión interna	
$P_{\text{diseño}}$ (psi)	76,242
$S$ (psi)	17500
$E$	0,85
$R$ (in) (interior)	127,953
$D$ (in) (interior)	255,906
C.A. (in) (20 años)	0,1
$t$ (in)	0,658
$t_{c,pi}$ (in) (20 años)	0,758
$P_{\text{adm}}$ (psi)	94,098
$t_{c,circ}$ (in) (20 años)	0,428

Tabla. A4.III. Cálculo del espesor de casco sometido a presión interna. Torre primera, cuerpo inferior

Se ha denominado  $t_{c,pi}$  al espesor final, incluyendo el margen de corrosión, requerido para el casco sometido a presión interna.

Debe matizarse que las ecuaciones (A2.25) se refieren al espesor y presión admitida de acuerdo con el esfuerzo ejercido sobre las costuras longitudinales de las virolas. Dichas ecuaciones no consideran el esfuerzo soportado por las costuras circunferenciales, ya que usualmente no superan al esfuerzo ejercido sobre las longitudinales. Expresado en otros términos, si el casco es resistente para el mayor esfuerzo sobre unas costuras, resistirá un esfuerzo menos severo en otras. No en vano es preciso demostrar el extremo anterior y, para ello, se ha calculado el espesor que requeriría el aparato si rigiesen esfuerzos circunferenciales, (se trata del último espesor mostrado,  $t_{c,circ}$ , en la Tabla A4.III. El primero,  $t_{c,pi}$ , corresponde al espesor según esfuerzos longitudinales). Puesto que el espesor a esfuerzo circunferencial es menor que el homólogo a esfuerzo longitudinal, es éste último el más restrictivo y el que se toma como espesor del casco sometido a presión interna. La comprobación del espesor por tensión circunferencial se ha efectuado aplicando (A2.26).

Los datos son los mismos que los empleados para la ejecución de (A2.25.1). Análogamente podría comprobarse la presión admitida, si bien se omite dado que no rige el régimen circunferencial de esfuerzo como queda demostrado.

El redondeo del espesor proporciona:

$$t_{c,pi} = 13/16 \text{ de pulgada (20,64 mm)}$$

Este será el espesor final de casco sometido a presión interna, que se empleará en cálculos posteriores, para el cuerpo cilíndrico inferior de la torre primera.

Por su parte, el espesor del cuerpo superior de la primera torre y del cuerpo único de las torres segunda y tercera sigue el mismo procedimiento *mutatis mutandis* las variables según convenga. Se muestran en las siguientes tablas, análogas a A4.III, los espesores correspondientes:

<b>Espesor por presión interna</b>	
<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	76,242
<b>S (psi)</b>	17500
<b>E</b>	0,85
<b>R (in) (interior)</b>	98,425
<b>D (in) (interior)</b>	196,850
<b>C.A. (in) (20 años)</b>	0,1
<b>t (in)</b>	<b>0,506</b>
<b>t<sub>c,pi</sub> (in) (20 años)</b>	<b>0,606</b>
<b>P<sub>adm</sub> (psi)</b>	<b>94,098</b>
<b>t<sub>c,circ</sub> (in) (20 años)</b>	<b>0,352</b>

Tabla. A4.IV. Cálculo del espesor de casco sometido a presión interna. Torre primera, cuerpo superior

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Espesor por presión interna	
$P_{\text{diseño}}$ (psi)	75,866
$S$ (psi)	17500
$E$	0,85
$R$ (in) (interior)	98,425
$D$ (in) (interior)	196,850
$C.A.$ (in) (20 años)	0,1
$t$ (in)	<b>0,504</b>
$t_{c,pi}$ (in) (20 años)	<b>0,604</b>
$P_{\text{adm}}$ (psi)	<b>94,098</b>
$t_{c,circ}$ (in) (20 años)	<b>0,351</b>

Tabla. A4.V. Cálculo del espesor de casco sometido a presión interna. Torres segunda y tercera

En los dos casos se verifica la prevalencia del esfuerzo longitudinal sobre el circunferencial. Las presiones admisibles son asimismo superiores a la de diseño lo que otorga conformidad a un cálculo que proporciona, tanto para el cuerpo cilíndrico superior de la primera torre como para el que forma la segunda y tercera:

$$t_{c,pi} = 5/8 \text{ de pulgada (15,88 mm)}$$

Para determinar el espesor de los cabezales se procede de forma similar aplicando las ecuaciones (A2.27) a los pertinentes datos presentados en el capítulo actual, según corresponda el cabezal al cuerpo inferior o superior de la primera torre o a la segunda y tercera torres, (ambos cabezales son idénticos en tales recipientes).

No es preciso efectuar distinción entre régimen circunferencial o longitudinal de esfuerzo, ya que la junta de soldadura del casco al cabezal es circunferencial y éste último carece de costuras longitudinales, como presentan las violas del casco. Con lo anterior, se obtiene:

Espesor por presión interna	
<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	76,242
<b>D (in) (interior)</b>	255,906
<b>S (psi)</b>	17500
<b>E</b>	1
<b>M</b>	1,54
<b>C.A. (in) (20 años)</b>	0,1
<b>t (in)</b>	<b>0,859</b>
<b>t<sub>cab,pi</sub> (in) (20 años)</b>	<b>0,959</b>
<b>P<sub>adm</sub> (psi)</b>	<b>88,766</b>

Tabla. A4.VI. Cálculo del espesor de los cabezales sometidos a presión interna.  
Torre primera, cabezal inferior

La presión admisible supera la de diseño, por lo que el cálculo es conforme. Así, se toma para el cabezal inferior de la primera torre el siguiente espesor comercial:

$$t_{cab,pi} = 1 \text{ pulgada (25,4 mm)}$$

Según normas de diseño mecánico, el espesor de los cabezales debe ser superior al del casco, a fin de asegurar un cierre adecuado. Lo que, según lo dado, se corrobora, (el espesor por presión interna del cuerpo cilíndrico inferior de la primera torre es inferior al de su correspondiente cabezal).

Para los otros cabezales se obtiene:

Espesor por presión interna			
<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	76,242	<b>M</b>	1,54
<b>D (in) (interior)</b>	196,850	<b>C.A. (in) (20 años)</b>	0,1
<b>S (psi)</b>	17500	<b>t (in)</b>	<b>0,661</b>
<b>E</b>	1	<b>t<sub>cab,pi</sub> (in) (20 años)</b>	<b>0,761</b>
		<b>P<sub>adm</sub> (psi)</b>	<b>93,756</b>

Tabla. A4.VII. Cálculo del espesor de los cabezales sometidos a presión interna.  
Torre primera, cabezal superior

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Espesor por presión interna	
<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	75,866
<b>D (in) (interior)</b>	196,850
<b>S (psi)</b>	17500
<b>E</b>	1
<b>M</b>	1,54
<b>C.A. (in) (20 años)</b>	0,1
<b>t (in)</b>	<b>0,658</b>
<b>t<sub>cab,pi</sub> (in) (20 años)</b>	<b>0,758</b>
<b>P<sub>adm</sub> (psi)</b>	<b>93,756</b>

Tabla. A4.VIII. Cálculo del espesor de los cabezales sometidos a presión interna. Torres segunda y tercera

Las presiones admisibles son superiores a las de diseño correspondiente a cada torre, por lo que se obtiene para los cabezales de las torres segunda y tercera y el superior de la torre primera el siguiente espesor comercial:

$$\boxed{t_{cab,pi} = 13/16 \text{ pulgada (20,64 mm)}}$$

Espesor que se comprueba superior al obtenido para sus correspondientes cascos cilíndricos.

En los cálculos de espesor, el diámetro o radio se ha introducido como suma del interno más el margen de corrosión, como criterio conservador sugerido por *Megyesy*.

Por último debe calcularse el espesor requerido por el cono reductor para soportar la presión interna. Para ello se aplican las siguientes expresiones tomadas de *Megyesy*:

$$(A4.2) \left\{ \begin{array}{l} t(\text{in}) = \frac{P(\text{psi}) \cdot D(\text{in})}{2 \cdot \cos \alpha \cdot (S(\text{psi}) \cdot E - 0,6 \cdot P(\text{psi}))} \quad (1) \\ P(\text{psi}) = \frac{2 \cdot S(\text{psi}) \cdot E \cdot t(\text{in}) \cdot \cos \alpha}{D(\text{in}) + 1,2 \cdot t(\text{in}) \cdot \cos \alpha} \quad (2) \end{array} \right.$$

Donde deberá tomarse D, como el diámetro mayor, a la sazón  $D_{Agot}$  de la Tabla A4.II, y E, de nuevo 0,85 por tratarse de junta longitudinal examinada por zonas. Operando se obtiene:

<b>Espesor por presión interna</b>	
<b><math>P_{diseño}</math> (psi)</b>	76,242
<b>D (in) (interior)</b>	255,906
<b>S (psi)</b>	17500
<b>E</b>	0,85
<b>C.A. (in) (20 años)</b>	0,1
<b>t (in)</b>	<b>0,760</b>
<b><math>t_{cab,pi}</math> (in) (20 años)</b>	<b>0,860</b>
<b><math>P_{adm}</math> (psi)</b>	<b>87,782</b>

Tabla. A4.IX. Cálculo del espesor del cono reductor

Donde la presión admisible supera a la de diseño. No se indica la necesidad de comprobar si rige el régimen de esfuerzo sobre la costura longitudinal del cono reductor, o las dos costuras circunferenciales con que se une a los cuerpos cilíndricos. El espesor comercial seleccionado para este elemento es el que sigue:

$$t_{cono,pi} = 7/8 \text{ pulgada (22,22 mm)}$$

A4.C1.2.3. Diseño mecánico (III). Determinación del espesor del aislamiento y de la chapa envolvente

Puesto que la operación de separación es fuertemente dependiente de la temperatura, debe garantizarse la invariabilidad de la misma frente a las inclemencias meteorológicas propias de la zona de instalación de la planta.

Sobre la ubicación de la planta para el proceso de que es objeto el presente PFC se da cumplida exposición en la memoria descriptiva, por lo que se omitirá redundar en los distintos aspectos que aquélla abordó. No en vano, es preciso sacar a colación los datos

climatológicos que atañen al aislamiento térmico de las unidades: las temperaturas medias de las máximas y mínimas absolutas.

El estudio base empleado en el presente PFC procede de la Agencia Estatal de Meteorología (*AEMET*). Se han tomado las temperaturas medias de las máximas y mínimas absolutas, correspondientes a un período de 59 años (1952-2011), según datos proveídos por la estación meteorológica del Aeropuerto de Jerez de la Frontera. Dicha estación es el observatorio más próximo al campo de Gibraltar, donde se ubicaría la planta de procesos objeto del PFC. Considerando que el perfil de temperaturas en dicha región es algo más benigno que en los alrededores de la población jerezana, la referencia tomada garantiza un funcionamiento adecuado de la operación “EXTRACTIVA 1” con una probabilidad suficiente.

Se toman las siguientes temperaturas:

$$\mathbf{T \text{ (media de máximas absolutas) = } 36,6 \text{ }^\circ\text{C}}$$

$$\mathbf{T \text{ (media de mínimas absolutas) = } 1,7 \text{ }^\circ\text{C}}$$

Estas serán las temperaturas ambiente que se tomen para calcular el espesor de aislante requerido. Se practicará un procedimiento de cálculo dividido en dos partes: estimación del espesor de aislante a temperatura máxima, en primer lugar, e *ídem* para temperatura mínima. La ecuación del citado método es la que se muestra en el capítulo primero del anexo segundo (A2.28). Las variables se comentan en el mencionado capítulo junto a las constantes empleadas. Sólo varía la temperatura de operación, que, a la sazón se tomará la mayor de operación de columna correspondiente a la temperatura del líquido de fondo, recabada de la Tabla A3.IV del anexo previo. Aunque las torres segunda y tercera trabajen a menor temperatura que la primera, la diferencia no es sustancial, por lo que no se incurre en dispendio económico suponiendo la más severa de las temperaturas de la operación, la que rige en las tres torres.

Las expresiones de (A2.28) se han tomado de una norma\* para aislamiento térmico de equipos, de la empresa de Petróleos Mexicanos, *PEMEX*. Son válidas para estructura plana de geometría cilíndrica, (como son los recipientes a presión), para el caso de temperatura ambiente menor que la de operación. Cuando se opera a temperatura próxima a la ambiental, es preciso garantizar que el aislamiento garantiza el mantenimiento de la temperatura de operación, tanto cuando la temperatura ambiental es menor que la de operación en los meses fríos, como cuando es mayor en época estival.

Lo anterior explica la necesidad, tal como queda expuesto, de aplicar dos veces el procedimiento de cálculo del espesor de aislante. Para el caso de temperatura ambiente mayor que la de operación, las ecuaciones (A2.28) son válidas siempre que se cambie el signo en la suma de temperaturas, (de modo que se obtengan resultados positivos).

El procedimiento de cálculo es el que sigue:

- La temperatura de la superficie del aislante es desconocida: tómesese, en primera iteración, promediando  $T_{op}$  y  $T_{amb}$ .
- Dada  $T_s$ , pueden obtenerse  $h_c$  y  $h_r$  aplicando (A2.28.2) y (A2.28.3).
- Despéjese  $t_{ais}$  de (A2.28.1).

La ecuación (A2.28.1) despejada en  $t_{ais}$  queda en función del calor transferido en el aislamiento. Para diámetros de recipiente superiores a 30 in, como es el caso, (véase Tabla A4.II), el anexo B de la *NRF-034-PEMEX-2004*, proporciona un valor asumible de dicho calor de  $Q = 29,60 \text{ W/m}^2$  para temperaturas de operación de hasta  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Aplicada esta primera parte del procedimiento, se obtiene un espesor de aislante que será el adecuado siempre que se verifique,

\* Norma de referencia *NRF-034-PEMEX-2004*. Aislamientos térmicos para altas temperaturas en equipos, recipientes y tubería superficial.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

simultáneamente, la coincidencia de  $T_s$  recalculada con  $T_s$  supuesta. La temperatura  $T_s$  se recalcula considerando la transferencia de calor desde el exterior a la superficie del aislamiento, por medio de la ecuación (A2.29). Se rehará el procedimiento indicado los guiones anteriores, cambiando a la  $T_s$  recalculada en cada reiteración hasta lograr la convergencia. Para temperatura ambiente inferior a la de operación se obtuvieron los siguientes resultados:

Aislamiento			
$T_{op}$ (K)	301,39	$T_{amb}$ (K)	274,85
$Q$ (W/m <sup>2</sup> )	29,60	$k$ (W/mK)	0,042
$v$ (m/h)	104400	$\epsilon$	0,4
$C$	1,016	$T_s$ (K)	288,12
$h_c$ (W/m <sup>2</sup> K)	32,380	$h_r$ (W/m <sup>2</sup> K)	0,351
$1/f$ (m <sup>2</sup> K/W)	0,030	$t_{ais}$ (mm)	<b>36,378</b>

Tabla. A4.X. Cálculo del espesor de aislamiento ( $T_{op} > T_{amb}$ ). 1<sup>a</sup> iteración

La temperatura ambiente es la media de las mínimas absolutas. Se recalcula la temperatura de superficie,  $T_s$  aplicando (A2.29) sobre los datos obtenidos en la primera iteración. Se obtiene:

Aislamiento			
$T_s$ (K)	275,75	$h_c$ (W/m <sup>2</sup> K)	16,637
$h_r$ (W/m <sup>2</sup> K)	0,328	$1/f$ (m <sup>2</sup> K/W)	0,059
$T_s$ (K)	276,59	$t_{ais}$ (mm)	<b>35,186</b>

Tabla. A4.XI. Cálculo del espesor de aislamiento ( $T_{op} > T_{amb}$ ). 2<sup>a</sup> iteración

La primera  $T_s$  mostrada en la Tabla A4.XI, corresponde a la segunda iteración y es bastante discordante respecto de la supuesta inicialmente, promediada entre las temperaturas de operación y ambiente. La segunda  $T_s$  mostrada en la misma tabla corresponde a la tercera iteración. Al repetir sucesivamente los cálculos se obtiene, para la sexta iteración:

Aislamiento			
$T_s$ (K)	276,37	$h_c$ (W/m <sup>2</sup> K)	19,057
$h_r$ (W/m <sup>2</sup> K)	0,329	$1/f$ (m <sup>2</sup> K/W)	0,052
$T_s$ (K)	276,38	$t_{ais}$ (mm)	35,495
$t_{ais}$ (mm)	40	in	1,575
	$Q$ (W/m <sup>2</sup> )	26,438	

Tabla. A4.XII. Cálculo del espesor de aislamiento ( $T_{op} > T_{amb}$ ). 6<sup>a</sup> iteración

De nuevo la primera  $T_s$  corresponde a la iteración previa, y la segunda a la recalculada para la última iteración. Se redondea el espesor a 40 mm, (espesor comercial), y se comprueba el calor transferido por este espesor de aislamiento, por aplicación de (A2.28.1) sobre los datos más recientes de la Tabla A4.XII y las temperaturas de operación y ambiente y conductividad consignadas en la Tabla A4.X. El calor transferido es inferior a 29,60 W/m<sup>2</sup>, el valor permitido, por lo que el espesor para temperatura de operación mayor que la ambiente es conforme.

Aislamiento			
$T_{op}$ (K)	301,39	$T_{amb}$ (K)	309,75
$Q$ (W/m <sup>2</sup> )	29,60	$k$ (W/mK)	0,042
$v$ (m/h)	104400	$\epsilon$	0,4
$C$	1,016	$T_s$ (K)	305,57
$h_c$ (W/m <sup>2</sup> K)	21,010	$h_r$ (W/m <sup>2</sup> K)	0,458
$1/f$ (m <sup>2</sup> K/W)	0,046	$t_{ais}$ (mm)	9,902

Tabla. A4.XIII. Cálculo del espesor de aislamiento ( $T_{op} < T_{amb}$ ). 1<sup>a</sup> iteración

En la Tabla A4.XIII se repite el procedimiento mostrado en las tres tablas previas, al objeto de hallar el espesor indicado cuando la temperatura de operación es inferior a la ambiente, esto es, considerando la temperatura ambiente la media de las máximas absolutas.

Las propiedades son las mismas, incluido el máximo calor permitido, y las ecuaciones de nuevo son aplicables cambiando el signo a las operaciones con temperaturas, como queda indicado. Los

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

cálculos en la primera iteración proporcionan los resultados presentados en la Tabla A4.XIII.

Iterando seis veces se obtiene:

Aislamiento			
$T_s$ (K)	308,01	$h_c$ (W/m <sup>2</sup> K)	16,563
$h_r$ (W/m <sup>2</sup> K)	0,463	$1/f$ (m <sup>2</sup> K/W)	0,059
$T_s$ (K)	308,01	$t_{ais}$ (mm)	9,392
$t_{ais}$ (mm)	25	in	0,984
	$Q$ (W/m <sup>2</sup> )	12,780	

Tabla. A4.XIV. Cálculo del espesor de aislamiento ( $T_{op} < T_{amb}$ ). 6ª iteración

De nuevo el calor transferido a través del aislamiento es inferior al permitido, con lo que el espesor obtenido es conforme.

Debe tomarse, de entre los dos espesores, el más restrictivo que garantizará el aislamiento en condiciones de temperatura de operación mayor o menor que la ambiente. En este caso el espesor mayor es el que sigue:

$$t_{ais} = 40 \text{ mm}$$

La normativa *PEMEX* consultada indica proteger el aislamiento mediante el recubrimiento con una chapa de aluminio de aleación 1100 con tratamiento de envejecido H14, de 0,61 mm (0,024 in) de espesor. En definitiva, se tiene como espesor de la envolvente de aluminio:

$$t_{env} = 0,61 \text{ mm}$$

Según normas ASTM B 209, incluirá recubrimiento corrosivo a base de papel *kraft* con película de polietileno para protección contra intemperie.

A4.C1.2.4. Diseño mecánico (IV). Determinación del espesor requerido para soportar la carga por viento

Las torres se exponen al ataque de los elementos meteorológicos como son el viento, los sismos y las nevadas. Tomando datos de *AEMET*, se constata el no registro de días de nieve, por lo que este esfuerzo puede preterirse en lo que toca al diseño mecánico.

La carga que sufren los equipos por golpe sísmico se estudiará en apartados posteriores, por lo que el presente apartado se dedica al diseño del espesor resistente al eventual ataque del viento.

Los recipientes sujetos a empuje eólico se consideran vigas en voladizo sobre las que actúa una carga uniforme. El procedimiento para el cálculo del espesor resistente se basa en determinar el esfuerzo cortante y el momento máximo en la base del recipiente. La formulación para estos cálculos se ha tomado de *Megyesy* y se participa seguidamente en el anexo segundo bajo denominación (A2.30). Nuevamente, las variables quedan comentadas en tal referencia, por tanto, procediendo como en aquél anexo se obtiene la siguiente presión del viento:

Presión del viento					
Velocidad básica del viento (m/s)		29	(mi/h)	70	
$q_s$ (lb/ft <sup>2</sup> )	13	$C_e$	2,1	$C_q$	0,9
		$P_w$ (lb/ft <sup>2</sup> )	24,57		

Tabla. A4.XV. Estimación de la presión del viento

Donde la única variación respecto al caso presentado es el factor  $C_e$  que, en función de la altura del recipiente (200-300 ft) se ha tomado de la Tabla A2.XXXVII para la exposición más severa posible.

Sigue el cálculo del diámetro externo, incluyendo casco, aislamiento y chapa envolvente. Para lo que es válida la expresión (A2.32), haciendo distinción para cada cuerpo de las columnas des-

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

critas, (en lo tocante a los diámetros y espesores hallados en apartados anteriores).

Carga por viento					
$P_w$ (lb/ft <sup>2</sup> )	24,57	$D_{Agot}$ (ft)	21,727	$D_{Rect}$ (ft)	16,775
$h_T$ (ft)	6,562	$H_{tot}$ (ft)	252,545	$H_{Agot}$ (ft)	168,987
$h_{Agot}$ (ft)	84,493	$H_{Rect}$ (ft)	83,559	$h_{Rect}$ (ft)	210,766
$H_{esc}$ (ft lin.)	250,545	$H_{plat}$ (ft lin.)	8	Nº plataformas	9
	E	0,85	S (psi)	17500	

Tabla. A4.XVI. Datos previos para la estimación de la carga por viento

En la Tabla A4.XVI se ha incluido tanto la presión del viento, recién calculada, como el diámetro externo. Asimismo se han presentado la eficacia de soldadura para juntas longitudinales examinadas por zonas, E y la altura del faldón  $h_T$  que, según *Megyesy*, se ha tomado de 2 m, (figura tabulada su equivalencia en pies). Entre los demás datos figura la altura total, a su vez suma de las alturas de las secciones de agotamiento y rectificación, ( $H_{Agot}$  y  $H_{Rect}$ ). Estas alturas, según *Megyesy*, deben calcularse, para recipientes con reducción de diámetro de la siguiente forma:

- $H_{Agot}$  como la suma de la altura del faldón, la sección de agotamiento y medio cono reductor. Véase Tabla A4.II
- $H_{Rect}$  como la suma de la altura del medio cono reductor restante y la sección de rectificación. Véase Tabla A4.II.
- La altura total,  $H_{tot}$  es la suma de las anteriores.

Para las torres segunda y tercera sigue siendo válida la expresión (A2.33), aplicada sobre la altura correspondiente tabulada en A4.II. La altura  $h_1$  es la mitad de la altura total, tomada como brazo de palanca para el cálculo de momentos, para el caso de las torres segunda y tercera.

Para el caso de la torre primera, con reducción de diámetro *Megyesy* indica los siguientes brazos de palanca:

- $h_{\text{Agot}}$  como la mitad de  $H_{\text{Agot}}$ .
- $h_{\text{Rect}}$  como la suma de  $H_{\text{Agot}}$  y la mitad de  $H_{\text{Rect}}$ .

La siguiente figura muestra las magnitudes descritas para el caso de un recipiente con reducción de diámetro:

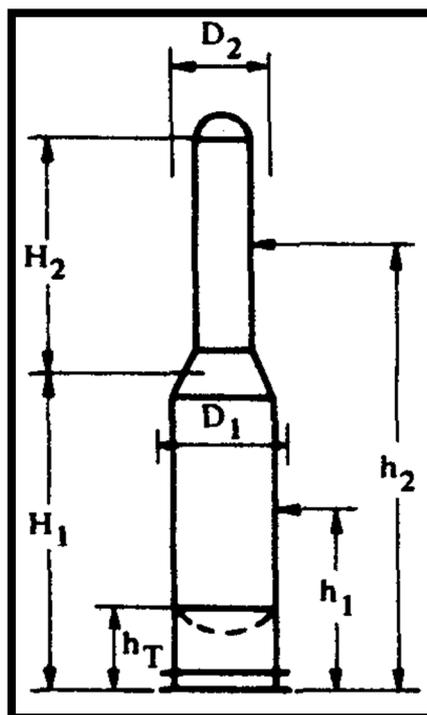


Figura. A4.2. Dimensiones del recipiente a presión. (E. F. Megyesy, 1992)

Seguidamente se presenta una tabla análoga a la A4.XVI que recoge los datos precisos para las torres segunda y tercera.

Carga por viento					
$P_w$ (lb/ft <sup>2</sup> )	24,57	$D_e$ (ft)	16,774	$E$	0,85
$h_T$ (ft)	6,562	$H_{\text{tot}}$ (ft)	244,018	$h_1$ (ft)	122,009
$H_{\text{esc}}$ (ft lin.)	242,018	$H_{\text{plat}}$ (ft lin.)	8	Nº plataformas	9
		$S$ (psi)	17500		

Tabla. A4.XVII. Datos previos para la estimación de la carga por viento

Los recipientes a presión deben incluir registros que permitan el acceso a operarios, ante la eventual necesidad de efectuar operacio-

nes de mantenimiento y limpieza. Para los recipientes objeto de diseño, se contempla la instalación de una escalera y nueve plataformas, tres de ellas a la altura de las entradas de hombre previstas: una próxima al último plato del recipiente, otra cercana a la tubería de alimentación y una última aneja al plato primero, que dé acceso tanto a dichos platos críticos de columna, como a las bridas de carga y descarga de fluidos de la misma.

La escalera presenta el área equivalente a su altura en pies lineales, (la altura de la escalera es dos pies menor que la total del recipiente), mientras que cada una de las plataformas presentan un área correspondiente a 8 pies lineales. (Las dimensiones de las escaleras y plataformas están estandarizadas y se han mostrado en la memoria descriptiva). Debe cumplirse lo expresado en (A2.34), a lo que debe añadirse que, por normas de seguridad, deberá instalarse una plataforma cada distancia no superior a 30 ft, de donde la razón del número de entradas de hombre radica en la altura del recipiente.

Estas dos magnitudes son las últimas incluidas en las tablas A4.XVI y A4.XVII. Haciendo uso de los datos de dichas tabla, pueden aplicarse las expresiones (A2.30) con las siguientes particularidades para cada elemento de la torre primera:

$$(A4.3) \left\{ \begin{array}{l} V(\text{lb}) \left\{ \begin{array}{l} \text{Sección de agot. : } V(\text{lb}) = P_w(\text{lb}/\text{ft}^2) \cdot D_{Agot}(\text{ft}) \cdot H_{Agot}(\text{ft}) (1) \\ \text{Sección de rect. : } V(\text{lb}) = P_w(\text{lb}/\text{ft}^2) \cdot D_{Rect}(\text{ft}) \cdot H_{Rect}(\text{ft}) (1) \\ \text{Escalera: } V(\text{lb}) = P_w(\text{lb}/\text{ft}^2) \cdot H_{esc}(\text{ft lin.}) (3) \\ \text{Plataformas: } V(\text{lb}) = P_w(\text{lb}/\text{ft}^2) \cdot H_{plat}(\text{ft lin.}) (4) \end{array} \right. \\ M(\text{lb}\cdot\text{ft}) \left\{ \begin{array}{l} \text{Sección de agotamiento: } M(\text{lb}\cdot\text{ft}) = V(\text{lb}) \cdot h_{Agot}(\text{ft}) (5) \\ \text{Sección de rectificación: } M(\text{lb}\cdot\text{ft}) = V(\text{lb}) \cdot h_{Rect}(\text{ft}) (6) \\ \text{Escalera: } M(\text{lb}\cdot\text{ft}) = V(\text{lb}) \cdot \frac{H_{esc}}{2}(\text{ft}) (7) \\ \text{Plataformas: } M(\text{lb}\cdot\text{ft}) = V(\text{lb}) \cdot h_{plat,i}(\text{ft}) (8) \end{array} \right. \end{array} \right.$$

Para las torres segunda y tercera siguen siendo de aplicación las expresiones (A2.35).

La magnitud  $h_{plat,i}$ , corresponde a la distancia desde el suelo a que se disponen cada una de las nueve plataformas. Estos datos se tabulan seguidamente junto a la aplicación de las ecuaciones (A4.3) y (A2.35) para obtener el espesor requerido para soportar la carga por viento, valiendo las consideraciones efectuadas en el apartado análogo al actual en el capítulo primero del anexo segundo. Comenzando por la torre primera, se obtiene:

Carga por viento					
<b>V (lb)</b>	90211,962	<b>M (lb-ft)</b>	7622306,887	<b>Sección Agotamiento</b>	
<b>V (lb)</b>	34439,400	<b>M (lb-ft)</b>	7258654,811	<b>Sección Rectificación</b>	
<b>V (lb)</b>	6155,900	<b>M (lb-ft)</b>	771166,278	<b>Escalera</b>	
<b>V (lb)</b>	196,560	<b>M (lb-ft)</b>	3931,200	<b><math>h_{plat,1}</math> (ft)</b>	20
<b>V (lb)</b>	196,560	<b>M (lb-ft)</b>	9828,000	<b><math>h_{plat,2}</math> (ft)</b>	50
<b>V (lb)</b>	196,560	<b>M (lb-ft)</b>	15724,800	<b><math>h_{plat,3}</math> (ft)</b>	80
<b>V (lb)</b>	196,560	<b>M (lb-ft)</b>	21621,600	<b><math>h_{plat,4}</math> (ft)</b>	110
<b>V (lb)</b>	196,560	<b>M (lb-ft)</b>	27518,400	<b><math>h_{plat,5}</math> (ft)</b>	140
<b>V (lb)</b>	196,560	<b>M (lb-ft)</b>	32432,400	<b><math>h_{plat,6}</math> (ft)</b>	165
<b>V (lb)</b>	196,560	<b>M (lb-ft)</b>	38329,200	<b><math>h_{plat,7}</math> (ft)</b>	195
<b>V (lb)</b>	196,560	<b>M (lb-ft)</b>	44226,000	<b><math>h_{plat,8}</math> (ft)</b>	225
<b>V (lb)</b>	196,560	<b>M (lb-ft)</b>	49247,204	<b><math>h_{plat,9}</math> (ft)</b>	250,5
<b>V (lb)</b>	132576,303	<b>M (lb-ft)</b>	15894986,780	<b>Total</b>	
<b><math>M_T</math> (lb-ft)</b>	15036555,960	<b><math>R_{m,Agot}</math> (in)</b>	129,158	<b><math>R_{m,Rect}</math> (in)</b>	99,537
<b><math>t_{c,w}</math> (in)</b>	<b>0,231</b>	<b><math>t_{c,w}</math> (in)</b>	<b>0,390</b>	<b><math>t_{c,w}</math> (in)</b>	<b>0,310</b>

Tabla. A4.XVIII. Primera estimación del espesor por carga del viento. Torre primera

Donde el radio medio,  $R_m$ , se ha calculado según (A2.36), para las zonas de agotamiento y rectificación como la mitad del promedio de los diámetros externo e interno de cada zona tomados de las tablas A4.II y A4.XVI. Para las torres segunda y tercera se aplica de igual modo al mostrado en el capítulo primero del anexo segundo.

Las alturas de las plataformas corresponden: la primera a la suma de la altura del faldón  $h_T$  y la distancia entre el plato último de

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

columna y el fondo, la sexta a la altura del plato de alimentación, (sumando a la anterior el producto del número de platos hasta el de alimentación por el espaciado) y la última a la altura de la escalera,  $H_{esc}$ . El resto de plataformas se sitúan a 30 pies unas de otras, en función de la posición de las que dan acceso a las entradas de hombre. Este reparto será el aplicado en cada todas las columnas de platos.

Los espesores encontrados son tres. De izquierda a derecha: el que debe añadirse a la sección de agotamiento, el que debe añadirse a la de rectificación, (ambos calculados según A2.30.3 a los datos pertinentes) y al cono, (tomado como promedio de los anteriores). El espesor calculado debe añadirse al encontrado para presión interna a cada uno de los cuerpos que forman las torres.

Análogamente, para las torres segunda y tercera se obtiene el siguiente valor de espesor por carga de viento:

Carga por viento					
<b>V (lb)</b>	100574,056	<b>M (lb-ft)</b>	12270958,740	<b>Casco</b>	
<b>V (lb)</b>	5946,391	<b>M (lb-ft)</b>	719567,987	<b>Escalera</b>	
<b>V (lb)</b>	196,560	<b>M (lb-ft)</b>	3931,200	<b><math>h_{plat,1}</math> (ft)</b>	20
<b>V (lb)</b>	196,560	<b>M (lb-ft)</b>	9828,000	<b><math>h_{plat,2}</math> (ft)</b>	50
<b>V (lb)</b>	196,560	<b>M (lb-ft)</b>	15724,800	<b><math>h_{plat,3}</math> (ft)</b>	80
<b>V (lb)</b>	196,560	<b>M (lb-ft)</b>	21621,600	<b><math>h_{plat,4}</math> (ft)</b>	110
<b>V (lb)</b>	196,560	<b>M (lb-ft)</b>	27518,400	<b><math>h_{plat,5}</math> (ft)</b>	140
<b>V (lb)</b>	196,560	<b>M (lb-ft)</b>	32432,400	<b><math>h_{plat,6}</math> (ft)</b>	165
<b>V (lb)</b>	196,560	<b>M (lb-ft)</b>	38329,200	<b><math>h_{plat,7}</math> (ft)</b>	195
<b>V (lb)</b>	196,560	<b>M (lb-ft)</b>	44226,000	<b><math>h_{plat,8}</math> (ft)</b>	225
<b>V (lb)</b>	196,560	<b>M (lb-ft)</b>	47571,131	<b><math>h_{plat,9}</math> (ft)</b>	242
<b>V (lb)</b>	108289,487	<b>M (lb-ft)</b>	13231709,460	<b>Total</b>	
<b><math>M_T</math> (lb-ft)</b>	12530021,380	<b><math>R_m</math> (in)</b>	99,537	<b><math>t_{c,w}</math> (in)</b>	<b>0,325</b>

Tabla. A4.XIX. Primera estimación del espesor por carga del viento. Torres segunda y tercera

---

Se está en condiciones de estimar el peso de los recipientes en una primera prueba.

#### A4.C1.2.5. Diseño mecánico (V). Determinación del peso de los aparatos en operación

Los siguientes cálculos requerirán conocer el peso del aparato, por lo que, llegado este punto se hace preciso dilucidarlo en una primera prueba.

Los aparatos están compuesto por: casco, (la primera torre, adicionalmente un cono reductor), cabezales, plataformas, escalera, envolvente de aluminio, aislamiento y líquido en operación, en primera instancia. Conocido el peso en operación de los recipientes, podrá estimarse tanto el espesor del faldón como aquél preciso para soportar la carga sísmica. Conocidos éstos se reevalúa la carga por viento, (ya que el espesor del casco es mayor al sumar la anterior contribución), se efectúa lo propio con el peso y así sucesivamente hasta lograr la convergencia.

El primer elemento mencionado en el presente cálculo es el casco. Conocida la geometría del cilindro, el volumen de material viene dado por la ecuación (A2.37) que será de aplicación directa en el caso de las torres segunda y tercera, mientras que para la primera deberá aplicarse dos veces, (modificando convenientemente sus variables de diámetro y altura) para cada una de las secciones.

El diámetro interno y la altura del casco, se toman y convierten oportunamente de la Tabla A4.II. El diámetro externo se calcula a partir del interno conocido el espesor del casco a partir de las expresiones (A2.38), nuevamente de aplicación directa para las torres segunda y tercera y considerando cada cuerpo cilíndrico en la torre primera y los respectivos espesores por carga de viento calculados en el apartado anterior. Tales espesores deberán redondearse convenientemente al valor comercial, como se ha efectuado en apartados anteriores.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Conocido el volumen del casco, una vez aplicadas (A2.38) y (A2.37), el peso del mismo se calcula según (A2.39) conocida la densidad teórica del acero, tomada de *Megyesy*, (la que emplea el autor para calcular el peso de cascos y cabezales), con el valor de  $\rho_{\text{acero}} = 0,28333 \text{ lb/in}^3$ .

Finalmente, será preciso considerar, para el caso de la primera torre, el peso del cono reductor. Sean las siguientes expresiones:

$$(A4.4) \begin{cases} V_{\text{cono}} = \frac{\pi}{12} \cdot H_{\text{cono}} \cdot (D_{e,\text{cono}}^2 - D_{i,\text{cono}}^2 + D_{e,\text{cono}}d_{e,\text{cono}} - D_{i,\text{cono}}d_{i,\text{cono}} + d_{e,\text{cono}}^2 - d_{i,\text{cono}}^2) (1) \\ D_{e,\text{cono}} = D_{i,\text{cono}} + 2 \cdot t_{\text{cono pi+w}} = D_{i,\text{Agot}} + 2 \cdot (t_{\text{cono,pi}} + t_{\text{cono,w}}) (2) \\ d_{e,\text{cono}} = d_{i,\text{cono}} + 2 \cdot t_{\text{cono pi+w}} = D_{i,\text{Rect}} + 2 \cdot (t_{\text{cono,pi}} + t_{\text{cono,w}}) (3) \end{cases}$$

Donde los diámetros externo e interno, mayor y menor, del cono reductor, coinciden respectivamente con los diámetros externo del cuerpo cilíndrico inferior y superior e interior de los mismos cuerpos. El espesor del cono se toma como la suma de las contribuciones de la carga de presión interna y la del viento recién calculada. La masa se calcula análogamente, multiplicando el volumen calculado por la densidad teórica del acero. Así, se obtiene para la primera torre:

Peso del recipiente						
$t_{\text{Agot pi+w}} \text{ (in)}$	0,990	1"	$D_{i,\text{Agot}} \text{ (in)}$	255,906	$D_{e,\text{Agot pi+w}} \text{ (in)}$	257,906
$H_{\text{Agot}} \text{ (in)}$	1923,528	$\rho_{\text{teórico acero}} \text{ (lb/in}^3\text{)}$		0,28333	<b>Sección Agot. (lb)</b>	<b>439859,797</b>
$t_{\text{Rect pi+w}} \text{ (in)}$	0,996	1"	$D_{i,\text{Rect}} \text{ (in)}$	196,850	$D_{e,\text{Rect pi+w}} \text{ (in)}$	198,850
$H_{\text{Rect}} \text{ (in)}$	977,134	$\rho_{\text{teórico acero}} \text{ (lb/in}^3\text{)}$		0,28333	<b>Sección Rect. (lb)</b>	<b>172081,196</b>
$t_{\text{cono pi+w}} \text{ (in)}$	1,170	1-3/16"	$D_{i,\text{cono}} \text{ (in)}$	255,906	$D_{e,\text{cono pi+w}} \text{ (in)}$	258,280
$d_{i,\text{cono}} \text{ (in)}$	196,850	$d_{e,\text{cono}} \text{ (in)}$	199,225	$\rho_{\text{teórico acero}} \text{ (lb/in}^3\text{)}$		0,28333
$H_{\text{cono}} \text{ (in)}$	51,143	<b>Cono (lb)</b>	<b>12301,854</b>	<b>Casco (lb)</b>		<b>624242,846</b>

Tabla. A4.XX. Primera estimación del peso del casco de la primera torre

Donde los espesores para cada elemento se han tomado del apartado correspondiente a esfuerzo por presión interna y carga por viento, se han sumado y redondeado al espesor comercial. Segui-

damente se han sumado dos veces a los diámetros internos para obtener los externos y se han aplicado las ecuaciones descritas en los anexos segundo y presente, para obtener el peso de casco como suma de la sección de rectificación, agotamiento y el cono reductor. Procediendo análogamente para el caso de las torres segunda y tercera se obtiene:

Peso del recipiente						
$t_{c,pi+w}$ (in)	0,929	15/16"	$D_i$ (in)	196,850	$D_{e,c}$ (in)	198,725
$H$ (in)	2849,480	$\rho_{acero}$ (lb/in <sup>3</sup> )	0,28333	$m_{casco}$ (lb)	470304,438	

Tabla. A4.XXI. Primera estimación del peso del casco de las torres segunda y tercera

Se sigue el cálculo del peso de cada cabezal. La geometría de estos elementos es algo más complicada que la del casco cilíndrico. Una imagen de cabezal tipo “Klopper” se presenta en la Figura A2.8 junto a sus principales dimensiones y relaciones dimensionales.

Tales relaciones permiten encontrar unas distancias conocidas otras. El casquete toriesférico está formado por el sector abombado superior de altura  $H$ , (en la Figura A2.8), y una extensión cilíndrica, denominada faldilla, concebida para relajar las tensiones en la soldadura al casco. La empresa guipuzcoana *FACME* proporciona las expresiones para el cálculo del volumen del sector abombado. El cilíndrico se calcula como en el caso anterior. Son de aplicación las expresiones recogidas en (A2.40) y las consideraciones de cálculo mencionadas en tal anexo, para las torres segunda y tercera. Debe recordarse que los cabezales de la primera torre no son idénticos puesto que cierran cascos de distinto diámetro. Deberá por consiguiente aplicarse el mismo procedimiento dos veces.

Descrita, por tanto la procedencia de los datos, se aplican las ecuaciones (A2.40) y se obtiene, para los cabezales de la primera torre:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Peso del recipiente						
$t_{cab\ inf,pi}$ (in)	0,959	1-3/16"	$D_{i,cab\ inf}$ (in)	255,906	$D_{e,cab\ inf}$ (in)	258,280
L/r	10	$r_i$ (in)	25,590	$r_e$ (in)	25,828	
$t_{cab\ sup,pi}$ (in)	0,761	1-3/16"	$D_{i,cab\ sup}$ (in)	196,850	$D_{e,cab\ sup}$ (in)	199,225
L/r	10	$r_i$ (in)	19,685	$r_e$ (in)	19,922	
$m_{cabezales}$ (lb)				22834,826		

Tabla. A4.XXII. Primera estimación del peso de los cabezales de la primera torre

Para las torres segunda y tercera se tiene:

Peso del recipiente						
$t_{cab,pi}$ (in)	0,758	1"	$D_{i,cab}$ (in)	196,850	$D_{e,cab}$ (in)	198,850
L/r	10	$r_i$ (in)	19,685	$r_e$ (in)	19,885	
$m_{cabezales}$ (lb)				14275,754		

Tabla. A4.XXIII. Primera estimación del peso de los cabezales de las torres segunda y tercera

Donde se ha tomado el espesor comercial de los cabezales, mostrado en apartados anteriores, y se ha redondeado al inmediatamente superior de los respectivos espesores de sus cuerpos cilíndricos, (según norma *ASME*).

El peso de cada plataforma y de la escalera se ha tomado directamente de *Megyesy* y queda tabulado en A2.XLIV.

Sigue el cálculo del peso de aislamiento y chapa envolvente. Ambos son descritos geoméricamente por un cilindro hueco, por lo que el volumen se estima de forma análoga a como se ha practicado anteriormente. Es de utilidad la ecuación (A2.37) *mutatis mutandis* los subíndices para el volumen del casco y el diámetro interno, (véase más abajo); *ídem* aplica la ecuación (A2.39), en este caso cambiando subíndices de masa, volumen y densidad, para el caso de las torres segunda y tercera. Para la primera, básicamente se procede de igual forma con los cuerpos cilíndricos y para el cono reductor, se hace uso de (A4.4), para obtener el volumen de material tanto de

aislamiento como de chapa envolvente. Nuevamente la masa se calcula multiplicando el volumen por la densidad de los materiales.

La densidad teórica del aluminio 1100 H14, se ha tomado de un catálogo comercial de la empresa *Ulbrinox*. La densidad del aislamiento, (lana de vidrio) se ha tomado de otro catálogo comercial, en este caso, de la empresa *Big Mat*. Los valores son los que siguen:  $\rho_{\text{aluminio}} = 0,098 \text{ lb/in}^3$  y  $\rho_{\text{lana de vidrio}} = 65 \text{ kg/m}^3 (2,348 \cdot 10^{-3} \text{ lb/in}^3)$ .

Para la chapa envolvente, el diámetro interno, (de los cuerpos de agotamiento, rectificación, cono o casco de las torres segunda y tercera), es el que incluye los espesores correspondientes, determinados en apartados anteriores, sometidos a presión interna y carga por viento además del espesor del aislamiento; el diámetro externo añade al interno el espesor de la envolvente de aluminio, tal como figura en (A2.42).

Aplicando tal ecuación y las consideraciones hechas en el anexo segundo, se obtiene el peso de la envolvente. Sean las siguientes tablas:

Peso del recipiente					
$t_{\text{ais}} \text{ (in)}$	1,575	$t_{\text{env}} \text{ (in)}$	0,024	$D_{\text{e, Agot+ais}} \text{ (in)}$	261,055
$D_{\text{e, Agot}} \text{ (in)}$	261,103	$H_{\text{Agot}} \text{ (in)}$	1923,528	$\rho_{\text{teórico Al}} \text{ (lb/in}^3\text{)}$	0,098
$t_{\text{ais}} \text{ (in)}$	1,575	$t_{\text{env}} \text{ (in)}$	0,024	$D_{\text{e, Rect+ais}} \text{ (in)}$	202,000
$D_{\text{e, Rect}} \text{ (in)}$	202,048	$H_{\text{Rect}} \text{ (in)}$	977,134	$\rho_{\text{teórico Al}} \text{ (lb/in}^3\text{)}$	0,098
$t_{\text{ais}} \text{ (in)}$	1,575	$t_{\text{env}} \text{ (in)}$	0,024	$D_{\text{e, cono+ais}} \text{ (in)}$	261,430
$D_{\text{e, cono}} \text{ (in)}$	261,478	$H_{\text{cono}} \text{ (in)}$	51,143	$\rho_{\text{teórico Al}} \text{ (lb/in}^3\text{)}$	0,098
$d_{\text{e, casco cono+ais}} \text{ (in)}$	202,375	$d_{\text{e, cono}} \text{ (in)}$	202,423	<b>Envolvente (lb)</b>	<b>5260,437</b>

Tabla. A4.XXIV. Primera estimación del peso de la envolvente de aluminio de la torre primera

Los espesores de aislamiento y envolvente se especificaron en el apartado A4.C1.2.3. El diámetro externo de los cuerpos de agotamiento, rectificación y el cono reductor, incluye el diámetro interno, dos veces el espesor por presión interna y otras tantas el derivado de

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

la carga por viento y vienen tabulados en A4.XX. Los  $D_{e, Agot+ais}$ ,  $D_{e, Rect+ais}$  y  $D_{e, cono+ais}$  Vienen por la suma de los anteriores y el espesor de aislamiento, mientras que los  $D_{e, Agot}$ ,  $D_{e, Rect}$  y  $D_{e, cono}$  son los diámetros externos de cada cuerpo, puesto que suman el espesor de la envolvente a los cuerpos aislados, siendo ésta la última capa. La chapa envolvente es el cilindro hueco que forman los diámetros aislados y externos de cada cuerpo. En base a esto y las ecuaciones geométricas desarrolladas se obtiene el volumen que multiplicado por la densidad procura la masa: la que proporciona la Tabla A4.XXIV suma las contribuciones de las tres chapas envolventes correspondientes a los tres cuerpos.

Para el caso similar al descrito en el anexo segundo que suponen las torres segunda y tercera se obtiene:

Peso del recipiente					
$t_{ais}$ (in)	1,574	$t_{env}$ (in)	0,024	$D_{i,env}$ (in)	201,875
$D_e$ (in)	201,923	H (in)	2849,480	$\rho_{Al}$ (lb/in <sup>3</sup> )	0,098
$m_{envolvente}$ (lb)			4253,750		

Tabla. A4.XXV. Primera estimación del peso de la envolvente de aluminio de las torres segunda y tercera

Para el aislamiento, el procedimiento es similar: se calcula el volumen formado por los cilindros huecos cuyos diámetros internos corresponden a los diámetros del casco de los distintos cuerpos, (el que suma las contribuciones de presión interna y viento) y cuyos diámetros externos corresponden a los anteriores una vez sumado dos veces el espesor del aislamiento. Por tanto, operando análogamente y observando las expresiones (A2.43) se consigue para las torres segunda y tercera:

Peso del recipiente					
$D_{i,ais}$ (in)	198,725	$D_{e,ais}$ (in)	201,875	H (in)	2849,480
$\rho_{Lana\ de\ vidrio}$ (lb/in <sup>3</sup> )	$2,348 \cdot 10^{-3}$	$m_{aislamiento}$ (lb)	6630,892		

Tabla. A4.XXVI. Primera estimación del peso del aislamiento de las torres segunda y tercera

Y para la torre primera:

Peso del recipiente					
$D_{i,ais\ Agot}\ (in)$	257,905	$D_{e,ais\ Agot}\ (in)$	261,055	$H_{Agot}\ (in)$	1923,528
$D_{i,ais\ Rect}\ (in)$	198,850	$D_{e,ais\ Rect}\ (in)$	202,000	$H_{Rect}\ (in)$	977,134
$D_{i,ais\ cono}\ (in)$	258,280	$D_{e,ais\ cono}\ (in)$	261,430	$H_{cono}\ (in)$	51,143
$\rho_{plana\ de\ vidrio}\ (lb/in^3)$	$2,348 \cdot 10^{-3}$	$m_{aislamiento}\ (lb)$	<b>8210,777</b>		

Tabla. A4.XXVI. Primera estimación del peso del aislamiento de la torre primera

Donde los diámetros internos del cilindro hueco que forma el aislamiento, coinciden con los diámetros de casco que consideran la carga de presión interna y viento, tabulados en A4.XX; los diámetros externos de dicho cilindro hueco suponen la suma del doble espesor de aislamiento a los anteriores. El resto del procedimiento es conocido a partir de las aclaraciones realizadas.

Debe finalmente estimarse el peso de los platos, como elementos estructurales de las torres. Para ello se efectuará la suposición de que consisten en discos macizos del espesor dilucidado en el anexo de cálculo anterior, 0,0045 m. Por tanto, su volumen será el de un cilindro de diámetro igual al cuerpo que los contiene y altura igual al espesor:

$$(A4.5) \begin{cases} V_{p,Agot/Rect}\ (in^3) = \frac{\pi}{4} \cdot H_p \cdot D_{i,Agot/Rect}^2 = \frac{\pi}{4} \cdot t_p\ (in) \cdot T_{Agot/Rect}^2\ (in^2) \quad (1) \\ m_p\ (lb) = \rho_{acero}\ (lb/in^3) \cdot \left[ \left( NPR_{Agot} \cdot V_{p,Agot}\ (in^3) \right) + \left( NPR_{Rect} \cdot V_{p,Rect}\ (in^3) \right) \right] \quad (2) \end{cases}$$

En la torre primera existe reducción de diámetro, por lo que deberá calcularse por separado la masa de los platos de cada sección. Operando sobre datos conocidos se obtiene, para la primera torre:

Peso del recipiente					
$t_p\ (in)$	0,177	$T_{Agot}\ (in)$	255,906	$T_{Rect}\ (in)$	196,850
$V_{p,Agot}\ (in^3)$	9112,299	$V_{p,Rect}\ (in^3)$	5391,893	$NPR_{Agot}$	50
$NPR_{Rect}$	26	$\rho_{teórico\ acero}\ (lb/in^3)$	0,28333	$m_p\ (lb)$	<b>168809,193</b>
		$m_{armado}\ (lb)$	<b>678147,327</b>		

Tabla. A4.XXVII. Primera estimación del peso de platos y armado, (1ª torre)

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Para las torres segunda y tercera se obtiene:

Peso del recipiente					
$t_p$ (in)	0,177	$T_{Rect}$ (in)	196,850	$V_{p, Rect}$ (in <sup>3</sup> )	5391,893
$NPR_{Rect}$	75	$\rho_{teórico\ acero}$ (lb/in <sup>3</sup> )	0,28333	$m_p$ (lb)	114576,375
		$m_{armado}$ (lb)	512819,645		

Tabla. A4.XXVIII. Primera estimación del peso de platos y armado, (torres segunda y tercera)

En las dos tablas precedentes se ha incluido además el peso de armado inicial, es decir, la contribución de cada elemento estructural al peso del recipiente en vacío. Viene dado por la siguiente ecuación:

$$m_{armado}(\text{lb}) = m_{casco}(\text{lb}) + m_{cabezales}(\text{lb}) + 9 \cdot m_{plataforma}(\text{lb}) + m_{escalera}(\text{lb/ft}) \cdot H_{esc}(\text{ft}) + m_{envolvente}(\text{lb}) + m_{aislamiento}(\text{lb}) + m_p(\text{lb}) \quad (A4.6)$$

Seguidamente debe calcularse el peso del líquido en operación, lo que proporcionará, sumado al peso de armado, el denominado peso en operación. Como criterio de diseño, en lugar de estimar el peso del líquido, se efectuará lo propio con el que correspondería a un volumen de agua igual que el del recipiente. Esta consideración permite asegurar la resistencia mecánica de cada recipiente no sólo en operación, (ya que el nivel de líquido corresponde a un volumen inferior a la capacidad del recipiente lleno de agua más densa), sino en condiciones de prueba hidráulica. El cálculo requiere estimar la capacidad tanto del casco como de los cabezales que, sumada, resulta la total del recipiente.

El volumen de cabezales se encuentra por aplicación de la ecuación (A2.45) a los datos pertinentes de diámetro interno de los mismos. El volumen de un casco cilíndrico viene dado por la ecuación (A2.46). Restaría obtener el volumen del cono, lo que se practicará por aplicación de la ecuación (A4.1.1) sobre los datos conocidos de diámetros internos mayor y menor. Por último, deberá restarse el volumen de los platos, para lo que se tomará la masa de los mismos

que, dividida por la densidad del acero proporciona el volumen total de platos que no ocupa el agua. El cálculo final de la masa de agua resulta de multiplicar la densidad de la misma por los volúmenes:

- Suma de cabezal inferior, casco inferior, cono reductor, casco superior y cabezal superior menos el volumen de platos, para la torre primera.
- Suma de cabezales y casco menos el volumen de platos, para las torres segunda y tercera.

La masa de agua convertida en libras se tabula seguidamente junto al peso total del recipiente en cada caso:

Peso del recipiente					
$V_{cab\ inf} (m^3)$	30,416	$V_{cab\ sup} (m^3)$	14,323	$H_{Agot} (m)$	48,858
$D_{Agot} (m)$	6,500	$H_{Rect} (m)$	24,819	$D_{Rect} (m)$	5,000
$V_{casco} (m^3)$	2108,569	$V_{cono} (m^3)$	33,924	$V_p (m^3)$	9,763
	$m_{agua, rec} (lb)$	<b>4800496,104</b>	$m_{rec, op} (lb)$	<b>5647452,625</b>	

Tabla. A4.XXIX. Primera estimación del peso total del recipiente en operación, (torre primera)

Donde el volumen del casco incluye la suma de los volúmenes del cuerpo inferior y el superior.

Sea, para las torres segunda y tercera:

Peso del recipiente					
$V_{cab} (m^3)$	27,991	$H_{casc} (m)$	72,377	$D_{casc} (m)$	5,000
$V_{casco} (m^3)$	1421,115	$V_p (m^3)$	6,627	$m_{agua, rec} (lb)$	<b>3180122,600</b>
		$m_{rec, op} (lb)$	<b>3807518,621</b>		

Tabla. A4.XXX. Primera estimación del peso total del recipiente en operación, (torres segunda y tercera)

Donde el volumen de cabezales incluye a los dos. El peso total del recipiente es la suma de la masa de agua de las tablas anteriores y la masa de armado de las tablas A4.XXVII y A4.XXVIII. Este peso final contempla el más severo de los requerimientos de la torre, (en prueba hidráulica) y concluye el propósito del presente apartado.

#### A4.C1.2.6. Diseño mecánico (VI). Determinación del espesor del faldón

El peso calculado en el apartado previo no incluye el del faldón, puesto que aún no ha sido diseñado, precisamente, porque la ecuación para diseñar su espesor depende del peso arriba del mismo. Una vez conocidas las dimensiones del faldón, podrá estimarse su peso que deberá ser añadido al término  $m_{rec,op}$ , para determinar la masa del equipo completo, a expensas del peso de las bridas, anillo de la base y extractor de neblina.

El espesor del faldón,  $t_{faldón}$ , viene dado por la expresión (A2.48) tomada del libro de *Megyesy*:

Las consideraciones de uso se expusieron en el anexo segundo. Merece la pena hacer notar que el diámetro externo correspondiente al cálculo del espesor del faldón de la primera columna, es el mismo que el de su sección inferior, que descansa sobre el mencionado soporte. Así se tiene el espesor calculado y redondeado que sigue:

$$t_{faldón} (1^a \text{ torre}) = 1 \text{ pulgada (25,4 mm)}$$

$$t_{faldón} (2^a \text{ y } 3^a \text{ torres}) = 1-3/16 \text{ de pulgada (30,16 mm)}$$

Procede seguidamente encontrar el peso del faldón que debe sumarse al peso del recipiente. Considerando el faldón un cilindro hueco de espesor  $t_{faldón}$ , son de aplicación las ecuaciones (A2.49) y sus consideraciones correspondientes. Así, se tiene:

Peso del recipiente						
$t_{faldón} \text{ (in)}$	0,977	1"	$D_e \text{ (in)}$	261,103	$D_{i,faldón} \text{ (in)}$	259,103
$h_T \text{ (in)}$	78,740	$\rho_{acero} \text{ (lb/in}^3\text{)}$	0,28333	$m_{faldón} \text{ (lb)}$	18229,902	
$m_{sep, op} \text{ (lb)}$				5665682,526		

Tabla. A4.XXXI. Primera estimación del peso total del separador en operación, (1ª torre)

<b>Peso del recipiente</b>						
$t_{\text{faldón}} \text{ (in)}$	1,019	<b>1-3/16"</b>	$D_e \text{ (in)}$	201,923	$D_{i,\text{faldón}} \text{ (in)}$	199,548
$h_T \text{ (in)}$	78,740	$\rho_{\text{acero}} \text{ (lb/in}^3\text{)}$		0,28333	$m_{\text{faldón}} \text{ (lb)}$	<b>16706,927</b>
		$m_{\text{sep, op}} \text{ (lb)}$		<b>3824225,548</b>		

Tabla. A4.XXXII. Primera estimación del peso total del separador en operación, (segunda y tercera torres)

Donde se ha aplicado (A2.50), obteniéndose la masa del separador en operación, sumando a la del recipiente en operación, el peso del faldón.

A4.C1.2.7. Diseño mecánico (VII). Determinación del espesor requerido para soportar la carga sísmica

Las cargas en una torre bajo fuerzas sísmicas son semejantes a las soportadas por una viga en voladizo cuando la carga se incrementa uniformemente hacia el extremo libre. El método de diseño se basa en este modelo y plantea las ecuaciones (A2.51) y (A2.52) para el cálculo del esfuerzo cortante y el momento causado a cualquier altura. Por su parte, el espesor requerido para soportar el esfuerzo sísmico sigue la expresión (A2.53). El procedimiento de cálculo es el descrito en el anexo segundo:

- Fijados Z, I y K, se aplica a los datos mencionados (A2.52.1) para obtener el período fundamental de vibración.
- Conocido T, se encuentran C y S empleando, respectivamente, las expresiones (A2.52.2) y (A2.52.3).
- Se obtiene el esfuerzo cortante sísmico V, por aplicación de (A2.51.1) sobre los datos dados y los consignados en los guiones anteriores. Sigue el uso de (A2.52.4) para la obtención de la fuerza sísmica horizontal,  $F_t$ .
- Se calculan los momentos total y sobre la línea de tangencia del recipiente y el faldón, M y  $M_T$  respectivamente, por aplicación sucesiva de (A2.51.2) y (A2.51.3) sobre datos conocidos, para el caso de las torres segunda y tercera, com-

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

puestas por un solo casco cilíndrico. El procedimiento para la torre primera requiere calcular los momentos para cada uno de los cuerpos, siendo el momento  $M$  la suma de cada uno de los que corresponden a las secciones de agotamiento y rectificación. Estos momentos se calculan sustituyendo en (A2.51.2) la  $H_{tot}$  por la que corresponde a cada una de las secciones, en los mismos términos que en el cálculo de la carga por viento.

- Se determina finalmente el espesor por aplicación de (A2.53), para las torres segunda y tercera. Para la torre primera, se preverá un espesor para cada cuerpo en los mismos términos que se efectuó en el cálculo de la carga por viento.

Se obtiene:

Carga sísmica					
Z	0,375	I	1	K	2
H (ft)	252,545	H <sub>Agot</sub> (ft)	168,987	H <sub>Rect</sub> (ft)	83,559
D <sub>Agot</sub> (ft)	21,758	D <sub>Rect</sub> (ft)	16,837	t <sub>faldón</sub> (1 in)	1
w (lb/ft)	22434,313	T (s)	2,986	C (obtenido)	0,038
C (tomado)	0,038	S (T>2,5)	1,490	W (lb)	5665682,526
V (lb)	244039,046	0,25V (lb)	61009,761	F <sub>t</sub> (lb)	51011,870
M <sub>Agot</sub> (lb-ft)	30366328,540	M <sub>Rect</sub> (lb-ft)	15015234,870	M (lb-ft)	45381563,420
M <sub>T</sub> (lb-ft)	1179111,901	R <sub>m,Agot</sub> (in)	129,252	R <sub>m,Rect</sub> (in)	99,725
t <sub>c,s</sub> (in)	<b>0,018</b>	t <sub>c,s</sub> (in)	<b>0,030</b>	t <sub>c,s</sub> (in)	<b>0,024</b>

Tabla. A4.XXXIII. Primera estimación del espesor por carga sísmica para la torre primera

Donde los diámetros de agotamiento y rectificación son los externos más actualizados, esto es, los que suman al diámetro interno el espesor de casco sometido a presión interna y carga de viento, aislamiento y chapa envolvente; las alturas son las mismas que las mostradas en el cálculo de la carga por viento y los radios medios son los promedios entre la mitad de los diámetros internos y los presentados en la anterior tabla. Los espesores corresponden, de iz-

quiera a derecha, al que debe añadirse a la sección de agotamiento, a la sección de rectificación y al cono reductor, (obtenido como promedio de los anteriores).

Por su parte, para el caso de segunda y tercera torres, procediendo de forma análoga al cálculo presentado en el anexo segundo se obtiene:

Carga sísmica					
<b>Z</b>	0,375	<b>I</b>	1	<b>K</b>	2
<b>H<sub>tot</sub> (ft)</b>	244,018	<b>D<sub>e</sub> (ft)</b>	16,827	<b>t<sub>faldón</sub> (1-3/16 in)</b>	1,1875
<b>w (lb/ft)</b>	15671,875	<b>T (s)</b>	2,626	<b>C (obtenido)</b>	0,04
<b>C (tomado)</b>	0,04	<b>S (T&gt;2,5)</b>	1,499	<b>W (lb)</b>	3824225,548
<b>V (lb)</b>	176896,617	<b>0,25V (lb)</b>	44224,154	<b>F<sub>t</sub> (lb)</b>	32519,605
<b>M (lb-ft)</b>	31422476,770	<b>M<sub>T</sub> (lb-ft)</b>	844953,716	<b>R<sub>m</sub> (in)</b>	99,693
<b>S (psi)</b>	17500	<b>E</b>	0,85	<b>t<sub>c,s</sub> (in)</b>	<b>0,022</b>

Tabla. A4.XXXIV. Primera estimación del espesor por carga sísmica para las torres segunda y tercera

En ambas tablas se verifican las restricciones especificadas en el anexo segundo. El esfuerzo S y la eficacia E, mostradas en la Tabla A4.XXXIV, son las mismas magnitudes que las aplicadas en el cálculo de espesores participado en la Tabla A4.XXXIII. Los espesores obtenidos deben sumarse a los calculados por carga de viento y presión interna y reevaluar tanto el peso como, nuevamente, dichas cargas.

#### A4.C1.2.8. Diseño mecánico (VIII). Diseño del anillo de la base

Antes de reevaluar los espesores resistentes a la carga sísmica y eólica, se dimensionarán el resto de elementos estructurales del recipiente que, por su peso, contribuyen al peso total del mismo.

El primer elemento que se diseña es el anillo de la base. Este anillo permite el anclaje, por medio de pernos, del recipiente a la cimentación. Las normas de diseño mecánico preconizan el uso de un número de pernos múltiplo de cuatro y, en ningún caso inferior a tal

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

cifra. Asimismo, puesto que la capacidad de anclaje de pernos próximos es limitada, se sugiere acomodarlos a distancias no menores de 18 pulgadas. El diámetro de los pernos está tabulado en función del área en la raíz, lo que se estimará aplicando el método que se propone seguidamente. Además debe aumentarse 1/8 de pulgada el diámetro calculado de los pernos como margen de corrosión. El método de cálculo seleccionado viene dado por las expresiones (A2.54) que requerirán las (A2.55). Las consideraciones efectuadas en el anexo segundo continúan siendo válidas, Con lo que, se está en disposición de sustituir las ecuaciones de obtener, para la torre primera:

Diseño del anillo de la base							
<b>D (in)</b>	261,103	<b>A<sub>B</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	53544,406	<b>C<sub>B</sub> (in)</b>	820,280	<b>M (lb-ft)</b>	45381563,420
<b>W (lb)</b>	865186,421	<b>T (lb/in)</b>	<b>9115,855</b>	<b>N</b>	44	<b>S<sub>B</sub> (psi)</b>	15000
<b>B<sub>A</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	<b>11,330</b>	<b>B<sub>A</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	11,5	<b>S<sub>B</sub> (psi)</b>	<b>14777,769</b>	<b>l<sub>2</sub> (in)</b>	4,75

Tabla. A4.XXXV. Primer cálculo de tamaño y número de pernos para la primera torre

Y para las torres segunda y tercera:

Diseño del anillo de la base							
<b>D (in)</b>	201,923	<b>A<sub>B</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	32022,969	<b>C<sub>B</sub> (in)</b>	634,360	<b>M (lb-ft)</b>	31422476,770
<b>W (lb)</b>	644102,947	<b>T (lb/in)</b>	<b>10759,618</b>	<b>N</b>	32	<b>S<sub>B</sub> (psi)</b>	15000
<b>B<sub>A</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	<b>14,220</b>	<b>B<sub>A</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	14,5	<b>S<sub>B</sub> (psi)</b>	<b>14710,065</b>	<b>l<sub>2</sub> (in)</b>	5,25

Tabla. A4.XXXVI. Primer cálculo de tamaño y número de pernos para las torres segunda y tercera

Donde el área en la raíz, B<sub>A</sub> seleccionada proporciona un tamaño de perno, (incluyendo margen de corrosión), de 4-1/2 de pulgada en el caso de la primera torre y 5" en el caso de la segunda y tercera torres, extrapolando de la Figura A2.11.

La dimensión l<sub>2</sub>, correspondiente al tamaño del perno incluida corrosión y extrapolada de la Figura A2.11, sumada dos veces al diámetro externo proporciona el diámetro real, D, del círculo de pernos.

Partiendo del nuevo diámetro, procede seguidamente rehacer los cálculos mostrados en las tablas A4.XXXV y A4.XXXVI, a fin de verificar la concordancia de la selección de pernos con las nuevas dimensiones. Se obtiene para la primera torre:

<b>Diseño del anillo de la base (Segundo cálculo)</b>							
<b>D (in)</b>	270,603	<b>A<sub>B</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	57511,617	<b>C<sub>B</sub> (in)</b>	850,125	<b>M (lb-ft)</b>	45381563,420
<b>W (lb)</b>	865186,421	<b>T (lb/in)</b>	<b>8451,305</b>	<b>N</b>	44	<b>S<sub>B</sub> (psi)</b>	15000
<b>B<sub>A</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	<b>10,885</b>	<b>B<sub>A</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	11	<b>S<sub>B</sub> (psi)</b>	<b>14844,348</b>	<b>l<sub>2</sub> (in)</b>	4,75

Tabla. A4.XXXVII. Segundo cálculo de tamaño y número de pernos para la primera torre

Y para la segunda y tercera torres:

<b>Diseño del anillo de la base (Segundo cálculo)</b>							
<b>D (in)</b>	212,423	<b>A<sub>B</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	35439,949	<b>C<sub>B</sub> (in)</b>	667,347	<b>M (lb-ft)</b>	31422476,770
<b>W (lb)</b>	644102,947	<b>T (lb/in)</b>	<b>9674,510</b>	<b>N</b>	36	<b>S<sub>B</sub> (psi)</b>	15000
<b>B<sub>A</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	<b>11,956</b>	<b>B<sub>A</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	12	<b>S<sub>B</sub> (psi)</b>	<b>14945,027</b>	<b>l<sub>2</sub> (in)</b>	4,75

Tabla. A4.XXXVIII. Segundo cálculo de tamaño y número de pernos para las torres segunda y tercera

Donde, para su dimensión real, se requiere el mismo tamaño de perno en los dos casos: 4-1/2 de pulgada incluyendo margen de corrosión, una vez extrapolado conocida el área en la raíz del perno. El esfuerzo sobre los pernos es inferior al permitido, por lo que el cálculo es conforme.

Seguidamente se comprueba la resistencia mecánica del anillo de la base, que debe tanto distribuir la carga sobre un área suficiente como soportar los esfuerzos de flexión inducidos por viento o sismo, (el mayor de ellos). Lo que es tanto como calcular las dimensiones del anillo y corroborar que los esfuerzos sufridos son inferiores a los permitidos. La Figura A2.12 muestra las dimensiones del anillo de la base. Serán de aplicación las ecuaciones (A2.56), considerando (A2.57) sobre datos ya conocidos. Se obtiene, para la primera torre:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Diseño del anillo de la base							
$A_s$ (in <sup>2</sup> )	53544,4057	$C_s$ (in)	820,280	$W$ (lb)	5665682,526	$M$ (lb-ft)	45381563,420
$P_c$ (lb/in)	<b>17077,613</b>	$t_{\text{faldón}}$ (1 in)	1	$I_3$ (in)	3,75	$I$ (in)	10,5
$I_1$ (in)	8,5	$t_B$ (in)	<b>2,72</b>	$D_0$ (in)	278,103	$D_i$ (in)	257,103
$A_R$ (in <sup>2</sup> )	8827,351	$S_1$ (in <sup>2</sup> )	<b>1586,934</b>	$S_2$ (in <sup>2</sup> )	<b>16986,067</b>	$m_B$ (lb)	<b>11254,740</b>

Tabla. A4.XXXIX. Dimensiones y comprobaciones del anillo de la base de la primera torre

Y para la segunda y tercera torres:

Diseño del anillo de la base							
$A_s$ (in <sup>2</sup> )	32022,969	$C_s$ (in)	634,360	$W$ (lb)	3824225,550	$M$ (lb-ft)	31422476,770
$P_c$ (lb/in)	<b>17803,456</b>	$t_{\text{faldón}}$ (1-3/16 in)	1,1875	$I_3$ (in)	4	$I$ (in)	11,4375
$I_1$ (in)	8,75	$t_B$ (in)	<b>2,8</b>	$D_0$ (in)	219,423	$D_i$ (in)	197,548
$A_R$ (in <sup>2</sup> )	7163,807	$S_1$ (in <sup>2</sup> )	<b>1576,508</b>	$S_2$ (in <sup>2</sup> )	<b>17881,688</b>	$m_B$ (lb)	<b>9133,746</b>

Tabla. A4.XL. Dimensiones y comprobaciones del anillo de la base de la segunda y tercera torres

El espesor del anillo de la base, debe exceder al calculado a fin de garantizar que las resistencias  $S_1$  y  $S_2$  sean satisfechas. Se redondea a 4-1/2 de pulgada. Es tal valor el que se ha introducido en (A2.56.6) para obtener el esfuerzo  $S_2$  de flexión y el que aplica en adelante, hasta un segundo cálculo.

El material de construcción del anillo de la base será acero al carbono según SA-285 grado C ya que pese a ser el esfuerzo máximo permitido por el material de 13800 psi a la temperatura de operación, (véase apartados anteriores), *Megyesy* señala un valor de 18000 psi como esfuerzo máximo permisible para el anillo de la base. Así, los esfuerzos  $S_1$  y  $S_2$  cumplen con el requerimiento mecánico, por lo que la solución encontrada es conforme. El esfuerzo  $S_B$  máximo permisible para los pernos (según SA-325) es de 15000 psi.

Lo mostrado concluye el cálculo para el anillo de la base. Sigue el cálculo del peso del resto de elementos ligados a los recipientes, esto es, las tubuladuras.

---

A4.C1.2.9. Diseño mecánico (IX). Cálculo de las tubuladuras y refuerzos

La estimación del peso de las bridas de admisión y descarga requiere el dimensionado de las tuberías de la alimentación, del líquido y del vapor. Lo que supone la evaluación de las ecuaciones (A2.59) y las consideraciones efectuadas en el anexo segundo, que incluyen la descripción geométrica de los conductos, dada por las ecuaciones (A2.60). Las velocidades de flujo se estimarán cercanas a la óptima de la misma forma que se mostró en el citado anexo, si bien, no será preciso determinar el peso molecular promedio de las corrientes, ya que se dispone directamente de las densidades en unidades SI, (requeridas por los cálculos del anexo tercero de diseño hidráulico) y puede interpolarse directamente en la tabla de velocidades recomendadas de Simpson, procurada en el anexo segundo, en la Tabla A2.LIV.

Por motivos de brevedad se omitirá mostrar todas las velocidades recomendadas por tuberías, toda vez que queda indicada su forma de cálculo y se establecen las siguientes consideraciones.

Puesto que las conducciones que conectan los distintos equipos trasiegan fluidos con de diferentes características, se efectuarán las siguientes afirmaciones:

- La densidad del vapor que abandona la tercera torre, es la correspondiente al primer plato o de destilado, véase Tabla A3.XXXI. El caudal de este vapor es  $V$  de la Tabla A3.III.
- La densidad del líquido que abandona la primera torre, es la correspondiente al último plato o de residuo, véase Tabla A3.XXXIII. El caudal de este líquido es  $L'$  de la Tabla A3.III.
- La densidad del líquido que alimenta la torre, es la correspondiente al plato de alimentación, véase Tabla A3.XXXI. El caudal de este líquido es  $U$  de la Tabla A3.III.
- La densidad del vapor que se recicla a columna, procedente del calderín o rehervidor, es la correspondiente a la fase va-

por en el último plato o de residuo, véase Tabla A3.XXXIII. El caudal de este líquido es  $V'$  de la Tabla A3.III.

- La densidad del líquido de reflujo es la misma que la del destilado, véase Tabla A3.XXXI. El caudal de este líquido es  $L$  de la Tabla A3.III.

Y simplificaciones:

- La densidad del vapor que abandona la primera torre, se tomará como la del vapor de carga a la segunda, (se trata de la misma corriente) y se aproximará a la que presenta el vapor en el plato de alimentación, según la Tabla A3.XXXII. Ambas corrientes presentan caudal  $V$  de la Tabla A3.III.
- La densidad del vapor que abandona la segunda torre se tomará como la del vapor de carga a la tercera, (se trata de la misma corriente) y se aproximará al promedio entre la densidad que presenta la fase vapor en el plato de alimentación y en el destilado, según las tablas A3.XXXII y A3.XXXIII. Ambas corrientes presentan caudal  $V$  de la Tabla A3.III.
- La densidad del líquido que abandona la segunda torre, se tomará como la del líquido que se recircula a la primera torre, (se trata de la misma corriente) y se aproximará a la densidad que presenta la fase líquida en el plato de alimentación, según la Tabla A3.XXXII. Ambas corrientes presentan caudal  $L$  de la Tabla A3.III.
- La densidad del líquido que abandona la tercera torre, se tomará como la del líquido que se recircula a la segunda torre, (se trata de la misma corriente) y se aproximará al promedio de las densidades de fase líquida en los platos de destilado y alimentación, según las tablas A3.XXXI y A3.XXXII, ambas corrientes presentan caudal  $L$  de la Tabla A3.III.

Los caudales volumétricos de las corrientes indicadas se obtienen por aplicación de una modificación de las conversiones dadas por (A2.62). El caudal molar de la alimentación se toma de A2.X.

Aunque la densidad de la alimentación,  $\rho_{L_0}$ , se ha tabulado junto a la de líquido en A2.XVII, (por ser muy similares), se han efectuado los cálculos tomando su propio valor. Por ello, también se han generado en la Tabla A2.LIV velocidades para las distintas corrientes.

Conocidas las velocidades óptimas y los caudales volumétricos, puede encontrarse el radio interno para las conducciones de alimentación, líquido y vapor, por aplicación de (A2.60). Se requieren las siguientes tuberías:

- Conducción general de alimentación a temperatura de operación: Su caudal volumétrico es el determinado por la ecuación (A2.62) y la presión es de 5 atm para compensar las pérdidas de carga a su trasiego por columna. Procede de la descarga del tanque de "BLENDING" una vez le ha sido elevada la temperatura en el cambiador correspondiente.
- Conducción de descarga de fondo de primera columna: La presión es la de operación: 3 atm.
- Conducción de carga de vapor recirculado a primera columna: Procede del rehervidor. A presión de operación: 3 atm.
- Conducción de descarga de vapor de primera columna: Es la misma conducción de carga a segunda columna. A presión de operación: 3 atm.
- Conducción de recirculación de líquido de segunda a primera columna: Es la misma conducción de descarga de fondo de la segunda columna. A 4 atm para compensar pérdidas.
- Conducción de recirculación de líquido de tercera a segunda columna: Es la misma conducción de descarga de fondo de la tercera columna. A 5 atm para compensar pérdidas.
- Conducción de descarga de vapor de segunda columna: Es la misma conducción de carga a tercera columna. A presión de operación: 3 atm.
- Conducción de descarga de vapor de tercera columna: A presión de operación: 3 atm.

- Conducción de recirculación de líquido a tercera columna: Procede del acumulador de reflujo. A 5 atm para compensar pérdidas.

Las pérdidas de carga del líquido por plato se estiman multiplicando el nivel de líquido en plato, (véanse apartados de pérdidas de carga en el anexo previo) por la aceleración de la gravedad, y la mayor densidad de la columna como criterio conservador. Multiplicando por el número de platos se obtiene la pérdida de carga en unidades de presión. Así por ejemplo se tiene para la pérdida de carga que experimenta el reflujo en la tercera columna:

$$\Delta P(\text{atm}) = 75 \cdot 0,443 \text{ m} \cdot 618,557 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \frac{1 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}}{1 \text{ Pa}} \cdot \frac{1 \text{ atm}}{101325 \text{ Pa}} \cong 1,99 \text{ atm}$$

Donde multiplican los 75 platos de la columna, el nivel de líquido en el plato, (0,443 m tomado de la Tabla A3.L), la densidad, igual a la del último plato más un tercio de la diferencia con el plato de alimentación, ya que aproximadamente transcurre un tercio de la operación de separación en la tercera columna, (las densidades se han tomado de las Tablas A3.XXXI y A3.XXXII); y la aceleración de la gravedad. Se obtiene una caída de unas 2 atm, por ello el reflujo se bombea a 5 atm como queda indicado, (2 atm sobre la presión de operación). Otro tanto puede realizarse con las corrientes de vapor, si bien la caída de presión es despreciable, (apenas unos milímetros de mercurio).

A continuación se presenta el cálculo de la presión de diseño de cada tubería, y se tabulan los resultados que permitirán establecer las especificaciones del sistema de tuberías asociado a “EXTRACTIVA 1”.

Para el cálculo de la presión de diseño es de aplicación la ecuación (A2.23.1), desconsiderando la contribución de la presión del agua de prueba. Con las presiones indicadas en los guiones anteriores, la presión de diseño se obtiene, por mor de dicha ecuación, su-

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

mando el 10% de la presión de transporte en cada conducción o la presión de 30 psi, la que sea mayor. Con esto, pueden tabularse los resultados obtenidos por aplicación de las ecuaciones presentadas. Se obtiene:

<b>Cálculo de las conducciones: P-27</b>					
<b>P (psi)</b>	73,480	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	103,480	<b>S (psi)</b>	15000
<b>U (Mmol/año)</b>	16674,514	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	0,011	<b>U (ft<sup>3</sup>/s)</b>	1,682
<b>A<sub>i,tubo</sub> (ft<sup>2</sup>)</b>	0,152	<b>R<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	2,636	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,121	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	667,658	<b>D<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	<b>5,272</b>

Tabla. A4.XLI. Estimación del tamaño de la conducción general de alimentación a temperatura de operación

<b>Cálculo de las conducciones: P-28</b>					
<b>P (psi)</b>	44,088	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	74,088	<b>S (psi)</b>	15000
<b>L' (Mmol/año)</b>	34267,634	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	0,011	<b>L' (ft<sup>3</sup>/s)</b>	3,340
<b>A<sub>i,tubo</sub> (ft<sup>2</sup>)</b>	0,330	<b>R<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	3,887	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,122	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	460,802	<b>D<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	<b>7,775</b>

Tabla. A4.XLII. Estimación del tamaño de la conducción de descarga de fondo de primera columna

<b>Cálculo de las conducciones: P-29</b>					
<b>P (psi)</b>	44,088	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	74,088	<b>S (psi)</b>	15000
<b>V' (Mmol/año)</b>	22759,960	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	6,931·10 <sup>-5</sup>	<b>V' (ft<sup>3</sup>/s)</b>	367,726
<b>A<sub>i,tubo</sub> (ft<sup>2</sup>)</b>	6,028	<b>R<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	16,623	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,193	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	172,634	<b>D<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	<b>33,246</b>

Tabla. A4.XLIII. Estimación del tamaño de la conducción de vapor recirculado a primera columna

<b>Cálculo de las conducciones: P-31</b>					
<b>P (psi)</b>	44,088	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	74,088	<b>S (psi)</b>	15000
<b>V (Mmol/año)</b>	22759,960	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	4,110·10 <sup>-5</sup>	<b>V (ft<sup>3</sup>/s)</b>	620,198
<b>A<sub>i,tubo</sub> (ft<sup>2</sup>)</b>	6,815	<b>R<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	17,675	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,199	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	167,336	<b>D<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	<b>35,349</b>

Tabla. A4.XLIV. Estimación del tamaño de la conducción de descarga de vapor de primera columna

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Cálculo de las conducciones: P-30					
<b>P (psi)</b>	58,784	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	88,784	<b>S (psi)</b>	15000
<b>L (Mmol/año)</b>	17593,121	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	0,011	<b>L (ft<sup>3</sup>/s)</b>	1,797
<b>A<sub>i,tubo</sub> (ft<sup>2</sup>)</b>	0,141	<b>R<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	2,546	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,117	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	670,798	<b>D<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	<b>5,093</b>

Tabla. A4.XLV. Estimación del tamaño de la conducción de recirculación de líquido de segunda a primera columna

Cálculo de las conducciones: P-32					
<b>P (psi)</b>	73,480	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	103,480	<b>S (psi)</b>	15000
<b>L (Mmol/año)</b>	17593,121	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	0,011	<b>L (ft<sup>3</sup>/s)</b>	1,862
<b>A<sub>i,tubo</sub> (ft<sup>2</sup>)</b>	0,153	<b>R<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	2,645	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,121	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	665,854	<b>D<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	<b>5,289</b>

Tabla. A4.XLVI. Estimación del tamaño de la conducción de recirculación de líquido de tercera a segunda columna

Cálculo de las conducciones: P-33					
<b>P (psi)</b>	44,088	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	74,088	<b>S (psi)</b>	15000
<b>V (Mmol/año)</b>	22759,960	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	5,366·10 <sup>-5</sup>	<b>V (ft<sup>3</sup>/s)</b>	474,976
<b>A<sub>i,tubo</sub> (ft<sup>2</sup>)</b>	6,012	<b>R<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	16,601	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,193	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	172,752	<b>D<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	<b>33,202</b>

Tabla. A4.XLVII. Estimación del tamaño de la conducción de descarga de vapor de segunda columna

Cálculo de las conducciones: P-34					
<b>P (psi)</b>	44,088	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	74,088	<b>S (psi)</b>	15000
<b>V (Mmol/año)</b>	22759,960	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	6,622·10 <sup>-5</sup>	<b>V (ft<sup>3</sup>/s)</b>	384,859
<b>A<sub>i,tubo</sub> (ft<sup>2</sup>)</b>	6,013	<b>R<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	16,602	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,193	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	172,744	<b>D<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	<b>33,205</b>

Tabla. A4.XLVIII. Estimación del tamaño de la conducción de descarga de vapor de tercera columna

<b>Cálculo de las conducciones: P-37</b>					
<b>P (psi)</b>	73,480	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	103,480	<b>S (psi)</b>	15000
<b>L (Mmol/año)</b>	17593,121	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	0,010	<b>L (ft<sup>3</sup>/s)</b>	1,932
<b>A<sub>i,tubo</sub> (ft<sup>2</sup>)</b>	0,152	<b>R<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	2,640	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,121	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	666,746	<b>D<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	<b>5,281</b>

Tabla. A4.XLIX. Estimación del tamaño de la conducción de recirculación de líquido a tercera columna.

En el título de cada tabla de conducciones se indica la denominación correspondiente, tal como figura en el plano que muestra el diagrama de flujo del proceso.

En este caso las densidades en lugar de atender a las aproximaciones antedichas, se han afinado debido a la variabilidad de las mismas, la mayor de todas las operaciones de destilación diseñadas. A este fin se han sumando a los puntos de densidad conocida el incremento o decremento que correspondería a la parte proporcional de la corriente en cuestión, tal como se efectuó en la demostración anterior para estimar la pérdida de carga del líquido.

Finalmente, cabe destacar que las velocidades recomendadas han servido de guía, si bien ha sido necesario incrementarlas en algunas conducciones, especialmente las de vapor, por motivos de construcción.

Se omitirá el resumen de tuberías como el practicado en la Tabla A2.LX, ya que en la memoria descriptiva se recoge toda la información dimensional y de flujo en cada línea del proceso.

Con las especificaciones conocidas, resta sumar el peso de las bridas asociadas a cada recipiente.

Todas las bridas se construirán en acero forjado según especificación SA-105; se clasifican por su clase de presión o, en inglés, “rating”, expresadas en psi. La clase inferior de bridas, para servicios

a baja presión como los requeridos para el presente diseño es de 150 psi ó 150#, como se nota técnicamente.

Para la clase de presión seleccionada, *Megyesy* proporciona una tabla de pesos de bridas, según diámetro nominal de las conducciones embridadas y tipo de brida. De dicha tabla se toman los pesos mostrados en la Tabla A4.L, para bridas de la clase 150# de tipo cuello soldable, según los distintos diámetros nominales de tubo asociado. La mencionada tabla de pesos, tomada de *Megyesy* se presentó al final del capítulo primero del segundo anexo. En el presente, a su término, se incluyen las tablas para bridas de grandes dimensiones, como corresponde a las calculadas de más de 30 pulgadas.

Las bridas de cuello soldable son las más extensamente utilizadas en la industria petroquímica, para líneas de proceso. Esta aplicación se denomina de responsabilidad. Por ello, se seleccionan, para las tubuladuras de entrada y salida de corrientes, este tipo de bridas.

Las bridas se sueldan a un tubo de longitud determinada por normas, (según las dimensiones de las mismas) y, por forzar la pérdida de material al insertarse en el casco o cabezales del recipiente, pueden requerir refuerzo: aquéllas conducciones de 3 pulgadas, o menor espesor, introducidas en casco o cabezal de espesor de 3/8 de pulgada, o menos, no requieren refuerzo según normas *ASME*.

Se emplearán bridas de cuello soldable introducidas en el casco: bridas de alimentación, (en el recipiente que corresponda), carga de vapor y recirculación de líquido; y cabezales: brida de descarga de líquido y de descarga de vapor, con la mínima extensión para soldar y sobresaliendo, del casco una determinada longitud según normas. Esto obliga a soldar un tramo recto de tubería, que complementa la longitud de las bridas, tabulada en *Megyesy* y transcritas en las figuras finales del primer capítulo del anexo segundo, de modo tal

que la longitud sobresaliente de la brida y el tramo de tubo sea conforme a las normas, también transcrita en el capítulo citado.

El peso de los tubos debe añadirse al nominal de la brida en la Tabla A4.L, multiplicando las longitudes correspondientes por el peso por pie de tubería, también proporcionado por *Megyesy*. Las dimensiones de las bridas, del tramo de tubo y el su peso por unidad de longitud, se proporcionan en sendas figuras al final del capítulo primero del anexo segundo como queda indicado.

Con lo antedicho y las dimensiones tomadas de las figuras indicadas, se recopila y calculan los siguientes pesos de las tubuladuras:

<b>Peso de las tubuladuras</b>			
<b>Bridas P-27, P-30, P-32 y P-37 (5" Sch 10)</b>		<b>Brida P-28 (8" Sch 60)</b>	
$W_{\text{brida } 150\#, 5"} \text{ (lb)}$	20	$W_{\text{brida } 150\#, 8"} \text{ (lb)}$	42
<b>Tubo 5", Sch 10 (ft)</b>	0,375	<b>Tubo 8", Sch 60 (ft)</b>	0,333
$W_{\text{tubo } 5", \text{ Sch } 10} \text{ (lb/ft)}$	7,77	$W_{\text{tubo } 8", \text{ Sch } 60} \text{ (lb/ft)}$	35,7
$W_{\text{tub } 5"} \text{ (lb)}$	22,914	$W_{\text{tub } 8"} \text{ (lb)}$	53,900
<b>Brida P-31 (36" Sch 10)</b>		<b>Brida P-29, P-33 y P-34 (34" Sch 10)</b>	
$W_{\text{brida } 150\#, 36"} \text{ (lb)}$	677	$W_{\text{brida } 150\#, 34"} \text{ (lb)}$	571
<b>Tubo 36", Sch 10 (ft)</b>	0,333	<b>Tubo 34", Sch 10 (ft)</b>	0,417
$D_{i36", \text{ Sch } 10} \text{ (in)}$	35,376	$D_{i34", \text{ Sch } 10} \text{ (in)}$	33,376
$D_{o36", \text{ Sch } 10} \text{ (in)}$	36	$D_{o34", \text{ Sch } 10} \text{ (in)}$	34
$W_{\text{tub } 36"} \text{ (lb)}$	680,304	$W_{\text{tub } 34"} \text{ (lb)}$	574,898
$m_{\text{bridas}} \text{ (lb) (Torre 1}^{\text{a}})$		<b>1354,929</b>	
$m_{\text{bridas}} \text{ (lb) (Torres 2}^{\text{a}} \text{ y } 3^{\text{a}})$		<b>1301,029</b>	

Tabla. A4.L. Peso de las tubuladuras

Donde los pesos  $W_{\text{brida } 150\#, \text{ DN}}$  son los pesos de brida de la categoría de 150 psi, correspondientes a los distintos diámetros nominales de las tuberías calculadas.

Las magnitudes “Tubo DN, Sch” incluyen las longitudes de los tramos de tubería soldados a las bridas, debidamente convertidas. A título de ejemplo, para la brida de 8” Sch 60 se soldará una tubería de longitud 4 pulgadas (0,333 ft) de modo que, según la magnitud C

de la Figura A2.20 para la brida de 8 pulgadas, el conjunto sobresalga 8 pulgadas del cabezal de acuerdo a la Figura A2.19 del segundo anexo.

Los valores  $W_{\text{tubo DN, Sch}}$  recogen el peso por pie de las distintas tuberías según su número de *Schedule* y diámetro nominal. Este peso se multiplica por la longitud de la tubería, de la fila previa, y se suma al peso de las bridas obteniéndose los pesos  $W_{\text{tub DN}}$ , el peso de las tubuladuras de distintos diámetros nominales.

Para las bridas grandes no se dispone ni la medida del sobresaliente, (que se ha aproximado a 10 pulgadas) ni el peso por unidad de longitud de tubería, por lo que el peso de éstas se calcula por geometría: siendo el tubo un cilindro hueco cuyos diámetros interno y externo se aportan, (en base a los datos de diámetro nominal y *Schedule* de las conducciones), puede calcularse el volumen de material tal como se ha realizado para diversos cuerpos de igual geometría a lo largo del presente capítulo. De la misma forma, al multiplicar el volumen por la densidad teórica del acero se obtiene el peso del tubo, que deberá sumarse al de la brida.

Finalmente, el peso total,  $m_{\text{bridas}}$ , es la suma de los pesos individuales de las tubuladuras. Se han proporcionado las masas de las tubuladuras que corresponden a la primera torre, (dos bridas de 5" Sch 10, una de 8" Sch 60 y otras dos, una de 34" Sch 10 y la restante de 36" Sch 10) y las que corresponden a la segunda y tercera torres, (dos bridas de 5" Sch 10 y otras dos, una de 34" Sch 10 y la restante de 36" Sch 10). Cada uno de ellos deberá sumarse al peso del separador en operación, obtenido en primera prueba apartados atrás.

Por mor de lo indicado procede reforzar todas las bridas, ya que su diámetro nominal supera las 3 pulgadas.

El refuerzo para las bridas consiste en un anillo que debe reponer la cantidad de metal eliminado por la abertura del, casco o cabezales, al perforarlo. El anillo de refuerzo se construye del mismo ma-

terial que el casco y cabezales, (acero al carbono según especificación SA-515 grado 70).

La Figura A2.13, del segundo anexo, muestra el dibujo esquemático y dimensiones asociadas al anillo de refuerzo.

El área transversal del anillo,  $A_{ref}$ , viene dada por la ecuación (A2.63) y las consideraciones efectuadas en el anexo segundo siguen siendo válidas. Las dimensiones del refuerzo se calculan, a partir de la anterior ecuación, mediante (A2.64) y su peso, mediante (A2.65). Por tanto, se tienen los siguientes refuerzos:

<b>Cálculo de anillos de refuerzo: Torre primera</b>					
<b>Tuberías de 5" (P-27 y P-30)</b>					
<b>d (in)</b>	5,295	<b>t<sub>r</sub> (in)</b>	1,1875	<b>A<sub>ref</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	6,288
<b>t<sub>ref</sub> (in)</b>	1,1875	<b>a<sub>ref</sub> (in)</b>	2,648	<b>d<sub>i</sub> (in)</b>	5,563
	<b>d<sub>o</sub> (in)</b>	10,858	<b>m<sub>ref</sub> (lb)</b>	<b>45,953</b>	
<b>Tuberías de 8" (P-28)</b>					
<b>d (in)</b>	7,813	<b>t<sub>r</sub> (in)</b>	1,25	<b>A<sub>ref</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	9,766
<b>t<sub>ref</sub> (in)</b>	1,25	<b>a<sub>ref</sub> (in)</b>	3,906	<b>d<sub>i</sub> (in)</b>	8,625
	<b>d<sub>o</sub> (in)</b>	16,438	<b>m<sub>ref</sub> (lb)</b>	<b>54,468</b>	
<b>Tuberías de 34" (P-29)</b>					
<b>d (in)</b>	33,376	<b>t<sub>r</sub> (in)</b>	1,1875	<b>A<sub>ref</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	39,634
<b>t<sub>ref</sub> (in)</b>	1,1875	<b>a<sub>ref</sub> (in)</b>	16,688	<b>d<sub>i</sub> (in)</b>	34
	<b>d<sub>o</sub> (in)</b>	67,376	<b>m<sub>ref</sub> (lb)</b>	<b>894,099</b>	
<b>Tuberías de 36" (P-31)</b>					
<b>d (in)</b>	35,376	<b>t<sub>r</sub> (in)</b>	1,25	<b>A<sub>ref</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	44,22
<b>t<sub>ref</sub> (in)</b>	1,25	<b>a<sub>ref</sub> (in)</b>	17,688	<b>d<sub>i</sub> (in)</b>	36
	<b>d<sub>o</sub> (in)</b>	71,376	<b>m<sub>ref</sub> (lb)</b>	<b>1056,595</b>	

Tabla. A4.LI. Dimensiones y peso de los anillos de refuerzo de la torre primera

Donde se ha aumentado el espesor de cascos y cabezales a la siguiente fracción comercial, en previsión de que éste aumente en la iteración de los cálculos, de modo que quede cerrada la estimación de los refuerzos. En cada refuerzo, se ha tomado bien el espesor del casco, bien el del cabezal, según corresponda al cuerpo en el que se inserta la brida.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Por su parte, para las torres segunda y tercera torres se obtiene:

<b>Cálculo de anillos de refuerzo: Torres segunda y tercera</b>					
<b>Tubería de 5" (P-30 y P-32)</b>					
<b>d (in)</b>	5,295	<b>t<sub>r</sub> (in)</b>	1,1875	<b>A<sub>ref</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	6,288
<b>t<sub>ref</sub> (in)</b>	1,1875	<b>a<sub>ref</sub> (in)</b>	2,648	<b>d<sub>i</sub> (in)</b>	5,563
	<b>d<sub>o</sub> (in)</b>	10,858	<b>W (lb)</b>	<b>45,953</b>	
<b>Tubería de 5" (P-32 y P-37)</b>					
<b>d (in)</b>	5,295	<b>t<sub>r</sub> (in)</b>	1	<b>A<sub>ref</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	5,295
<b>t<sub>ref</sub> (in)</b>	1	<b>a<sub>ref</sub> (in)</b>	2,648	<b>d<sub>i</sub> (in)</b>	5,563
	<b>d<sub>o</sub> (in)</b>	10,858	<b>W (lb)</b>	<b>38,697</b>	
<b>Tubería de 36" (P-31)</b>					
<b>d (in)</b>	35,376	<b>t<sub>r</sub> (in)</b>	1	<b>A<sub>ref</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	35,376
<b>t<sub>ref</sub> (in)</b>	1	<b>a<sub>ref</sub> (in)</b>	17,688	<b>d<sub>i</sub> (in)</b>	36
	<b>d<sub>o</sub> (in)</b>	71,376	<b>W (lb)</b>	<b>845,276</b>	
<b>Tubería de 34" (P-33 y P-34)</b>					
<b>d (in)</b>	33,376	<b>t<sub>r</sub> (in)</b>	1,1875	<b>A<sub>ref</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	39,634
<b>t<sub>ref</sub> (in)</b>	1,1875	<b>a<sub>ref</sub> (in)</b>	16,688	<b>d<sub>i</sub> (in)</b>	34
	<b>d<sub>o</sub> (in)</b>	67,376	<b>W (lb)</b>	<b>894,099</b>	
<b>Tubería de 34" (P-33)</b>					
<b>d (in)</b>	33,376	<b>t<sub>r</sub> (in)</b>	1	<b>A<sub>ref</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	33,376
<b>t<sub>ref</sub> (in)</b>	1	<b>a<sub>ref</sub> (in)</b>	16,688	<b>d<sub>i</sub> (in)</b>	34
	<b>d<sub>o</sub> (in)</b>	67,376	<b>W (lb)</b>	<b>752,925</b>	

Tabla. A4.LII. Dimensiones y peso de los anillos de refuerzo de las torres segunda y tercera

Como puede observarse algunas tuberías se repiten, dado que parten de un cuerpo y se insertan en otro: la P-33 sale del cabezal de la torre segunda y se inserta en el casco de la torre tercera. A efectos de la reiteración del cálculo del peso de los recipientes, para la primera torre se sumarán dos refuerzos de 5", y los restantes incluidos en la Tabla A4.LI, correspondientes a todas las tubuladuras. Para la segunda y tercera torres se considerará el más severo de los casos: la brida de carga de vapor de la segunda torre es de 36" mientras que en la tercera su homóloga es de 34". Así, se considerará para las dos torres indistintamente un refuerzo de 5" del menor espesor y otro

de 5" del mayor espesor, uno de 36" y otro de 34", de la Tabla A4.LII. Idéntica consideración se tomó para el cálculo del peso de las bridas correspondientes a la segunda y tercera torres.

A4.C1.2.10. Diseño mecánico (X). Iteración de cálculos

Cuando se calculó el peso de los elementos estructurales del separador, se consideró el espesor del casco como la suma de las contribuciones demandadas por el esfuerzo a presión interna y carga de viento. Posteriormente se calculó la contribución al espesor requerida para soportar la carga sísmica por lo que debe sumarse ésta última al espesor del casco y recalculó el peso de cuantos elementos sea requerido. Una vez recalculado el peso, considerados los nuevos espesores combinados de presión interna, viento y sismo, se añadirán los pesos calculados de bridas y refuerzos y se recalcularán tanto el espesor del faldón, como los esfuerzos por viento y sismo y el anillo de la base. En lugar de reiterar el procedimiento, se presentan las siguientes tablas-resumen de los valores finales de diseño mecánico previa comprobación:

<b>Resumen iteración de cálculos. Torre primera</b>						
<b>t<sub>Agot pi+w+s</sub> (in)</b>	1,008	<b>1-3/16"</b>	<b>t<sub>Rect pi+w+s</sub> (in)</b>	1,027	<b>1-3/16"</b>	
<b>t<sub>cono pi+w+s</sub> (in)</b>	1,195	<b>1-1/4"</b>	<b>t<sub>cabezales</sub> se redondean a 1-1/4"</b>			
<b>t<sub>faldón</sub> (in)</b>	1	<b>m<sub>sep, op</sub> (lb)</b>	5799362,646	<b>m<sub>agua, rec</sub> (lb)</b>	4801143,095	
<b>t<sub>c,w</sub> (in)</b>	0,232	<b>t<sub>c,w</sub> (in)</b>	0,389	<b>t<sub>c,w</sub> (in)</b>	0,310	<b>Viento</b>
<b>t<sub>c,s</sub> (in)</b>	0,018	<b>t<sub>c,s</sub> (in)</b>	0,031	<b>t<sub>c,s</sub> (in)</b>	0,025	<b>Sismo</b>
<b>S<sub>B</sub> (psi)</b>	14244,715	<b>S<sub>1</sub> (psi)</b>	1575,468	<b>S<sub>2</sub> (psi)</b>	17869,891	
<b>I<sub>2</sub> (in)</b>	4,75	<b>I<sub>3</sub> (in)</b>	3	<b>N</b>	44	
<b>D<sub>pernos</sub> (in)</b>	4,5	<b>t<sub>B</sub> (in)</b>	4,5	<b>m<sub>B</sub> (lb)</b>	11549,622	

Tabla. A4.LIII. Resumen de la iteración de cálculos para la torre primera

Se han incluido los espesores recalculados para los cuerpos cilíndricos, (el de los cabezales se redondea a un espesor una fracción comercial mayor que la de los cuerpos cilíndricos según normas), el del faldón y los pesos del recipiente y el agua de prueba. También se han recalculado los espesores por carga de viento y sismo, (para el

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

cuerpo inferior, cono reductor y cuerpo superior, respectivamente). Como puede comprobarse son similares a los determinados en la primera prueba, por lo que se da por cerrado el cálculo de espesores del recipiente. Se incluyen finalmente los datos fundamentales del anillo de la base, (dimensiones  $l_2$  y  $l_3$ , número y diámetro de pernos y espesor del anillo), incluyendo los valores de los esfuerzos  $S_1$ ,  $S_2$  y  $S_B$  conformes a los requisitos de diseño. Se presenta el mismo resumen para las torres segunda y tercera:

Resumen iteración de cálculos. Torres segunda y tercera					
$t_{\text{casco, pi+w+s}}$ (in)	0,951	1"	$t_{\text{cabezales}}$ se redondean a 1-3/16"		
$t_{\text{faldón}}$ (in)	1-3/16	$m_{\text{sep, op}}$ (lb)	4314282,852	$m_{\text{agua, rec}}$ (lb)	3181565,703
$S_B$ (psi)	14834,753	$S_1$ (psi)	1702,919	$S_2$ (psi)	16552,374
$l_2$ (in)	5	$l_3$ (in)	4	N	36
$D_{\text{pernos}}$ (in)	5	$t_B$ (in)	5	$m_B$ (lb)	10399,246
	$t_{c,w}$ (in)	0,324	$t_{c,s}$ (in)	0,024	
	Viento		Sismo		

Tabla. A4.LIV. Resumen de iteración de cálculos para las torres segunda y tercera

### A4.C1.2.11. Diseño mecánico (XI). Comprobaciones

El diseño mecánico concluye, una vez dimensionados todos los elementos estructurales, con la constatación de que todos los esfuerzos, ocasionados por las distintas cargas, no superan el máximo tolerable por el material.

Además debe comprobarse si el período fundamental de vibración encontrado supera al permitido. Lo mismo se efectuará para la deflexión del recipiente.

Se considerarán los siguientes esfuerzos:

- Presión interna,  $S_i$ .
- Viento,  $S_w$ .
- Peso en montaje,  $S_{vac}$ .
- Peso en operación,  $S_{op}$ .
- Carga sísmica,  $S_s$ .

Las ecuaciones se mostraron en el anexo segundo, (A2.69), y las consideraciones establecidas en dicho punto continúan siendo válidas. Se tiene para la primera torre:

<b>Comprobaciones</b>							
<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	76,242	<b>D<sub>e</sub> (in)</b>	261,603	<b>t<sub>e</sub> (in)</b>	2,849	<b>S<sub>pi</sub> (psi)</b>	<b>1750,299</b>
<b>M<sub>T</sub> (lb-ft)</b>	15093167,590	<b>R<sub>m</sub> (in)</b>	129,346	<b>t<sub>e</sub> (in)</b>	2,849	<b>S<sub>w</sub> (psi)</b>	<b>1209,599</b>
<b>m<sub>armado</sub> (lb)</b>	964267,242	<b>C<sub>m</sub> (in)</b>	807,682	<b>t<sub>e</sub> (in)</b>	2,849	<b>S<sub>vac</sub> (psi)</b>	<b>419,976</b>
<b>m<sub>rec,op</sub> (lb)</b>	5765410,337	<b>C<sub>m</sub> (in)</b>	807,682	<b>t<sub>e</sub> (in)</b>	2,849	<b>S<sub>op</sub> (psi)</b>	<b>2505,678</b>
<b>M<sub>T</sub> (lb-ft)</b>	1201354,100	<b>R<sub>m</sub> (in)</b>	129,346	<b>t<sub>e</sub> (in)</b>	2,849	<b>S<sub>s</sub> (psi)</b>	<b>96,279</b>

Tabla. A4.LV. Comprobación de esfuerzos para la torre primera

Y para la segunda y tercera torres:

<b>Comprobaciones</b>							
<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	75,866	<b>D<sub>e</sub> (in)</b>	202,048	<b>t<sub>e</sub> (in)</b>	2,599	<b>S<sub>pi</sub> (psi)</b>	<b>1474,567</b>
<b>M<sub>T</sub> (lb-ft)</b>	12570366,600	<b>R<sub>m</sub> (in)</b>	99,725	<b>t<sub>e</sub> (in)</b>	2,599	<b>S<sub>w</sub> (psi)</b>	<b>1857,799</b>
<b>m<sub>armado</sub> (lb)</b>	1102475,520	<b>C<sub>m</sub> (in)</b>	621,565	<b>t<sub>e</sub> (in)</b>	2,599	<b>S<sub>vac</sub> (psi)</b>	<b>682,505</b>
<b>m<sub>rec,op</sub> (lb)</b>	4284041,220	<b>C<sub>m</sub> (in)</b>	621,565	<b>t<sub>e</sub> (in)</b>	2,599	<b>S<sub>op</sub> (psi)</b>	<b>2652,106</b>
<b>M<sub>T</sub> (lb-ft)</b>	928143,419	<b>R<sub>m</sub> (in)</b>	99,725	<b>t<sub>e</sub> (in)</b>	2,599	<b>S<sub>s</sub> (psi)</b>	<b>137,172</b>

Tabla. A4.LVI. Comprobación de esfuerzos para las torres segunda y tercera

Ninguna sollicitación supera el esfuerzo máximo admisible por el material, (S = 17500 psi para acero al carbono según SA-515 grado 70). Se han añadido los valores de los momentos por viento y por carga sísmica recalculados, así como los pesos de armado y del recipiente en operación.

Se verifica seguidamente si el período de vibración supera al permisible. El primero se obtuvo como parte del cálculo de espesor por carga sísmica, (el recalculado es igual a 3,01 y 2,79 s para las torres primera y segunda y tercera respectivamente) y el permisible, T<sub>a</sub>, se calcula según la ecuación (A2.71) y las consideraciones descritas en el capítulo primero del anexo segundo. Se tiene:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Comprobaciones								
$m_{sep,op}$ (lb)	5799362,646	$H_{tot}$ (ft)	252,545	V (lb)	248424,447	$T_a$ (s)	10,825	Torre 1 <sup>a</sup>
$m_{sep,op}$ (lb)	4314282,852	$H_{tot}$ (ft)	244,018	V (lb)	193317,728	$T_a$ (s)	10,404	Torres 2 <sup>a</sup> y 3 <sup>a</sup>

Tabla. A4.LVII. Comprobación de vibración

Por comparación con el período de vibración recalculado, se comprueba que el problema de vibración excesiva no sucede en las torres diseñadas.

Por último, se verifica la deflexión del recipiente. Cuando actúa una carga de viento sobre un recipiente es de esperar una cierta deformación o deflexión,  $\Delta_m$ , (véase la Figura A2.14), tanto mayor cuanto más se eleve sobre el nivel del suelo y mayor sea la relación de longitud a diámetro. Debe comprobarse que ésta no supera 6 pulgadas cada 100 pies de altura. Es de aplicación la ecuación (A2.72) y las consideraciones que se establecieron en el capítulo primero del anexo segundo. Así, se tiene:

Comprobaciones							
$P_w$ (lb/ft <sup>2</sup> )	24,57	$D_e$ (ft)	21,800	$H_{tot}$ (ft)	252,545	R (in)	129,346
$t_{faldón}$ (in)	1	I (in <sup>4</sup> )	6798420,580	E (lb/in <sup>2</sup> )	$29,3 \cdot 10^6$	$\Delta_m$ (in)	2,363
				$\Delta_{m,perm}$ (in)	15,153		

Tabla. A4.LVIII. Comprobación de deflexión de la primera torre

Comprobaciones							
$P_w$ (lb/ft <sup>2</sup> )	24,57	$D_e$ (ft)	16,837	$H_{tot}$ (ft)	244,018	R (in)	99,725
$t_{faldón}$ (in)	1,1875	I (in <sup>4</sup> )	3699904,230	E (lb/in <sup>2</sup> )	$29,3 \cdot 10^6$	$\Delta_m$ (in)	2,922
				$\Delta_{m,perm}$ (in)	14,641		

Tabla. A4.LIX. Comprobación de deflexión de las torres segunda y tercera

La deflexión máxima permitida,  $\Delta_{m,perm}$ , se calcula multiplicando la altura total por 6 pulgadas y dividiendo por 100 pies de altura. Como se puede comprobar, la deflexión de los recipientes es despreciable. Para la primera torre se ha tomado el radio medio y diámetro

medio correspondiente al cuerpo de mayor espesor, a la sazón el cono reductor, como criterio conservador.

El dato de módulo de elasticidad, tomado de *Megyesy*, se justifica en la composición de la aleación SA-515 grado 70 que, según especificaciones comerciales contiene un 0,31% en carbono.

Este apartado cierra el diseño mecánico, puesto que los espesores encontrados para cada elemento estructural, son coherentes con el peso y el esfuerzo a que se somete. El siguiente apartado incluye el cálculo de las orejas de izado de los recipientes vacíos, así como del volumen de pintura requerido.

#### A4.C1.2.12. Cálculo de orejas de izado y pintado del casco y cabezales

Los recipientes debe construirse incluyendo al menos un par de orejas de izado: eslabones atornillados a una base, con forma de oreja, soldada al casco, tal como muestra la Figura A2.15.

Para el cálculo del espesor de la oreja, *Megyesy* sugiere la ecuación (A2.74). Las consideraciones efectuadas en el anexo segundo continúan siendo válidas. Se tiene, para la primera torre:

Cálculo de las orejas de izado					
<b>S (psi)</b>	17500	<b>W (lb)</b>	90747,232	<b>D (in)</b>	3,25
<b>D<sub>1</sub> (in)</b>	3,375	<b>B (in)</b>	5,875	<b>E (in)</b>	9,74
		<b>t (in)</b>	<b>0,620</b>		

Tabla. A4.LX. Dimensiones de las orejas de izado de la torre primera

Cálculo de las orejas de izado					
<b>S (psi)</b>	17500	<b>W (lb)</b>	94393,096	<b>D (in)</b>	3,25
<b>D<sub>1</sub> (in)</b>	3,375	<b>B (in)</b>	5,875	<b>E (in)</b>	9,74
		<b>t (in)</b>	<b>0,644</b>		

Tabla. A4.LXI. Dimensiones de las orejas de izado de las torres segunda y tercera

Se han tabulado, en las tablas A4.LX y A4.LXI, las dimensiones D, el diámetro del perno,  $D_1$  el diámetro del agujero de la oreja, B, el tamaño del borde cortado a cizalla y el brazo del momento E, para una carga máxima de 97000 lb. La tabla de dimensiones mínimas de las orejas se proporcionó parcialmente en el anexo segundo. En el actual capítulo figura completa en las últimas páginas.

En ambos casos, puesto que el separador es muy pesado deberá dividirse en varias partes susceptibles de ser elevadas por las orejas instaladas. Para la primera torre se preverá la división en 11 partes iguales mientras que la segunda y tercera se dividirán en 12, con vistas a su construcción.

El espesor de las orejas se redondea: en el caso de la torre primera, a 5/8 in y para la segunda y tercera torres, a 11/16 in. La soldadura se practica directamente al casco, (que también debe incluir clips de sujeción para el aislamiento y la chapa envolvente). Para la dimensión de la soldadura se considera la tabla mostrada por la Figura A2.17.

Puesto que el espesor de la placa más gruesa, (a la sazón los cascos de las torres primera y segunda y tercera, cuyos espesores respectivos corresponden a 1-3/16 de pulgada y 1 pulgada frente a la oreja de 11/16 de pulgada), el tamaño de la soldadura de filete, o angular, será de 3/8 de pulgada. Esta dimensión corresponde al cateto del triángulo rectángulo isósceles mayor que puede inscribirse en el cordón.

Según normas, la longitud de la unión debe estar comprendida entre 15 y 60 veces el tamaño de la garganta, (la hipotenusa correspondiente al triángulo anterior). Así, se tiene:

$$l_{sold}(\text{in}) = 30 \cdot a(\text{in}) = 30 \cdot \sqrt{(3/8)^2 + (3/8)^2} \cong 16 \text{ in}$$

Donde a es la dimensión de la garganta, calculada a partir del teorema de *Pitágoras*. La longitud de la oreja será de 16 pulgadas.

En lo tocante a la pintura, es éste un elemento importante de protección frente a la corrosión bajo aislamiento, como queda explicado en el capítulo primero del segundo anexo.

Debe calcularse tanto la superficie del casco como la de los cabezales y el cono reductor. Son de utilidad las expresiones (A2.75) para los distintos cuerpos cilíndricos y cabezales, y la ecuación (A4.1.2) para la obtención de la superficie del cono truncado. Se obtiene, para la torre primera:

<b>Pintura</b>			
<b>Sección de agotamiento</b>		<b>Sección de rectificación</b>	
$D_{e,Agot}$ (in)	261,478	$D_{e,Rect}$ (in)	202,423
$H_{Agot}$ (in)	2002,268	$H_{Rect}$ (in)	977,134
$S_{Agot}$ (in <sup>2</sup> )	1644778,501	$S_{Rect}$ (in <sup>2</sup> )	621389,427
$e_{capa}$ (in)	0,001	$e_{capa}$ (in)	0,001
$V_{pint,Agot}$ (in <sup>3</sup> )	1644,779	$V_{pint,Rect}$ (in <sup>3</sup> )	621,389
$V_{pint,Agot}$ (gal(US))	<b>7,120</b>	$V_{pint,Rect}$ (gal(US))	<b>2,690</b>
<b>Cabezal inferior</b>		<b>Cabezal superior</b>	
$D_{e,cab inf}$ (in)	258,406	$D_{e,cab sup}$ (in)	199,350
$t_{cab inf}$ (in)	1,250	$t_{cab sup}$ (in)	1,250
$S_{cab inf}$ (in <sup>2</sup> )	53458,468	$S_{cab sup}$ (in <sup>2</sup> )	31995,025
$e_{capa}$ (in)	0,001	$e_{capa}$ (in)	0,001
$V_{pint,cab inf}$ (in <sup>3</sup> )	53,458	$V_{pint,cab sup}$ (in <sup>3</sup> )	31,995
$V_{pint,cab inf}$ (gal(US))	<b>0,231</b>	$V_{pint,cab sup}$ (gal(US))	<b>0,139</b>
<b>Cono reductor</b>			
$D_{e,cono}$ (in)	261,603		
$d_{e,cono}$ (in)	202,548		
$H_{cono}$ (in)	51,143		
$S_{cono}$ (in <sup>2</sup> )	43056,317		
$e_{capa}$ (in)	0,001		
$V_{pint,cono}$ (in <sup>3</sup> )	43,056		
$V_{pint,cono}$ (gal(US))	<b>0,186</b>		
$V_{pint,tot}$ (gal(US))	<b>21,770</b>		

Tabla. A4.LXII. Cálculo de volumen de pintura para la primera torre

Y para las torres segunda y tercera:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Pintura			
$D_{e,c}$ (in)	202,048	$D_{e,cab}$ (in)	199,225
$H_{tot}$ (in)	2928,220	$t_{cab,pi}$ (in)	1,1875
$S_{casco}$ (in <sup>2</sup> )	1858695,592	$S_{cab}$ (in <sup>2</sup> )	31916,286
$e_{capa}$ (in)	0,001	$e_{capa}$ (in)	0,001
$V_{pint,casco}$ (in <sup>3</sup> )	1858,696	$V_{pint,cabezales}$ (in <sup>3</sup> )	63,832
$V_{pint,casco}$ (gal(US))	8,046	$V_{pint,cabezales}$ (gal(US))	0,276
	$V_{pint,tot}$ (gal(US))		69,910

Tabla. A4.LXIII. Cálculo de volumen de pintura para las torres segunda y tercera

Las dimensiones tomadas son las más actualizadas, correspondientes a la última iteración de los cálculos.

Se ha seleccionado un sistema de pinturas siguiendo especificaciones del *Steel Structures Painting Council*, (SSPC). Dicho sistema viene recomendado para ambientes secos, no corrosivos en interior de edificios o protegidos temporalmente contra intemperie. No se han considerado condiciones excesivamente severas, ya que la mayor parte del tiempo la estructura estará guarnecida por el aislamiento y chapa envolvente.

La identificación del sistema viene dada por SSPC-PS 7.01.No obliga al tratamiento previo, (sólo una limpieza de contaminantes superficiales del casco: grasa, tierra, entre otros componentes), y requiere un espesor de pintura seca de una milésima de pulgada, ( $e_{capa}$  en las tabla A4.LXII y A4.LXIII).

El volumen de pintura de cada componente, (casco, cabezales y cono) se ha calculado multiplicando la superficie por el espesor de la capa de pintura. En el caso de los cabezales, debe multiplicarse por dos el anterior volumen, (a fin de obtener el volumen requerido por los dos cabezales). El volumen final es la suma de los volúmenes del casco y los dos cabezales, (también cono reductor para el caso de la torre primera), convertido a galones estadounidenses, la unidad de referencia de los sistemas SSPC, según (A2.76).

El sistema SSPC-PS 7.01 indica aplicar una mano de pintura de taller roja o café, cuyo contenido en sólidos es del 60%. Se exige una capa de pintura de espesor seco de una milésima de pulgada: cuando la pintura se seca, el espesor aplicado merma por la pérdida de volátiles, luego será necesario aumentar la cantidad de pintura aplicada el tanto por ciento correspondiente a los componentes volátiles: 40% para un contenido en sólidos del 60% como se muestra más arriba. El incremento del 40% se aplica multiplicando la suma de los volúmenes de casco y cabezales por 1,4.

Debe incrementarse un 50% la cantidad de pintura requerida en concepto de pérdidas por aplicación, (se trata del factor 1,5 de la última ecuación). Finalmente, el volumen de pintura se multiplica por la unidad, para la primera torre, y por dos para encontrar el volumen correspondiente a las dos torres segunda y tercera, lo que debe modificarse de la ecuación (A2.76).

Por razones de brevedad se omite el resumen de las dimensiones y magnitudes más significativas, análogo al que se practicó en el capítulo primero del anexo segundo, y se remite a la información vertida en este capítulo y la memoria descriptiva sobre los datos mecánicos de “EXTRACTIVA 1”.

Se presentan seguidamente las tablas requeridas en algunos apartados, desde los que han sido previamente referenciadas.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

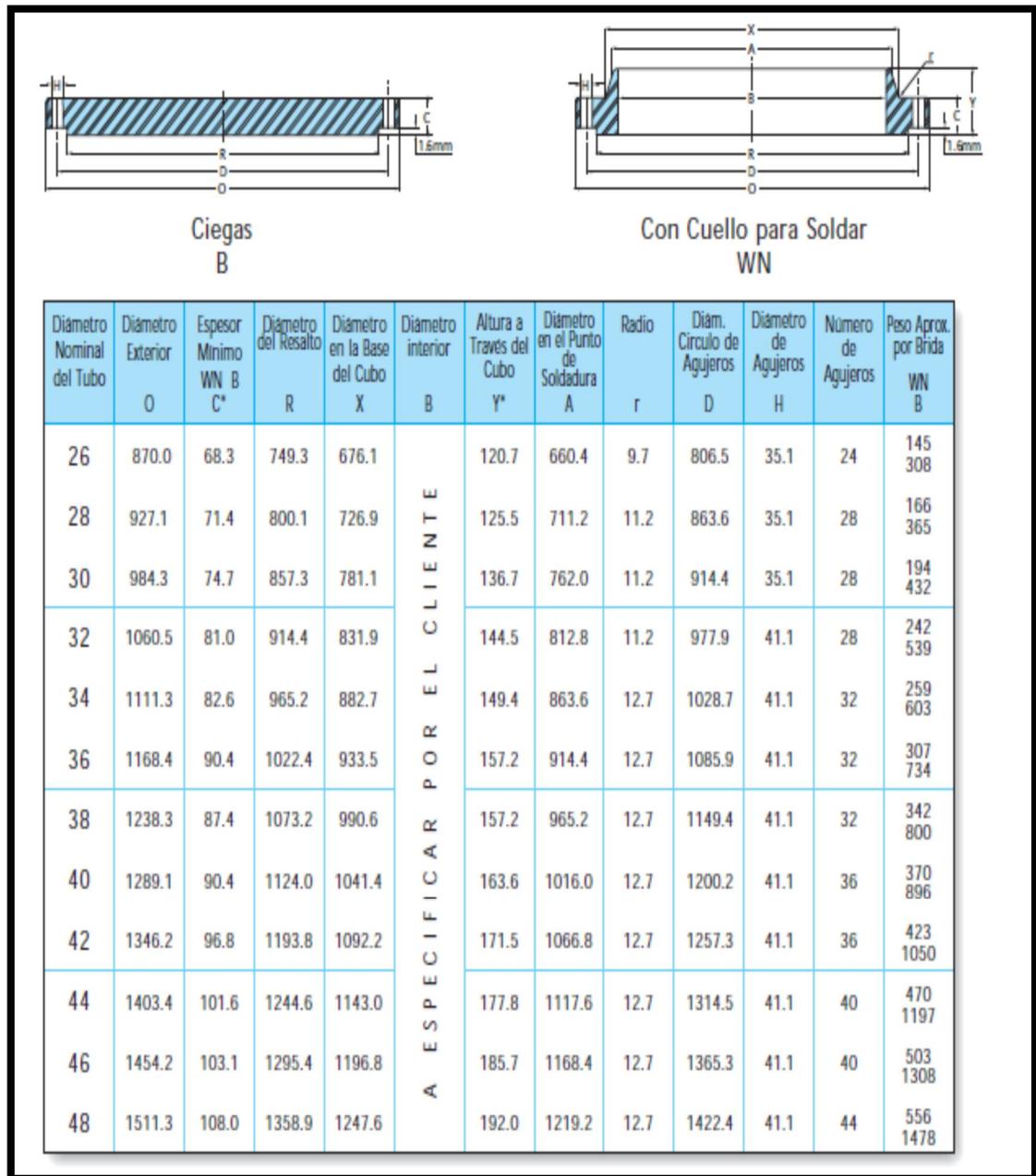


Figura. A4.3. Dimensiones de bridas grandes. (Catálogo empresa FRANCOVIGH, 2007)

DIMENSIONES MINIMAS DE LAS OREJAS PARA LEVANTAR UTILIZANDO GRILLETES							
Carga, lb	Diám. del perno del grillete, D	Diám. del agujero de la oreja, D <sub>1</sub>	H	A	Borde cortado a cizalla	Corte a gas rolado	Brazo del momento, E
					B		
710	5/16	3/8	.50	.65			.84
1060	3/8	7/16	.56	.73			.97
1600	7/16	1/2	.63	.82	7/8	3/4	1.16
2170	1/2	5/8	.69	.90	1-1/8	7/8	1.44
2820	5/8	3/4	.94	1.22	1-1/4	1	1.75
4420	3/4	7/8	1.13	1.47	1-1/2	1-1/8	2.12
6375	7/8	1	1.19	1.55	1-3/4	1-1/4	2.25
8650	1	1-1/8	1.31	1.70	2	1-1/2	2.59
11300	1-1/8	1-1/4	1.50	1.95	2-1/4	1-5/8	2.94
13400	1-1/4	1-3/8	1.63	2.12	2-7/16	1-3/4	3.06
16500	1-3/8	1-1/2	1.75	2.28	2-5/8	1-7/8	3.62
20000	1-1/2	1-5/8	1.88	2.45	2-7/8	2	4.06
23750	1-5/8	1-3/4			3-1/16	2-3/16	4.19
32350	2	2-1/8	2.25	2.93	3-3/4	2-5/8	4.75
42500	2-1/4	2-3/8	2.56	3.33	4-1/8	3	5.25
54000	2-1/2	2-5/8	2.81	3.66	4-9/16	3-1/4	6.00
67600	2 3/4	2-7/8	2.94	3.82	5	3-9/16	7.00
81000	3	3-1/8			5-7/16	3-7/8	8.61
97000	3-1/4	3-3/8			5-7/8	4-1/4	9.74

Todas las dimensiones expresadas en pulgadas.

Figura. A4.4. Dimensiones mínimas de las orejas. (E. F. Megyesy, 1992)



---

## **Capítulo A4.C2. Diseño mecánico de unidades principales**

### **A4.C2.1. Introducción**

En el capítulo previo se trató el diseño mecánico de la unidad “EXTRACTIVA 1”. Se ahorró parcialmente al lector la reiteración del tedioso procedimiento de cálculo, si bien, se incidió en las particularidades que diferenciaban el diseño de ésta última del acometido en el capítulo primero del anexo segundo.

En adelante, el tratamiento de las torres correspondientes a las operaciones “EXTRACTIVA 2”, “MÚLTIPLE” y “BINARIA”, se efectuará atendiendo a las consideraciones participadas en la presente introducción.

Se dedicará una sección del capítulo en curso al diseño mecánico de cada una de las unidades, de tal suerte que cada una contará con los siguientes apartados:

- Diseño mecánico (I). Determinación de la presión de diseño.
- Diseño mecánico (II). Determinación de espesores para el casco y los cabezales sometidos a presión interna.
- Diseño mecánico (III). Determinación del espesor del aislamiento y de la chapa envolvente.
- Diseño mecánico (IV). Determinación del espesor final requerido para soportar la carga por viento.
- Diseño mecánico (V). Determinación del espesor final requerido para soportar la carga sísmica.
- Diseño mecánico (VI). Determinación del peso final del aparato en operación.
- Diseño mecánico (VII). Diseño final del anillo de la base.
- Diseño mecánico (VIII). Cálculo de las tubuladuras y refuerzos.
- Diseño mecánico (IX). Comprobaciones.
- Cálculo de orejas de izado y pintado del casco y cabezales.

Lo que a expensas del presupuesto cerrará el cálculo para todas las unidades principales de proceso.

La unidad “EXTRACTIVA 2” es una operación de destilación en columna de platos, que, como se ha mostrado en el anexo previo, requiere la instalación de dos trenes gemelos de dos torres cada uno, cuatro en total.

La unidad “MÚLTIPLE”, como la anterior, requiere la instalación de dos trenes gemelos de dos torres cada uno que son idénticas, (salvando detalles mínimos como la presencia de la brida de alimentación en sólo una de los recipientes).

Finalmente, la unidad “BINARIA”, requiere la instalación de tres trenes de tres torres cada uno.

Lo anterior lleva al diseño de 17 torres de destilación, problema que se abordará diseñando, de cada operación, únicamente la torre sometida a condiciones más severas o de mayores dimensiones, de modo que el diseño resistente de una torre en condiciones más desfavorables será válido para el resto.

#### **A4.C2.2. Diseño mecánico de “EXTRACTIVA 2”**

Esta segunda sección se dividirá en varios apartados imbricados en el diseño mecánico de la misma. No se incluirán aspectos como el diseño de la red de tuberías, si bien, se indicarán los diámetros nominales requeridos en las bridas de entrada y salida a la unidad de “EXTRACTIVA 2”. Se remite al lector a la Figura A2.32 del segundo anexo, donde se muestra un esquema de la unidad.

La siguiente tabla resume la información general acerca de las torres que componen “EXTRACTIVA 2”, de forma análoga a como la Tabla A4.I describía las torres de “EXTRACTIVA 1”:

Torre primera		Torre segunda	
Agotamiento		Rectificación	
NPR	45	NPR	56
T (ft)	22,966	T (ft)	22,966
t (ft)	2,953	t (ft)	2,953
H <sub>L</sub> (ft)	12	H <sub>L</sub> (ft)	12
Rectificación		H <sub>P-S</sub> (ft)	4
NPR	10		
T (ft)	22,966		
t (ft)	2,953		
H <sub>P-S</sub> (ft)	4		

Tabla. A4.LXIV. Cuerpos cilíndricos de las torres de “EXTRACTIVA 2”

En este caso no se prevé reducción por diámetro, ergo ambas torres estarán compuestas por un único casco cilíndrico, cerrado por dos cabezales iguales. Se decide diseñar la torre segunda, por ser ésta más alta, (las medidas entre platos primero y último y cabezales se respetan respecto del capítulo anterior, si bien, la segunda torre se construye con un plato más).

#### A4.C2.2.1. Diseño mecánico (I). Determinación de la presión de diseño

Se evitará repetir procedimientos ya mostrados con anterioridad, por lo que se presenta directamente la tabla conteniendo la información concerniente al apartado en cuestión, y se emplaza al lector a la revisión del capítulo primero del presente anexo, donde se proporcionan las expresiones y datos precisos para el cálculo.

Cálculo para P <sub>agua</sub>		Cálculo para P <sub>diseño</sub>	
H (ft)	181,354	P <sub>operación</sub> (atm)	2
T (ft)	22,966	10% P (atm)	0,2
V (m <sup>3</sup> )	2127,300	30 psi (atm)	2,041
S (m <sup>2</sup> )	1215,600	P <sub>diseño</sub> (psi)	61,881
m <sub>agua</sub> (kg)	2127300,563		
P <sub>agua</sub> (N)	20861692,060		
P <sub>agua</sub> (atm)	0,169		

Tabla. A4.LXV. Cálculo de la presión de diseño

A4.C2.2.2. Diseño mecánico (II). Determinación de espesores para el casco y los cabezales

Se obtiene para el casco:

Espesor por presión interna	
<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	61,881
<b>S (psi)</b>	17500
<b>E</b>	0,85
<b>R (in) (interior)</b>	137,795
<b>D (in) (interior)</b>	275,590
<b>C.A. (in) (20 años)</b>	0,1
<b>t (in)</b>	<b>0,575</b>
<b>t<sub>c,pi</sub> (in) (20 años)</b>	<b>0,675</b>
<b>P<sub>adm</sub> (psi)</b>	<b>73,994</b>
<b>t<sub>c,circ</sub> (in) (20 años)</b>	<b>0,386</b>

Tabla. A4.LXVI. Cálculo del espesor de casco sometido a presión interna

El material seleccionado para el separador es acero al carbono según especificación SA-515 grado 70, por los motivos expuestos en el capítulo anterior. Nuevamente se observa que el régimen longitudinal de esfuerzos predomina sobre el circunferencial y la presión admisible supera la de diseño. Lo que proporciona un espesor comercial:

$$t_{c,pi} = 11/16 \text{ de pulgada (17,46 mm)}$$

Este será el espesor de casco sometido a presión interna, que se empleará en cálculos posteriores.

Los cabezales en este caso son del tipo “Klopper” tal como se recomendó, en el primer capítulo del presente anexo, para una presión de operación inferior a 6,8 atm, por lo que se está a las ecuaciones dadas en el primer capítulo del anexo segundo. Así, se obtiene:

<b>Espesor por presión interna</b>	
<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	61,881
<b>D (in) (interior)</b>	275,590
<b>S (psi)</b>	17500
<b>E</b>	1
<b>M</b>	1,54
<b>C.A. (in) (20 años)</b>	0,1
<b>t (in)</b>	<b>0,751</b>
<b>t<sub>cab,pi</sub> (in) (20 años)</b>	<b>0,851</b>
<b>P<sub>adm</sub> (psi)</b>	<b>72,129</b>

Tabla. A4.LXVII. Cálculo del espesor de cabezales sometidos a presión interna

La presión admisible supera la de diseño, por lo que el cálculo es conforme. Así, se toma para cada cabezal el siguiente espesor comercial:

$$t_{cab,pi} = 7/8 \text{ de pulgada (22,22 mm)}$$

Según normas de diseño mecánico, el espesor de los cabezales debe ser superior al del casco, a fin de asegurar un cierre adecuado, lo que se verifica a tenor de lo mostrado.

#### A4.C2.2.3. Diseño mecánico (III). Determinación del espesor del aislamiento y de la chapa envolvente

Para el caso de temperatura de operación superior a la ambiental, se ha estimado un espesor requerido de 25 mm, frente a 30 mm para temperatura de operación inferior a la ambiente. Por tanto, se toma 30 mm (1,181 in) como espesor requerido de aislamiento.

$$t_{ais} = 30 \text{ mm}$$

El espesor de la envolvente se mantiene respecto del capítulo de diseño mecánico de "SIMPLE". En definitiva, se tiene como espesor de la envolvente de aluminio:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

$$t_{env} = 0,61 \text{ mm}$$

Según normas ASTM B 209, incluirá recubrimiento corrosivo a base de papel *kraft* con película de polietileno para protección contra intemperie.

### A4.C2.2.4. Diseño mecánico (IV). Determinación del espesor final requerido para soportar la carga por viento

En este apartado se presenta una tabla conteniendo los datos relativos a la determinación del espesor por viento, que debe sumarse a la carga por presión interna y sismo. Como se ha mostrado en capítulos previos de diseño mecánico, el procedimiento de cálculo de este requerimiento depende del diámetro externo del recipiente que, al incrementar por la suma de las distintas contribuciones al espesor total del aparato, requiere su evaluación en varios ciclos de cálculo.

Carga por viento (Recalculada)					
Velocidad básica del viento (m/s)		29	(mi/h)		70
$q_s$ (lb/ft <sup>2</sup> )	13	$C_e$	1,9	$C_q$	0,9
$P_w$ (lb/ft <sup>2</sup> )	22,23	$D_e$ (ft)	23,312	$E$	0,85
$h_T$ (ft)	6,562	$H_{tot}$ (ft)	187,916	$h_1$ (ft)	93,958
$H_{esc}$ (ft lin.)	185,916	$H_{plat}$ (ft lin.)	8	Nº plataformas	7
$V$ (lb)	97385,280	$M$ (lb-ft)	9150126,663	Recipiente	
$V$ (lb)	4132,913	$M$ (lb-ft)	384187,340	Escalera	
$V$ (lb)	177,840	$M$ (lb-ft)	3556,800	$h_{plat,1}$ (ft)	20,000
$V$ (lb)	177,840	$M$ (lb-ft)	8892,000	$h_{plat,2}$ (ft)	50,000
$V$ (lb)	177,840	$M$ (lb-ft)	14227,200	$h_{plat,3}$ (ft)	80,000
$V$ (lb)	177,840	$M$ (lb-ft)	19562,400	$h_{plat,4}$ (ft)	110,000
$V$ (lb)	177,840	$M$ (lb-ft)	24897,600	$h_{plat,5}$ (ft)	140,000
$V$ (lb)	177,840	$M$ (lb-ft)	27031,680	$h_{plat,6}$ (ft)	152,000
$V$ (lb)	177,840	$M$ (lb-ft)	33063,303	$h_{plat,7}$ (ft)	185,916
$V$ (lb)	102763,073	$M$ (lb-ft)	9665544,987	Total	
$M_T$ (lb-ft)	9002403,149	$R_m$ (in)	138,835	$S$ (psi)	17500
		$t$ (in)	0,120		

Tabla. A4.LXVIII. Cálculo del espesor final requerido para la carga por viento

En este caso se presenta directamente la contribución final convergida. En la Tabla A4.LXVIII aparecen también datos de interés como el número de plataformas instaladas, (estando la primera, sexta y séptima a la altura de las bocas de hombre), o la presión del viento calculada para un recipiente comprendido entre 150 y 200 ft de altura, (véase Tabla A2.XXXVII).

#### A4.C2.2.5. Diseño mecánico (V). Determinación del espesor final requerido para soportar la carga sísmica

De nuevo se presenta la solución convergida para el espesor resistente a carga sísmica.

<b>Carga sísmica (Recalculada)</b>					
<b>Z</b>	0,375	<b>I</b>	1	<b>K</b>	2
<b>H<sub>tot</sub> (ft)</b>	187,916	<b>D<sub>e</sub> (ft)</b>	23,313	<b>t<sub>faldón</sub> (13/16 in)</b>	0,8125
<b>w (lb/ft)</b>	29514,817	<b>T (s)</b>	1,585	<b>C (obtenido)</b>	0,053
<b>C (tomado)</b>	0,053	<b>S</b>	1,5	<b>W (lb)</b>	5546306,719
<b>V (lb)</b>	330458,401	<b>0,25V (lb)</b>	82614,600	<b>F<sub>t</sub> (lb)</b>	36653,170
<b>M (lb·ft)</b>	43694855,358	<b>M<sub>T</sub> (lb·ft)</b>	1525743,595	<b>R<sub>m</sub> (in)</b>	138,835
<b>S (psi)</b>	17500	<b>E</b>	0,85	<b>t<sub>c,s</sub> (in)</b>	<b>0,020</b>

Tabla. A4.LXIX. Cálculo del espesor final requerido para la carga por sismo

Donde se ha introducido el espesor final del faldón, a la sazón:

$$t_{\text{faldón}} = 13/16 \text{ de pulgada (20,64 mm)}$$

#### A4.C2.2.6. Diseño mecánico (VI). Determinación del peso final del aparato en operación

Se excusa referir el procedimiento íntegro de cálculo y se emplaza al lector a la revisión del capítulo primero del segundo anexo, de donde son aplicables todas las ecuaciones referidas.

Sea la siguiente tabla-resumen:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Peso del separador (Recalculado)					
$m_{\text{casco}}$ (lb)	468598,278	$m_{\text{cabezales}}$ (lb)	25400,764	$m_{\text{envolvente}}$ (lb)	4501,065
$m_{\text{aislamiento}}$ (lb)	5281,464	$m_{\text{platos}}$ (lb)	167678,706	$m_{\text{armado}}$ (lb)	684892,162
$m_{\text{agua,rec}}$ (lb)	4830868,756	$m_{\text{rec, op}}$ (lb)	5515760,918	$m_{\text{faldón}}$ (lb)	15884,378
		$m_{\text{sep, op}}$ (lb)	5546306,719		

Tabla. A4.LXX. Estimación del peso final del aparato en operación

El peso de armado es la suma de los que le preceden, mientras que el peso  $m_{\text{rec, op}}$  incluye el peso de armado y líquido. Finalmente,  $m_{\text{sep, op}}$  suma al anterior el peso del faldón, así como de las tubuladuras y refuerzos que corresponden a la torre primera, (que incluye una brida más por ser el recipiente que recibe la alimentación), y el anillo de la base. Los espesores finales de los cuerpos del recipiente son los que siguen:

$$t_{c,pi+w+s} = 7/8 \text{ de pulgada (22,22 mm)}$$

$$t_{cab,pi} = 15/16 \text{ de pulgada (23,81 mm)}$$

Estos espesores son el resultado de sumar las contribuciones de presión interna, viento y sismo en el caso del casco, y de aumentar en una fracción comercial el espesor atendiendo a normas, para el caso de los cabezales.

### A4.C2.2.7. Diseño mecánico (VII). Diseño final del anillo de la base

Se presenta seguidamente la tabla-resumen de la solución convergida para el cálculo del anillo de la base.

Diseño del anillo de la base (Recalculado)					
$S_B$ (psi)	13646,267	$S_1$ (psi)	1440,121	$S_2$ (psi)	14251,219
$l_2$ (in)	4,5	$l_3$ (in)	3,75	N	48
$D_{\text{pernos}}$ (in)	4,5	$t_B$ (in)	4,5	$m_B$ (lb)	11534,870

Tabla. A4.LXXI. Dimensiones y comprobaciones finales del anillo de la base

El material de construcción del anillo de la base será acero al carbono según SA-285 grado C ya que pese a ser el esfuerzo máximo permitido por el material de 13800 psi a la temperatura de operación, (véase apartados anteriores), *Megyesy* señala un valor de 18000 psi como esfuerzo máximo permisible para el anillo de la base. Así, los esfuerzos  $S_1$  y  $S_2$  cumplen con el requerimiento mecánico, por lo que la solución encontrada es conforme. El esfuerzo  $S_B$  máximo permisible para los pernos (según SA-325) es de 15000 psi.

#### A4.C2.2.8. Diseño mecánico (VIII). Cálculo de las tubuladuras y esfuerzos

La estimación del peso de las bridas asociadas al recipiente requiere el dimensionado de las tuberías de la alimentación, de descarga del líquido y del vapor y de carga de vapor y de líquido. El método de cálculo se explicó convenientemente en el capítulo primero del presente anexo, por lo que se omite su repetición.

Conocidas las velocidades óptimas y los caudales volumétricos, puede encontrarse el radio interno para las conducciones. Debe recordarse que el diseño de la columna segunda, por ser la más alta, está procurando, hasta este punto, las características esenciales de los recipientes que constituyen “EXTRACTIVA 2”. Como se anticipó previamente, para el caso de las tubuladuras se considerará la torre primera en lugar de la segunda, pues esta dispone una brida adicional, correspondiente a la conducción de alimentación.

Sin perjuicio de lo antedicho, se requieren las siguientes tuberías para ambas columnas:

- Conducción general de alimentación a temperatura de operación: Transporta el residuo de “EXTRACTIVA 1”, de carga a “EXTRACTIVA 2”, a su temperatura de operación y una presión de 4 atm para compensar las pérdidas de carga a su trasiego por columna. Procede del cambiador E-24 que disminuye la temperatura a la que procede de la operación an-

terior, por requerimientos de diseño. Se divide en dos ramales que alimentan sendos trenes de “EXTRACTIVA 2”.

- Ramales de alimentación a “EXTRACTIVA 2”: Trasiegan la mitad del caudal de la conducción general de alimentación. Las condiciones de presión y temperatura no difieren.
- Conducción de descarga de fondo de primera columna: La presión es la de operación: 2 atm.
- Conducción de carga de vapor recirculado a primera columna: Procede del rehervidor. A presión de operación: 2 atm.
- Conducción de descarga de vapor de primera columna: Es la misma conducción de carga a segunda columna. A presión de operación: 2 atm.
- Conducción de recirculación de líquido de segunda a primera columna: Es la misma conducción de descarga de fondo de la segunda columna. A 2,5 atm para compensar pérdidas.
- Conducción de descarga de vapor de segunda columna: A presión de operación: 2 atm.
- Conducción de recirculación de líquido a segunda columna: Procede del acumulador de reflujo. A 3 atm para compensar pérdidas.

Las pérdidas de carga del líquido por plato se estiman multiplicando el nivel de líquido en plato, (véanse apartados de pérdidas de carga en el anexo previo) por la aceleración de la gravedad, y la mayor densidad de la columna como criterio conservador. Multiplicando por el número de platos se obtiene la pérdida de carga en unidades de presión, tal como se indicó en el capítulo anterior. Otro tanto puede realizarse con las corrientes de vapor, si bien la caída de presión es despreciable, (apenas unos milímetros de mercurio).

A continuación se presenta el cálculo de la presión de diseño de cada tubería, y se tabulan los resultados que permitirán establecer las especificaciones del sistema de tuberías asociado a “EXTRACTIVA 2”.

**Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas**

Documento 1. Anexos a la memoria

<b>Cálculo de las conducciones: P-144</b>					
<b>P (psi)</b>	58,784	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	88,784	<b>S (psi)</b>	15000
<b>W (Mmol/año)</b>	11507,675	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	0,012	<b>W (ft<sup>3</sup>/s)</b>	1,097
<b>A<sub>i,tubo</sub> (ft<sup>2</sup>)</b>	0,110	<b>R<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	2,246	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,115	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	745,061	<b>D<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	<b>4,493</b>

Tabla. A4.LXXII. Estimación del tamaño de la conducción general de alimentación a temperatura de operación

<b>Cálculo de las conducciones: P-42 y P-43</b>					
<b>P (psi)</b>	58,784	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	88,784	<b>S (psi)</b>	15000
<b>W/2 (Mmol/año)</b>	5753,837	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	0,012	<b>W/2 (ft<sup>3</sup>/s)</b>	0,548
<b>A<sub>i,tubo</sub> (ft<sup>2</sup>)</b>	0,055	<b>R<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	1,589	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,11	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	1002,631	<b>D<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	<b>3,177</b>

Tabla. A4.LXXIII. Estimación del tamaño de los ramales de alimentación a “EXTRACTIVA 2”

<b>Cálculo de las conducciones: P-44 y P-54</b>					
<b>P (psi)</b>	29,392	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	59,392	<b>S (psi)</b>	15000
<b>L' (Mmol/año)</b>	25278,803	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	0,012	<b>L' (ft<sup>3</sup>/s)</b>	2,365
<b>A<sub>i,tubo</sub> (ft<sup>2</sup>)</b>	0,219	<b>R<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	3,168	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,114	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	529,040	<b>D<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	<b>6,336</b>

Tabla. A4.LXXIV. Estimación del tamaño de la conducción de descarga de fondo de primera columna

<b>Cálculo de las conducciones: P-45 y P-55</b>					
<b>P (psi)</b>	29,392	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	59,392	<b>S (psi)</b>	15000
<b>V' (Mmol/año)</b>	22713,390	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	4,466·10 <sup>-5</sup>	<b>V' (ft<sup>3</sup>/s)</b>	569,491
<b>A<sub>i,tubo</sub> (ft<sup>2</sup>)</b>	6,780	<b>R<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	17,628	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,179	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	151,146	<b>D<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	<b>35,257</b>

Tabla. A4.LXXV. Estimación del tamaño de la conducción de carga de vapor recirculado a primera columna

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Cálculo de las conducciones: P-47 y P-57					
<b>P (psi)</b>	29,392	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	59,392	<b>S (psi)</b>	15000
<b>V (Mmol/año)</b>	22713,390	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	$4,789 \cdot 10^{-5}$	<b>V (ft<sup>3</sup>/s)</b>	531,161
<b>A<sub>i,tubo</sub> (ft<sup>2</sup>)</b>	6,810	<b>R<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	17,667	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,179	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	150,960	<b>D<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	<b>35,335</b>

Tabla. A4.LXXVI. Estimación del tamaño de la conducción de descarga de vapor de primera columna

Cálculo de las conducciones: P-46 y P-56					
<b>P (psi)</b>	36,740	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	66,740	<b>S (psi)</b>	15000
<b>L (Mmol/año)</b>	19524,966	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	0,012	<b>L (ft<sup>3</sup>/s)</b>	1,861
<b>A<sub>i,tubo</sub> (ft<sup>2</sup>)</b>	0,187	<b>R<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	2,926	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,115	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	574,386	<b>D<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	<b>5,852</b>

Tabla. A4.LXXVII. Estimación del tamaño de la conducción de recirculación de líquido de segunda a primera columna

Cálculo de las conducciones: P-48 y P-58					
<b>P (psi)</b>	29,392	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	59,392	<b>S (psi)</b>	15000
<b>V (Mmol/año)</b>	22713,390	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	$6,139 \cdot 10^{-5}$	<b>V (ft<sup>3</sup>/s)</b>	414,392
<b>A<sub>i,tubo</sub> (ft<sup>2</sup>)</b>	6,793	<b>R<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	17,646	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,179	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	151,062	<b>D<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	<b>35,292</b>

Tabla. A4.LXXVIII. Estimación del tamaño de la conducción de descarga de vapor de segunda columna

Cálculo de las conducciones: P-51 y P-61					
<b>P (psi)</b>	44,088	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	74,088	<b>S (psi)</b>	15000
<b>L (Mmol/año)</b>	19524,966	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	0,011	<b>L (ft<sup>3</sup>/s)</b>	1,905
<b>A<sub>i,tubo</sub> (ft<sup>2</sup>)</b>	0,165	<b>R<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	2,750	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,115	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	613,578	<b>D<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	<b>5,500</b>

Tabla. A4.LXXIX. Estimación del tamaño de la conducción de recirculación de líquido a segunda columna

En el título de cada tabla de conducciones se indica la denominación correspondiente, tal como figura en el plano que muestra el diagrama de flujo del proceso. Las conducciones se dan por duplicado, puesto que se tienen dos trenes idénticos de separación.

Con las conducciones conocidas, resta sumar el peso de las bridas correspondientes. Para el diseño en cuestión, se supondrá que cada recipiente contará con una brida de alimentación de diámetro nominal de 3 in, una brida de descarga de líquido de 6 in y otra de descarga de vapor de 36 in. A lo que deben añadirse la brida de carga de vapor, de 36 in y la de recirculación de líquido, de 6 in.

Todas las bridas se construirán en acero forjado según especificación SA-105; se clasifican por su clase de presión o, en inglés, “*rating*”, expresadas en psi. La clase inferior de bridas, para servicios a baja presión como los requeridos para el presente diseño es de 150 psi ó 150#, como se nota técnicamente.

Para la clase de presión seleccionada, *Megyesy* proporciona una tabla de pesos de bridas, según diámetro nominal de las conducciones embridadas y tipo de brida. De dicha tabla se toman los pesos mostrados en la Tabla A4.LXXX, para bridas de la clase 150# de tipo cuello soldable, según los distintos diámetros nominales de tubo asociado. La mencionada tabla de pesos, tomada de *Megyesy* se presentó al final del capítulo primero del segundo anexo; en el anterior, a su término, se incluyen las tablas para bridas de grandes dimensiones, como corresponde a las calculadas de más de 30 pulgadas.

Las bridas de cuello soldable son las más extensamente utilizadas en la industria petroquímica, para líneas de proceso. Esta aplicación se denomina de responsabilidad. Por ello, se seleccionan, para las tubuladuras de entrada y salida de corrientes, este tipo de bridas.

Las bridas se sueldan a un tubo de longitud determinada por normas, (según las dimensiones de las mismas) y, por forzar la pérdida de material al insertarse en el casco o cabezales del recipiente, pueden requerir refuerzo: aquéllas conducciones de 3 pulgadas, o menor espesor, introducidas en casco o cabezal de espesor de 3/8 de pulgada, o menos, no requieren refuerzo según normas *ASME*.

Se emplearán bridas de cuello soldable introducidas en el casco, (bridas de alimentación, carga de vapor y recirculación de líquido), y cabezales, (brida de descarga de líquido y de descarga de vapor), con la mínima extensión para soldar y sobresaliendo, del casco una determinada longitud según normas. Esto obliga a soldar un tramo recto de tubería, que complemente la longitud de las bridas, tabulada en *Megyesy* y transcritas en las figuras finales del primer capítulo del anexo segundo, de modo tal que la longitud sobresaliente de la brida y el tramo de tubo sea conforme a las normas, también transcrita en el capítulo citado.

El peso de los tubos debe añadirse al nominal de la brida en la Tabla A4.LXXX, multiplicando las longitudes correspondientes por el peso por pie de tubería, también proporcionado por *Megyesy*. Las dimensiones de las bridas, del tramo de tubo y el su peso por unidad de longitud, se proporcionan en sendas figuras al final del capítulo primero del anexo segundo como queda indicado.

Para las bridas grandes no se dispone ni la medida del sobresaliente, (que se ha aproximado a 10 pulgadas) ni el peso por unidad de longitud de tubería, por lo que el peso de éstas se calcula por geometría: siendo el tubo un cilindro hueco cuyos diámetros interno y externo se aportan, (en base a los datos de diámetro nominal y *Schedule* de las conducciones), puede calcularse el volumen de material tal como se ha realizado para diversos cuerpos de igual geometría a lo largo del presente capítulo. De la misma forma, al multiplicar el volumen por la densidad teórica del acero se obtiene el peso del tubo, que deberá sumarse al de la brida.

Con lo antedicho y las dimensiones tomadas de las figuras indicadas, se recopila y calculan los siguientes pesos de las tubuladuras:

<b>Peso de las tubuladuras</b>			
<b>Bridas (3" Sch 10)</b>		<b>Bridas (6" Sch 10)</b>	
<b>P-42 y P-43</b>		<b>P-44 y P-54</b>	
$W_{\text{brida } 150\#, 3"} \text{ (lb)}$	11,5	$W_{\text{brida } 150\#, 6"} \text{ (lb)}$	24
<b>Tubo 3", Sch 10 (ft)</b>	0,271	<b>Tubo 6", Sch 10 (ft)</b>	0,375
$W_{\text{tubo } 3", \text{ Sch } 10} \text{ (lb/ft)}$	4,33	$W_{\text{tubo } 6", \text{ Sch } 10} \text{ (lb/ft)}$	9,29
$W_{\text{tub } 3"} \text{ (lb)}$	12,673	$W_{\text{tub } 6"} \text{ (lb)}$	27,484
<b>Bridas (36" Sch 10)</b>		<b>Bridas (6" Sch 40)</b>	
<b>P-44, P-47, P-48, P-55, P-57 y P-58</b>		<b>P-46, P-51, P-56 y P-61</b>	
$W_{\text{brida } 150\#, 36"} \text{ (lb)}$	677	$W_{\text{brida } 150\#, 6"} \text{ (lb)}$	24
<b>Tubo 36", Sch 10 (ft)</b>	0,333	<b>Tubo 6", Sch 40 (ft)</b>	0,375
$D_{i36", \text{ Sch } 10} \text{ (in)}$	35,376	$W_{\text{tubo } 6", \text{ Sch } 40} \text{ (lb/ft)}$	18,97
$D_{o36", \text{ Sch } 10} \text{ (in)}$	36	$W_{\text{tub } 6"} \text{ (lb)}$	31,114
$W_{\text{tub } 36"} \text{ (lb)}$	680,304	$m_{\text{bridas}} \text{ (lb)}$	<b>1431,878</b>

Tabla. A4.LXXX. Peso de las tubuladuras

Donde los pesos  $W_{\text{brida } 150\#, \text{ DN}}$  son los pesos de brida de la categoría de 150 psi, correspondientes a los distintos diámetros nominales de las tuberías calculadas.

Las magnitudes "Tubo DN, Sch" incluyen las longitudes de los tramos de tubería soldados a las bridas, debidamente convertidas. A título de ejemplo, para una brida de 8" Sch 60 se soldará una tubería de longitud 4 pulgadas (0,333 ft) de modo que, según la magnitud C de la Figura A2.20 para la brida de 8 pulgadas, el conjunto sobresalga 8 pulgadas del cabezal de acuerdo a la Figura A2.19 del segundo anexo.

Los valores  $W_{\text{tubo DN, Sch}}$  recogen el peso por pie de las distintas tuberías según su número de *Schedule* y diámetro nominal. Este peso se multiplica por la longitud de la tubería, de la fila previa, y se suma al peso de las bridas obteniéndose los pesos  $W_{\text{tub DN}}$ , el peso de las tubuladuras de distintos diámetros nominales.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Finalmente, el peso total,  $m_{\text{bridas}}$ , es la suma de los pesos individuales de las tubuladuras. A la sazón suman dos bridas de 36 in, (carga y descarga de vapor), una de 6 in Sch 40 (recirculación de líquido de segunda a primera columna), otra de 6 in Sch 10 (descarga de líquido) y una última de 3 in (alimentación), como corresponde a la primera columna.

Por mor de lo indicado procede reforzar todas las bridas, ya que su diámetro nominal supera las 3 pulgadas o, en todo caso, el espesor del casco o cabezales es superior a 3/8 de pulgada, (7/8 de pulgada y 15/16 de pulgada respectivamente).

El refuerzo para las bridas consiste en un anillo que debe reponer la cantidad de metal eliminado por la abertura del, casco o cabezales, al perforarlo. El anillo de refuerzo se construye del mismo material que el casco y cabezales, (acero al carbono según especificación SA-515 grado 70).

La Figura A2.13, del segundo anexo, muestra el dibujo esquemático y dimensiones asociadas al anillo de refuerzo.

<b>Cálculo de anillos de refuerzo</b>					
<b>Tuberías de 6" Sch 40</b>					
<b>d (in)</b>	6,065	<b>t<sub>r</sub> (in)</b>	0,875	<b>A<sub>ref</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	5,307
<b>t<sub>ref</sub> (in)</b>	0,875	<b>a<sub>ref</sub> (in)</b>	3,032	<b>d<sub>i</sub> (in)</b>	6,625
<b>d<sub>o</sub> (in)</b>	12,690	<b>m<sub>ref</sub> (lb)</b>	<b>22,810</b>	<b>m<sub>ref</sub> (lb)</b>	<b>24,439</b>
<b>Tuberías de 36" Sch 10</b>					
<b>d (in)</b>	35,376	<b>t<sub>r</sub> (in)</b>	0,875	<b>A<sub>ref</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	30,954
<b>t<sub>ref</sub> (in)</b>	0,875	<b>a<sub>ref</sub> (in)</b>	17,688	<b>d<sub>i</sub> (in)</b>	36
<b>d<sub>o</sub> (in)</b>	71,376	<b>m<sub>ref</sub> (lb)</b>	<b>739,616</b>	<b>m<sub>ref</sub> (lb)</b>	<b>792,446</b>
<b>Tuberías de 6" Sch 10</b>					
<b>d (in)</b>	6,357	<b>t<sub>r</sub> (in)</b>	0,9375	<b>A<sub>ref</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	5,960
<b>t<sub>ref</sub> (in)</b>	0,9375	<b>a<sub>ref</sub> (in)</b>	3,178	<b>d<sub>i</sub> (in)</b>	6,625
	<b>d<sub>o</sub> (in)</b>	12,982	<b>m<sub>ref</sub> (lb)</b>	<b>26,003</b>	
<b>Tuberías de 3"</b>					
<b>d (in)</b>	3,260	<b>t<sub>r</sub> (in)</b>	0,875	<b>A<sub>ref</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	2,852
<b>t<sub>ref</sub> (in)</b>	0,875	<b>a<sub>ref</sub> (in)</b>	1,630	<b>d<sub>i</sub> (in)</b>	3,500
	<b>d<sub>o</sub> (in)</b>	6,760	<b>m<sub>ref</sub> (lb)</b>	<b>6,513</b>	

Tabla. A4.LXXXI. Dimensiones y peso de los anillos de refuerzo

El área transversal del anillo,  $A_{ref}$ , viene dada por la ecuación (A2.63) y las consideraciones efectuadas en el capítulo primero del anexo segundo siguen siendo válidas. Las dimensiones del refuerzo se calculan, a partir de la anterior ecuación, mediante (A2.64) y su peso, mediante (A2.65). Con lo anterior se obtienen los refuerzos mostrados en la Tabla A4.LXXXI, donde en aquéllos que se han presentado dos valores de peso, el segundo corresponde al del anillo de refuerzo de una brida insertada en el cuerpo de mayor espesor, esto es, un cabezal.

En cada refuerzo, se ha tomado bien el espesor del casco, bien el del cabezal, según corresponda al cuerpo en el que se inserta la brida. El peso de los refuerzos, los que corresponden a las bridas indicadas previamente, ya se incluyó en el del separador apartados atrás, así como el de las bridas.

#### A4.C2.2.9. Diseño mecánico (IX). Comprobaciones

El diseño mecánico concluye, una vez dimensionados todos los elementos estructurales, con la constatación de que todos los esfuerzos, ocasionados por las distintas cargas, no superan el máximo tolerable por el material.

Además debe comprobarse si el período fundamental de vibración encontrado supera al permitido. Lo mismo se efectuará para la deflexión del recipiente.

Se considerarán los siguientes esfuerzos:

- Presión interna,  $S_i$ .
- Viento,  $S_w$ .
- Peso en montaje,  $S_{vac}$ .
- Peso en operación,  $S_{op}$ .
- Carga sísmica,  $S_s$ .

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Las ecuaciones se mostraron en el anexo segundo, (A2.69), y las consideraciones establecidas en dicho punto continúan siendo válidas. Se tiene:

Comprobaciones							
<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	61,881	<b>D<sub>e</sub> (in)</b>	279,751	<b>t<sub>e</sub> (in)</b>	2,080	<b>S<sub>pi</sub> (psi)</b>	<b>2080,561</b>
<b>M<sub>T</sub> (lb·ft)</b>	9002403,149	<b>R<sub>m</sub> (in)</b>	138,835	<b>t<sub>e</sub> (in)</b>	2,080	<b>S<sub>w</sub> (psi)</b>	<b>857,634</b>
<b>m<sub>armado</sub> (lb)</b>	684892,162	<b>C<sub>m</sub> (in)</b>	868,542	<b>t<sub>e</sub> (in)</b>	2,080	<b>S<sub>vac</sub> (psi)</b>	<b>379,091</b>
<b>m<sub>rec,op</sub> (lb)</b>	5515760,918	<b>C<sub>m</sub> (in)</b>	868,542	<b>t<sub>e</sub> (in)</b>	2,080	<b>S<sub>op</sub> (psi)</b>	<b>3052,998</b>
<b>M<sub>T</sub> (lb·ft)</b>	1525720,683	<b>R<sub>m</sub> (in)</b>	138,835	<b>t<sub>e</sub> (in)</b>	2,080	<b>S<sub>s</sub> (psi)</b>	<b>145,351</b>

Tabla. A4.LXXXII. Comprobación de esfuerzos

Ninguna sollicitación supera el esfuerzo máximo admisible por el material, ( $S = 17500$  psi para acero al carbono según SA-515 grado 70).

Se verifica seguidamente si el período de vibración, tabulado en A4.LXIX, supera al permisible,  $T_a$ . Éste último se calcula según la ecuación (A2.71) y las consideraciones descritas en el capítulo primero del anexo segundo. Se tiene:

Comprobaciones							
<b>m<sub>sep,op</sub> (lb)</b>	5546199,430	<b>H<sub>tot</sub> (ft)</b>	187,916	<b>V (lb)</b>	330453,607	<b>T<sub>a</sub> (s)</b>	<b>7,917</b>

Tabla. A4.LXXXIII. Comprobación de vibración

Por comparación con el período de vibración recalculado, se comprueba que el problema de vibración excesiva no sucede en las torres diseñadas.

Por último, se verifica la deflexión del recipiente. Cuando actúa una carga de viento sobre un recipiente es de esperar una cierta deformación o deflexión,  $\Delta_m$ , (véase la Figura A2.14), tanto mayor cuanto más se eleve sobre el nivel del suelo y mayor sea la relación de longitud a diámetro. Debe comprobarse que ésta no supera 6 pulgadas cada 100 pies de altura. Es de aplicación la ecuación (A2.72) y

las consideraciones que se establecieron en el capítulo primero del anexo segundo. Así, se tiene:

Comprobaciones							
$P_w$ (lb/ft <sup>2</sup> )	22,23	$D_e$ (ft)	23,313	$H_{tot}$ (ft)	187,916	$R$ (in)	138,835
$t_{faldón}$ (in)	0,8125	$I$ (in <sup>4</sup> )	6830826,847	$E$ (lb/in <sup>2</sup> )	$29,3 \cdot 10^6$	$\Delta_m$ (in)	<b>0,697</b>
				$\Delta_{m,perm}$ (in)	<b>11,275</b>		

Tabla. A4.LXXXIV. Comprobación de deflexión

La deflexión máxima permitida,  $\Delta_{m,perm}$ , se calcula multiplicando la altura total por 6 pulgadas y dividiendo por 100 pies de altura. Como se puede comprobar, la deflexión de los recipientes es despreciable. El dato de módulo de elasticidad, tomado de *Megyesy*, se justifica en la composición de la aleación SA-515 grado 70 que, según especificaciones comerciales contiene un 0,31% en carbono.

Este apartado cierra el diseño mecánico, puesto que los espesores encontrados para cada elemento estructural, son coherentes con el peso y el esfuerzo a que se somete. El siguiente apartado incluye el cálculo de las orejas de izado de los recipientes vacíos, así como del volumen de pintura requerido.

#### A4.C2.2.10. Cálculo de orejas de izado y pintado del casco y cabezales

Los recipientes debe construirse incluyendo al menos un par de orejas de izado: eslabones atornillados a una base, con forma de oreja, soldada al casco, tal como muestra la Figura A2.15.

Cálculo de las orejas de izado					
$S$ (psi)	17500	$W$ (lb)	89416,334	$D$ (in)	3,25
$D_1$ (in)	3,375	$B$ (in)	5,875	$E$ (in)	9,74
		$t$ (in)	<b>0,610</b>		

Tabla. A4.LXXXV. Dimensiones de las orejas de izado

Para el cálculo del espesor de la oreja, *Megyesy* sugiere la ecuación (A2.74). Las consideraciones efectuadas en el anexo segundo continúan siendo válidas.

Se ha tabulado, en la Tabla A4.LXXXV, las dimensiones  $D$ , el diámetro del perno,  $D_1$  el diámetro del agujero de la oreja,  $B$ , el tamaño del borde cortado a cizalla y el brazo del momento  $E$ , para una carga máxima de 97000 lb. La tabla de dimensiones mínimas de las orejas se proporcionó parcialmente en el anexo segundo. En el capítulo previo figura completa en sus últimas páginas.

Puesto que el separador es muy pesado deberá dividirse en varias partes susceptibles de ser elevadas por las orejas instaladas. Se preverá la división en 8 partes iguales con vistas a su construcción.

El espesor de las orejas se redondea a 5/8 in. La soldadura se practica directamente al casco, (que también debe incluir clips de sujeción para el aislamiento y la chapa envolvente). Para la dimensión de la soldadura se considera la tabla mostrada por la Figura A2.17.

Dado que el espesor de la placa más gruesa, (a la sazón el casco, cuyo espesor corresponde a 7/8 de pulgada frente a la oreja de 5/8 de pulgada), el tamaño de la soldadura de filete, o angular, será de 5/16 de pulgada. Esta dimensión corresponde al cateto del triángulo rectángulo isósceles mayor que puede inscribirse en el cordón.

Según normas, la longitud de la unión debe estar comprendida entre 15 y 60 veces el tamaño de la garganta, (la hipotenusa correspondiente al triángulo anterior). Así, se tiene:

$$l_{sold}(in) = 30 \cdot a(in) = 30 \cdot \sqrt{(5/16)^2 + (5/16)^2} \cong 13,5 \text{ in}$$

Donde  $a$  es la dimensión de la garganta, calculada a partir del teorema de *Pitágoras*. La longitud de la oreja será de 13,5 pulgadas.

En lo tocante a la pintura, es éste un elemento importante de protección frente a la corrosión bajo aislamiento, como queda explicado en el capítulo primero del segundo anexo.

Debe calcularse tanto la superficie del casco como la de los cabezales. Se obtiene:

<b>Pintura</b>			
<b><math>D_{e,c}</math> (in)</b>	279,751	<b><math>D_{e,cab}</math> (in)</b>	277,466
<b><math>H_{tot}</math> (in)</b>	2254,992	<b><math>t_{cab,pi}</math> (in)</b>	0,9375
<b><math>S_{casco}</math> (in<sup>2</sup>)</b>	1981829,187	<b><math>S_{cab}</math> (in<sup>2</sup>)</b>	61282,756
<b><math>e_{capa}</math> (in)</b>	0,001	<b><math>e_{capa}</math> (in)</b>	0,001
<b><math>V_{pint,casco}</math> (in<sup>3</sup>)</b>	1981,829	<b><math>V_{pint,cabezales}</math> (in<sup>3</sup>)</b>	122,566
<b><math>V_{pint,casco}</math> (gal(US))</b>	<b>8,579</b>	<b><math>V_{pint,cabezales}</math> (gal(US))</b>	<b>0,531</b>
	<b><math>V_{pint,tot}</math> (gal(US))</b>	<b>76,523</b>	

Tabla. A4.LXXXVI. Cálculo de volumen de pintura

Se ha seleccionado un sistema de pinturas siguiendo especificaciones del *Steel Structures Painting Council*, (SSPC). Dicho sistema viene recomendado para ambientes secos, no corrosivos en interior de edificios o protegidos temporalmente contra intemperie. No se han considerado condiciones excesivamente severas, ya que la mayor parte del tiempo la estructura estará guarnecida por el aislamiento y chapa envolvente.

La identificación del sistema viene dada por SSPC-PS 7.01. No obliga al tratamiento previo, (sólo una limpieza de contaminantes superficiales del casco: grasa, tierra, entre otros componentes), y requiere un espesor de pintura seca de una milésima de pulgada, ( $e_{capa}$  en la Tabla A4.LXXXVI).

El volumen de pintura de cada componente, (casco y cabezales) se ha calculado multiplicando la superficie por el espesor de la capa de pintura. En el caso de los cabezales, debe multiplicarse por dos el anterior volumen, (a fin de obtener el volumen requerido por los dos cabezales). El volumen final es la suma de los volúmenes del

casco y los dos cabezales, convertido a galones estadounidenses, la unidad de referencia de los sistemas SSPC.

El sistema SSPC-PS 7.01 indica aplicar una mano de pintura de taller roja o café, cuyo contenido en sólidos es del 60%. Se exige una capa de pintura de espesor seco de una milésima de pulgada: cuando la pintura se seca, el espesor aplicado merma por la pérdida de volátiles, luego será necesario aumentar la cantidad de pintura aplicada el tanto por ciento correspondiente a los componentes volátiles: 40% para un contenido en sólidos del 60% como se muestra más arriba. El incremento del 40% se aplica multiplicando la suma de los volúmenes de casco y cabezales por 1,4.

Debe incrementarse un 50% la cantidad de pintura requerida en concepto de pérdidas por aplicación, (se trata del factor 1,5 de la última ecuación). Finalmente, el volumen de pintura se multiplica por cuatro, esto es la ecuación (A2.76) no sufre modificación alguna, debido a los cuatro recipientes requeridos por la operación “EXTRACTIVA 2”.

#### **A4.C2.3. Diseño mecánico de “MÚLTIPLE”**

Esta tercera sección se dividirá en varios apartados imbricados en el diseño mecánico de la misma. No se incluirán aspectos como el diseño de la red de tuberías, si bien, se indicarán los diámetros nominales requeridos en las bridas de entrada y salida a la unidad de “MÚLTIPLE”. Se remite al lector a la Figura A2.34 del segundo anexo, donde se muestra un esquema de la unidad.

La siguiente tabla resume la información general acerca de las torres que componen “MÚLTIPLE”, de forma análoga a como la Tabla A4.I describía las torres de “EXTRACTIVA 1”:

Torre primera				Torre segunda	
Agotamiento		Rectificación		Rectificación	
<b>NPR</b>	42	<b>NPR</b>	19	<b>NPR</b>	61
<b>T (ft)</b>	19,685	<b>T (ft)</b>	19,685	<b>T (ft)</b>	19,685
<b>t (ft)</b>	2,953	<b>t (ft)</b>	2,953	<b>t (ft)</b>	2,953
<b>H<sub>L</sub> (ft)</b>	12	<b>H<sub>p,s</sub> (ft)</b>	4	<b>H<sub>L</sub> (ft)</b>	12
				<b>H<sub>p,s</sub> (ft)</b>	4

Tabla. A4.LXXXVII. Cuerpos cilíndricos de las torres de “MÚLTIPLE”

No se prevé reducción por diámetro, ergo ambas torres estarán compuestas por un único casco cilíndrico, cerrado por dos cabezales iguales. Se decide diseñar la torre primera, ya que ésta cuenta con una brida más, por ser el recipiente que recibe la alimentación. En todo caso, las torres de “MÚLTIPLE” son idénticas tanto en diámetro como en altura, puesto que todas presentan el mismo número de platos.

A4.C2.3.1. Diseño mecánico (I). Determinación de la presión de diseño

Se evitará repetir procedimientos ya mostrados con anterioridad, por lo que se participa directamente la tabla conteniendo la información concerniente al apartado en cuestión, y se emplaza al lector a la revisión del capítulo primero del presente anexo, donde se proporcionan las expresiones y datos precisos para el cálculo.

Cálculo para P <sub>agua</sub>		Cálculo para P <sub>diseño</sub>	
<b>H (ft)</b>	196,118	<b>P<sub>operación</sub> (atm)</b>	2
<b>T (ft)</b>	19,685	<b>10% P (atm)</b>	0,2
<b>V (m<sup>3</sup>)</b>	1690,149	<b>30 psi (atm)</b>	2,041
<b>S (m<sup>2</sup>)</b>	1126,766	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	<b>61,525</b>
<b>m<sub>agua</sub> (kg)</b>	1690149,202		
<b>p<sub>agua</sub> (N)</b>	16574701,670		
<b>P<sub>agua</sub> (atm)</b>	0,145		

Tabla. A4.LXXXVIII. Cálculo de la presión de diseño

#### A4.C2.3.2. Diseño mecánico (II). Determinación de espesores para el casco y los cabezales

El material seleccionado para el separador es acero al carbono según especificación SA-515 grado 70, por los motivos expuestos en el capítulo anterior.

Se obtiene para el casco:

Espesor por presión interna	
$P_{\text{diseño}}$ (psi)	61,523
$S$ (psi)	17500
$E$	0,85
$R$ (in) (interior)	118,110
$D$ (in) (interior)	236,220
C.A. (in) (20 años)	0,1
$t$ (in)	0,490
$t_{c,pi}$ (in) (20 años)	0,590
$P_{\text{adm}}$ (psi)	78,464
$t_{c,circ}$ (in) (20 años)	0,344

Tabla. A4.LXXXIX. Cálculo del espesor de casco sometido a presión interna

Nuevamente se observa que el régimen longitudinal de esfuerzos predomina sobre el circunferencial y la presión admisible supera la de diseño. Lo que proporciona un espesor comercial:

$$t_{c,pi} = 5/8 \text{ de pulgada (15,88 mm)}$$

Este será el espesor de casco sometido a presión interna, que se empleará en cálculos posteriores.

Los cabezales en este caso son del tipo "Klopper" tal como se recomendó, en el primer capítulo del presente anexo, para una presión de operación inferior a 6,8 atm, por lo que se está a las ecuaciones dadas en el primer capítulo del anexo segundo. Así, se obtiene:

Espesor por presión interna	
<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	61,525
<b>D (in) (interior)</b>	236,220
<b>S (psi)</b>	17500
<b>E</b>	1
<b>M</b>	1,54
<b>C.A. (in) (20 años)</b>	0,1
<b>t (in)</b>	<b>0,640</b>
<b>t<sub>cab,pi</sub> (in) (20 años)</b>	<b>0,740</b>
<b>P<sub>adm</sub> (psi)</b>	<b>72,129</b>

Tabla. A4.XC. Cálculo del espesor de cabezales sometidos a presión interna

La presión admisible supera la de diseño, por lo que el cálculo es conforme. Así, se toma para cada cabezal el siguiente espesor comercial:

$$t_{cab,pi} = 3/4 \text{ de pulgada (19,05 mm)}$$

Según normas de diseño mecánico, el espesor de los cabezales debe ser superior al del casco, a fin de asegurar un cierre adecuado, lo que se verifica a tenor de lo mostrado.

#### A4.C2.3.3. Diseño mecánico (III). Determinación del espesor del aislamiento y de la chapa envolvente

Para el caso de temperatura de operación superior a la ambiental, se ha estimado un espesor requerido de 25 mm, frente a 30 mm para temperatura de operación inferior a la ambiente. Por tanto, se toma 30 mm (1,181 in) como espesor requerido de aislamiento.

$$t_{ais} = 30 \text{ mm}$$

El espesor de la envolvente se mantiene respecto del capítulo de diseño mecánico de "SIMPLE". En definitiva, se tiene como espesor de la envolvente de aluminio:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

$$t_{env} = 0,61 \text{ mm}$$

Según normas ASTM B 209, incluirá recubrimiento corrosivo a base de papel *kraft* con película de polietileno para protección contra intemperie.

### A4.C2.3.4. Diseño mecánico (IV). Determinación del espesor final requerido para soportar la carga por viento

En este apartado se presenta una tabla conteniendo los datos relativos a la determinación del espesor por viento, que debe sumarse a la carga por presión interna y sismo. Como se ha mostrado en capítulos previos de diseño mecánico, el procedimiento de cálculo de este requerimiento depende del diámetro externo del recipiente que, al incrementar por la suma de las distintas contribuciones al espesor total del aparato, requiere su evaluación en varios ciclos de cálculo.

Carga por viento (Recalculada)					
Velocidad básica del viento (m/s)		29	(mi/h)	70	
$q_s$ (lb/ft <sup>2</sup> )	13	$C_e$	2,1	$C_q$	0,9
$P_w$ (lb/ft <sup>2</sup> )	24,57	$D_e$ (ft)	20,021	$E$	0,85
$h_T$ (ft)	6,562	$H_{tot}$ (ft)	202,680	$h_1$ (ft)	101,340
$H_{esc}$ (ft lin.)	200,680	$H_{plat}$ (ft lin.)	8	Nº plataformas	8
$V$ (lb)	99702,964	$M$ (lb-ft)	10103887,960	Recipiente	
$V$ (lb)	4930,702	$M$ (lb-ft)	494746,165	Escalera	
$V$ (lb)	196,560	$M$ (lb-ft)	3931,200	$h_{plat,1}$ (ft)	20,000
$V$ (lb)	196,560	$M$ (lb-ft)	9828,000	$h_{plat,2}$ (ft)	50,000
$V$ (lb)	196,560	$M$ (lb-ft)	15724,800	$h_{plat,3}$ (ft)	80,000
$V$ (lb)	196,560	$M$ (lb-ft)	21621,600	$h_{plat,4}$ (ft)	110,000
$V$ (lb)	196,560	$M$ (lb-ft)	27518,400	$h_{plat,5}$ (ft)	140,000
$V$ (lb)	196,560	$M$ (lb-ft)	30466,800	$h_{plat,6}$ (ft)	155,000
$V$ (lb)	196,560	$M$ (lb-ft)	36363,600	$h_{plat,7}$ (ft)	185,000
$V$ (lb)	196,560	$M$ (lb-ft)	39445,620	$h_{plat,8}$ (ft)	200,680
$V$ (lb)	106206,147	$M$ (lb-ft)	10783534,150	Total	
$M_T$ (lb-ft)	10097233,460	$R_m$ (in)	119,119	$S$ (psi)	17500
		$t$ (in)	0,183		

Tabla. A4.XCI. Cálculo del espesor final requerido para la carga por viento

En este caso se presenta directamente la contribución final convergida. En la Tabla A4.XCI aparecen también datos de interés como el número de plataformas instaladas, (estando la primera, sexta y octava a la altura de las bocas de hombre), o la presión del viento calculada para un recipiente comprendido entre 200 y 250 ft de altura, (véase Tabla A2.XXXVII).

#### A4.C2.3.5. Diseño mecánico (V). Determinación del espesor final requerido para soportar la carga sísmica

De nuevo se presenta la solución convergida para el espesor resistente a carga sísmica.

<b>Carga sísmica (Recalculada)</b>					
<b>Z</b>	0,375	<b>I</b>	1	<b>K</b>	2
<b>H<sub>tot</sub> (ft)</b>	202,680	<b>D<sub>e</sub> (ft)</b>	20,021	<b>t<sub>faldón</sub> (13/16 in)</b>	0,8125
<b>w (lb/ft)</b>	21791,992	<b>T (s)</b>	1,990	<b>C (obtenido)</b>	0,047
<b>C (tomado)</b>	0,047	<b>S</b>	1,5	<b>W (lb)</b>	4416796,412
<b>V (lb)</b>	234820,616	<b>0,25V (lb)</b>	58705,154	<b>F<sub>t</sub> (lb)</b>	32711,398
<b>M (lb-ft)</b>	33938908,510	<b>M<sub>T</sub> (lb-ft)</b>	1098759,033	<b>R<sub>m</sub> (in)</b>	119,119
<b>S (psi)</b>	17500	<b>E</b>	0,85	<b>t<sub>c,s</sub> (in)</b>	<b>0,020</b>

Tabla. A4.XCII. Cálculo del espesor final requerido para la carga por sismo

Donde se ha introducido el espesor final del faldón, a la sazón:

$$t_{\text{faldón}} = 13/16 \text{ de pulgada (20,64 mm)}$$

#### A4.C2.3.6. Diseño mecánico (VI). Determinación del peso final del aparato en operación

Se excusa referir el procedimiento íntegro de cálculo y se emplaza al lector a la revisión del capítulo primero del segundo anexo, de donde son aplicables todas las ecuaciones referidas.

Sea la siguiente tabla-resumen:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Peso del separador (Recalculado)					
$m_{\text{casco}}$ (lb)	403434,944	$m_{\text{cabezales}}$ (lb)	17520,195	$m_{\text{envolvente}}$ (lb)	4180,241
$m_{\text{aislamiento}}$ (lb)	4901,526	$m_{\text{platos}}$ (lb)	134191,851	$m_{\text{armado}}$ (lb)	579242,465
$m_{\text{agua,rec}}$ (lb)	3812062,716	$m_{\text{rec, op}}$ (lb)	4391305,181	$m_{\text{faldón}}$ (lb)	13635,297
		$m_{\text{aep,op}}$ (lb)	4416796,412		

Tabla. A4.XCIII. Estimación del peso final del aparato en operación

El peso de armado es la suma de los que le preceden, mientras que el peso  $m_{\text{rec, op}}$  incluye el peso de armado y líquido. Finalmente,  $m_{\text{sep, op}}$  suma al anterior el peso del faldón, así como de las tubuladuras y refuerzos que corresponden a la torre primera, (que incluye una brida más por ser el recipiente que recibe la alimentación), y el anillo de la base. Los espesores finales de los cuerpos del recipiente son los que siguen:

$$t_{\text{c,pi+w+s}} = 13/16 \text{ de pulgada (20,64 mm)}$$

$$t_{\text{cab,pi}} = 7/8 \text{ de pulgada (22,22 mm)}$$

Estos espesores son el resultado de sumar las contribuciones de presión interna, viento y sismo en el caso del casco. El de cabezales no fue preciso modificarlo, puesto que el obtenido, a resultas de los requerimientos por presión interna, es superior al de casco sumadas todas las contribuciones.

### A4.C2.3.7. Diseño mecánico (VII). Diseño final del anillo de la base

Se presenta seguidamente la tabla-resumen de la solución convergida para el cálculo del anillo de la base.

Diseño del anillo de la base (Recalculado)					
$S_B$ (psi)	14824,416	$S_1$ (psi)	1434,308	$S_2$ (psi)	14462,604
$l_2$ (in)	4,5	$l_3$ (in)	3,75	N	40
$D_{\text{pernos}}$ (in)	4	$t_B$ (in)	4,5	$m_B$ (lb)	9943,014

Tabla. A4.XCIV. Dimensiones y comprobaciones finales del anillo de la base

El material de construcción del anillo de la base será acero al carbono según SA-285 grado C ya que pese a ser el esfuerzo máximo permitido por el material de 13800 psi a la temperatura de operación, (véase apartados anteriores), *Megyesy* señala un valor de 18000 psi como esfuerzo máximo permisible para el anillo de la base. Así, los esfuerzos  $S_1$  y  $S_2$  cumplen con el requerimiento mecánico, por lo que la solución encontrada es conforme. El esfuerzo  $S_B$  máximo permisible para los pernos (según SA-325) es de 15000 psi.

#### A4.C2.3.8. Diseño mecánico (VIII). Cálculo de las tubuladuras y esfuerzos

La estimación del peso de las bridas asociadas al recipiente requiere el dimensionado de las tuberías de la alimentación, de descarga del líquido y del vapor y de carga de vapor y de líquido. El método de cálculo se explicó convenientemente en el capítulo primero del presente anexo, por lo que se omite su repetición.

Conocidas las velocidades óptimas y los caudales volumétricos, puede encontrarse el radio interno para las conducciones. Como se anticipó previamente, para el caso de las tubuladuras se considerará la torre primera en lugar de la segunda, para el diseño mecánico de la que representa a todos los recipientes, pues esta dispone una brida adicional, correspondiente a la conducción de alimentación.

Sin perjuicio de lo antedicho, se requieren las siguientes tuberías para ambas columnas:

- Ramales de alimentación: Transportan el destilado de “EXTRACTIVA 2”, de carga a “MÚLTIPLE”, a su temperatura de operación y una presión de 3 atm para compensar las pérdidas de carga a su trasiego por columna.
- Conducción de descarga de fondo de primera columna: La presión es la de operación: 2 atm.
- Conducción de carga de vapor recirculado a primera columna: Procede del rehervidor. A presión de operación: 2 atm.

- Conducción de descarga de vapor de primera columna: Es la misma conducción de carga a segunda columna. A presión de operación: 2 atm.
- Conducción de recirculación de líquido de segunda a primera columna: Es la misma conducción de descarga de fondo de la segunda columna. A 2,5 atm para compensar pérdidas.
- Conducción de descarga de vapor de segunda columna: A presión de operación: 2 atm.
- Conducción de recirculación de líquido a segunda columna: Procede del acumulador de reflujo. A 3 atm para compensar pérdidas.

Obsérvese que en este caso no se dispone una conducción general que se ramifique para alimentar a cada tren, puesto que el destilado de la operación previa, por proceder de dos trenes y cargarse a los dos de la actual, viene ajustado en cada uno de sus ramales al caudal requerido por “MÚLTIPLE”, es decir, cada ramal de destilado de “EXTRACTIVA 2” alimenta a cada tren de su consecuente.

Las pérdidas de carga del líquido por plato se estiman multiplicando el nivel de líquido en plato, (véanse apartados de pérdidas de carga en el anexo previo) por la aceleración de la gravedad, y la mayor densidad de la columna como criterio conservador. Multiplicando por el número de platos se obtiene la pérdida de carga en unidades de presión, tal como se indicó en el capítulo anterior. Otro tanto puede realizarse con las corrientes de vapor, si bien la caída de presión es despreciable, (apenas unos milímetros de mercurio).

A continuación se presenta el cálculo de la presión de diseño de cada tubería, y se tabulan los resultados que permitirán establecer las especificaciones del sistema de tuberías asociado a “MÚLTIPLE”.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Cálculo de las conducciones: P-52 Y P-62					
<b>P (psi)</b>	44,088	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	74,088	<b>S (psi)</b>	15000
<b>E/2 (Mmol/año)</b>	3188,424	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	0,011	<b>E/2 (ft<sup>3</sup>/s)</b>	0,311
<b>A<sub>i,tubo</sub> (ft<sup>2</sup>)</b>	0,027	<b>R<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	1,111	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,106	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	1355,580	<b>D<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	<b>2,223</b>

Tabla. A4.XCV. Estimación del tamaño de los ramales de alimentación a “MÚLTIPLE”

Cálculo de las conducciones: P-65 y P-75					
<b>P (psi)</b>	29,392	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	59,392	<b>S (psi)</b>	15000
<b>L' (Mmol/año)</b>	16776,680	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	0,011	<b>L' (ft<sup>3</sup>/s)</b>	1,715
<b>A<sub>i,tubo</sub> (ft<sup>2</sup>)</b>	0,138	<b>R<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	2,518	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,111	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	645,555	<b>D<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	<b>5,036</b>

Tabla. A4.XCVI. Estimación del tamaño de la conducción de descarga de fondo de primera columna

Cálculo de las conducciones: P-66 y P-76					
<b>P (psi)</b>	29,392	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	59,392	<b>S (psi)</b>	15000
<b>V' (Mmol/año)</b>	16713,830	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	$8,251 \cdot 10^{-5}$	<b>V' (ft<sup>3</sup>/s)</b>	226,834
<b>A<sub>i,tubo</sub> (ft<sup>2</sup>)</b>	4,439	<b>R<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	14,264	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,164	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	170,958	<b>D<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	<b>28,528</b>

Tabla. A4.XCVII. Estimación del tamaño de la conducción de carga de vapor recirculado a primera columna

Cálculo de las conducciones: P-68 y P-78					
<b>P (psi)</b>	29,392	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	59,392	<b>S (psi)</b>	15000
<b>V (Mmol/año)</b>	16713,830	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	$5,996 \cdot 10^{-5}$	<b>V (ft<sup>3</sup>/s)</b>	312,149
<b>A<sub>i,tubo</sub> (ft<sup>2</sup>)</b>	4,659	<b>R<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	14,613	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,165	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	168,478	<b>D<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	<b>29,227</b>

Tabla. A4.XCVIII. Estimación del tamaño de la conducción de descarga de vapor de primera columna

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Cálculo de las conducciones: P-67 y P-77					
<b>P (psi)</b>	36,740	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	66,740	<b>S (psi)</b>	15000
<b>L (Mmol/año)</b>	13588,256	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	0,011	<b>L (ft<sup>3</sup>/s)</b>	1,326
<b>A<sub>i,tubo</sub> (ft<sup>2</sup>)</b>	0,126	<b>R<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	2,406	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,112	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	679,752	<b>D<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	<b>4,812</b>

Tabla. A4.XCIX. Estimación del tamaño de la conducción de recirculación de líquido de segunda a primera columna

Cálculo de las conducciones: P-69 y P-79					
<b>P (psi)</b>	29,392	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	59,392	<b>S (psi)</b>	15000
<b>V (Mmol/año)</b>	16713,830	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	6,392·10 <sup>-5</sup>	<b>V (ft<sup>3</sup>/s)</b>	292,810
<b>A<sub>i,tubo</sub> (ft<sup>2</sup>)</b>	4,648	<b>R<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	14,596	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,165	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	168,599	<b>D<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	<b>29,192</b>

Tabla. A4.C. Estimación del tamaño de la conducción de descarga de vapor de segunda columna

Cálculo de las conducciones: P-72 y P-82					
<b>P (psi)</b>	44,088	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	74,088	<b>S (psi)</b>	15000
<b>L (Mmol/año)</b>	13588,256	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	0,011	<b>L (ft<sup>3</sup>/s)</b>	1,325
<b>A<sub>i,tubo</sub> (ft<sup>2</sup>)</b>	0,126	<b>R<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	2,405	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,113	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	687,867	<b>D<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	<b>4,810</b>

Tabla. A4.CI. Estimación del tamaño de la conducción de recirculación de líquido a segunda columna

En el título de cada tabla de conducciones se indica la denominación correspondiente, tal como figura en el plano que muestra el diagrama de flujo del proceso. Las conducciones se dan por duplicado, puesto que se tienen dos trenes idénticos de separación.

Con las conducciones conocidas, resta sumar el peso de las bridas correspondientes. Para el diseño en cuestión, se supondrá que cada recipiente contará con una brida de alimentación de diámetro nominal de 2-1/2 in, una brida de descarga de líquido de 5 in y otra de descarga de vapor de 30 in. A lo que deben añadirse la brida de carga de vapor, de 30 in y la de recirculación de líquido, de 5 in.

Todas las bridas se construirán en acero forjado según especificación SA-105; se clasifican por su clase de presión o, en inglés, “*rating*”, expresadas en psi. La clase inferior de bridas, para servicios a baja presión como los requeridos para el presente diseño es de 150 psi ó 150#, como se nota técnicamente.

Para la clase de presión seleccionada, *Megyesy* proporciona una tabla de pesos de bridas, según diámetro nominal de las conducciones embridadas y tipo de brida. De dicha tabla se toman los pesos mostrados en la Tabla A4.CII, para bridas de la clase 150# de tipo cuello soldable, según los distintos diámetros nominales de tubo asociado. La mencionada tabla de pesos, tomada de *Megyesy* se presentó al final del capítulo primero del segundo anexo.

Las bridas de cuello soldable son las más extensamente utilizadas en la industria petroquímica, para líneas de proceso. Esta aplicación se denomina de responsabilidad. Por ello, se seleccionan, para las tubuladuras de entrada y salida de corrientes, este tipo de bridas.

Las bridas se sueldan a un tubo de longitud determinada por normas, (según las dimensiones de las mismas) y, por forzar la pérdida de material al insertarse en el casco o cabezales del recipiente, pueden requerir refuerzo: aquéllas conducciones de 3 pulgadas, o menor espesor, introducidas en casco o cabezal de espesor de 3/8 de pulgada, o menos, no requieren refuerzo según normas *ASME*.

Se emplearán bridas de cuello soldable introducidas en el casco, (bridas de alimentación, carga de vapor y recirculación de líquido), y cabezales, (brida de descarga de líquido y de descarga de vapor), con la mínima extensión para soldar y sobresaliendo, del casco una determinada longitud según normas. Esto obliga a soldar un tramo recto de tubería, que complemente la longitud de las bridas, tabulada en *Megyesy* y transcritas en las figuras finales del primer capítulo del anexo segundo, de modo tal que la longitud sobresaliente de la

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

brida y el tramo de tubo sea conforme a las normas, también transcrita en el capítulo citado.

El peso de los tubos debe añadirse al nominal de la brida en la Tabla A4.CII, multiplicando las longitudes correspondientes por el peso por pie de tubería, también proporcionado por *Megyesy*. Las dimensiones de las bridas, del tramo de tubo y el su peso por unidad de longitud, se proporcionan en sendas figuras al final del capítulo primero del anexo segundo como queda indicado.

Con lo antedicho y las dimensiones tomadas de las figuras indicadas, se recopila y calculan los siguientes pesos de las tubuladuras:

<b>Peso de las tubuladuras</b>			
<b>Bridas (2-1/2" Sch 10)</b>		<b>Bridas (5" Sch 40)</b>	
<b>P-52 y P-62</b>		<b>P-65, P-67, P-72, P-75, P-77 y P-82</b>	
<b><math>W_{\text{brida } 150\#, 2,5"} \text{ (lb)}</math></b>	10	<b><math>W_{\text{brida } 150\#, 5"} \text{ (lb)}</math></b>	20
<b>Tubo 2,5", Sch 10 (ft)</b>	0,271	<b>Tubo 5", Sch 40 (ft)</b>	0,375
<b><math>W_{\text{tubo } 2,5", \text{ Sch } 10} \text{ (lb/ft)}</math></b>	3,53	<b><math>W_{\text{tubo } 5", \text{ Sch } 40} \text{ (lb/ft)}</math></b>	14,62
<b><math>W_{\text{tub } 2,5"} \text{ (lb)}</math></b>	10,956	<b><math>W_{\text{tub } 5"} \text{ (lb)}</math></b>	25,482
<b>Bridas (30" Sch 10)</b>			
<b>P-66, P-68, P-69, P-76, P-78 y P-79</b>			
<b><math>W_{\text{brida } 150\#, 30"} \text{ (lb)}</math></b>	375		
<b>Tubo 30", Sch 10 (ft)</b>	0,406		
<b><math>W_{\text{tubo } 30", \text{ Sch } 10} \text{ (lb/ft)}</math></b>	99		
<b><math>W_{\text{tub } 30"} \text{ (lb)}</math></b>	415,219		
<b><math>m_{\text{bridas}} \text{ (lb)}</math></b>	<b>892,358</b>		

Tabla. A4.CII. Peso de las tubuladuras

Donde los pesos  $W_{\text{brida } 150\#, \text{ DN}}$  son los pesos de brida de la categoría de 150 psi, correspondientes a los distintos diámetros nominales de las tuberías calculadas.

Las magnitudes "Tubo DN, Sch" incluyen las longitudes de los tramos de tubería soldados a las bridas, debidamente convertidas.

Los valores  $W_{\text{tubo } \text{DN}, \text{ Sch}}$  recogen el peso por pie de las distintas tuberías según su número de *Schedule* y diámetro nominal. Este pe-

so se multiplica por la longitud de la tubería, de la fila previa, y se suma al peso de las bridas obteniéndose los pesos  $W_{\text{tub DN}}$ , el peso de las tubuladuras de distintos diámetros nominales.

Finalmente, el peso total,  $m_{\text{bridas}}$ , es la suma de los pesos individuales de las tubuladuras. A la sazón suman dos bridas de 30 in, (carga y descarga de vapor), dos de 5 in Sch 40 (recirculación de líquido de segunda a primera columna y descarga de líquido) y una última de 2-1/2 in (alimentación), como corresponde a la primera columna.

Por mor de lo indicado procede reforzar todas las bridas, ya que su diámetro nominal supera las 3 pulgadas o, en todo caso, el espesor del casco o cabezales es superior a 3/8 de pulgada, (13/16 de pulgada y 7/8 de pulgada respectivamente).

El refuerzo para las bridas consiste en un anillo que debe reponer la cantidad de metal eliminado por la abertura del, casco o cabezales, al perforarlo. El anillo de refuerzo se construye del mismo material que el casco y cabezales, (acero al carbono según especificación SA-515 grado 70).

La Figura A2.13, del segundo anexo, muestra el dibujo esquemático y dimensiones asociadas al anillo de refuerzo.

El área transversal del anillo,  $A_{\text{ref}}$ , viene dada por la ecuación (A2.63) y las consideraciones efectuadas en el capítulo primero del anexo segundo siguen siendo válidas. Las dimensiones del refuerzo se calculan, a partir de la anterior ecuación, mediante (A2.64) y su peso, mediante (A2.65). Con lo anterior se obtienen los refuerzos mostrados en la Tabla A4.LXXXI, donde en aquéllos que se han presentado dos valores de peso, el segundo corresponde al del anillo de refuerzo de una brida insertada en el cuerpo de mayor espesor, esto es, un cabezal.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

<b>Cálculo de anillos de refuerzo</b>					
<b>Tuberías de 5" Sch 40</b>					
<b>d (in)</b>	5,047	<b>t<sub>r</sub> (in)</b>	0,8125	<b>A<sub>ref</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	4,101
<b>t<sub>ref</sub> (in)</b>	0,8125	<b>a<sub>ref</sub> (in)</b>	2,523	<b>d<sub>i</sub> (in)</b>	5,563
<b>d<sub>o</sub> (in)</b>	10,610	<b>m<sub>ref</sub> (lb)</b>	<b>14,758</b>	<b>m<sub>ref</sub> (lb)</b>	<b>15,893</b>
<b>Tuberías de 30" Sch 10</b>					
<b>d (in)</b>	29,376	<b>t<sub>r</sub> (in)</b>	0,8125	<b>A<sub>ref</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	23,868
<b>t<sub>ref</sub> (in)</b>	0,8125	<b>a<sub>ref</sub> (in)</b>	14,688	<b>d<sub>i</sub> (in)</b>	30
<b>d<sub>o</sub> (in)</b>	59,376	<b>m<sub>ref</sub> (lb)</b>	<b>474,700</b>	<b>m<sub>ref</sub> (lb)</b>	<b>511,216</b>
<b>Tuberías de 2-1/2"</b>					
<b>d (in)</b>	2,635	<b>t<sub>r</sub> (in)</b>	0,8125	<b>A<sub>ref</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	2,141
<b>t<sub>ref</sub> (in)</b>	0,8125	<b>a<sub>ref</sub> (in)</b>	1,318	<b>d<sub>i</sub> (in)</b>	2,875
	<b>d<sub>o</sub> (in)</b>	5,510	<b>m<sub>ref</sub> (lb)</b>	<b>3,995</b>	

Tabla. A4.CIII. Dimensiones y peso de los anillos de refuerzo

En cada refuerzo, se ha tomado bien el espesor del casco, bien el del cabezal, según corresponda al cuerpo en el que se inserta la brida. El peso de los refuerzos, los que corresponden a las bridas indicadas previamente, ya se incluyó en el del separador apartados atrás, así como el de las bridas.

### A4.C2.3.9. Diseño mecánico (IX). Comprobaciones

El diseño mecánico concluye, una vez dimensionados todos los elementos estructurales, con la constatación de que todos los esfuerzos, ocasionados por las distintas cargas, no superan el máximo tolerable por el material.

Además debe comprobarse si el período fundamental de vibración encontrado supera al permitido. Lo mismo se efectuará para la deflexión del recipiente.

Se considerarán los siguientes esfuerzos:

- Presión interna,  $S_i$ .
- Viento,  $S_w$ .

- Peso en montaje,  $S_{vac}$ .
- Peso en operación,  $S_{op}$ .
- Carga sísmica,  $S_s$ .

Las ecuaciones se mostraron en el anexo segundo, (A2.69), y las consideraciones establecidas en dicho punto continúan siendo válidas. Se tiene:

Comprobaciones							
<b><math>P_{diseño}</math> (psi)</b>	61,525	<b><math>D_e</math> (in)</b>	240,256	<b><math>t_e</math> (in)</b>	2,018	<b><math>S_{pi}</math> (psi)</b>	<b>1831,594</b>
<b><math>M_T</math> (lb-ft)</b>	10097233,459	<b><math>R_m</math> (in)</b>	119,119	<b><math>t_e</math> (in)</b>	2,018	<b><math>S_w</math> (psi)</b>	<b>1347,201</b>
<b><math>m_{armado}</math> (lb)</b>	579242,465	<b><math>C_m</math> (in)</b>	744,661	<b><math>t_e</math> (in)</b>	2,018	<b><math>S_{vac}</math> (psi)</b>	<b>385,534</b>
<b><math>m_{rec,op}</math> (lb)</b>	4391305,181	<b><math>C_m</math> (in)</b>	744,661	<b><math>t_e</math> (in)</b>	2,018	<b><math>S_{op}</math> (psi)</b>	<b>2922,779</b>
<b><math>M_T</math> (lb-ft)</b>	1098759,033	<b><math>R_m</math> (in)</b>	119,119	<b><math>t_e</math> (in)</b>	2,018	<b><math>S_s</math> (psi)</b>	<b>146,599</b>

Tabla. A4.CIV. Comprobación de esfuerzos

Ninguna sollicitación supera el esfuerzo máximo admisible por el material, ( $S = 17500$  psi para acero al carbono según SA-515 grado 70).

Se verifica seguidamente si el período de vibración, tabulado en A4.XCII, supera al permisible,  $T_a$ . Éste último se calcula según la ecuación (A2.71) y las consideraciones descritas en el capítulo primero del anexo segundo. Se tiene:

Comprobaciones							
<b><math>m_{sep,op}</math> (lb)</b>	4416796,412	<b><math>H_{tot}</math> (ft)</b>	202,680	<b><math>V</math> (lb)</b>	234820,616	<b><math>T_a</math> (s)</b>	<b>8,705</b>

Tabla. A4.CV. Comprobación de vibración

Por comparación con el período de vibración recalculado, se comprueba que el problema de vibración excesiva no sucede en las torres diseñadas.

Por último, se verifica la deflexión del recipiente. Cuando actúa una carga de viento sobre un recipiente es de esperar una cierta deformación o deflexión,  $\Delta_m$ , (véase la Figura A2.14), tanto mayor cuan-

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

to más se eleve sobre el nivel del suelo y mayor sea la relación de longitud a diámetro. Debe comprobarse que ésta no supera 6 pulgadas cada 100 pies de altura. Es de aplicación la ecuación (A2.72) y las consideraciones que se establecieron en el capítulo primero del anexo segundo. Así, se tiene:

Comprobaciones							
$P_w$ (lb/ft <sup>2</sup> )	24,57	$D_e$ (ft)	20,021	$H_{tot}$ (ft)	202,680	$R$ (in)	119,119
$t_{faldón}$ (in)	0,8125	$I$ (in <sup>4</sup> )	4314364,703	$E$ (lb/in <sup>2</sup> )	$29,3 \cdot 10^6$	$\Delta_m$ (in)	<b>1,418</b>
				$\Delta_{m,perm}$ (in)	<b>12,161</b>		

Tabla. A4.CVI. Comprobación de deflexión

La deflexión máxima permitida,  $\Delta_{m,perm}$ , se calcula multiplicando la altura total por 6 pulgadas y dividiendo por 100 pies de altura. Como se puede comprobar, la deflexión de los recipientes es despreciable. El dato de módulo de elasticidad, tomado de *Megyesy*, se justifica en la composición de la aleación SA-515 grado 70 que, según especificaciones comerciales contiene un 0,31% en carbono.

Este apartado cierra el diseño mecánico, puesto que los espesores encontrados para cada elemento estructural, son coherentes con el peso y el esfuerzo a que se somete. El siguiente apartado incluye el cálculo de las orejas de izado de los recipientes vacíos, así como del volumen de pintura requerido.

### A4.C2.3.10. Cálculo de orejas de izado y pintado del casco y cabezales

Los recipientes debe construirse incluyendo al menos un par de orejas de izado: eslabones atornillados a una base, con forma de oreja, soldada al casco, tal como muestra la Figura A2.15.

Para el cálculo del espesor de la oreja, *Megyesy* sugiere la ecuación (A2.74). Las consideraciones efectuadas en el anexo segundo continúan siendo válidas. Se tiene:

<b>Cálculo de las orejas de izado</b>					
<b>S (psi)</b>	17500	<b>W (lb)</b>	86390,334	<b>D (in)</b>	3,25
<b>D<sub>1</sub> (in)</b>	3,375	<b>B (in)</b>	5,875	<b>E (in)</b>	9,74
		<b>t (in)</b>	<b>0,589</b>		

Tabla. A4.CVII. Dimensiones de las orejas de izado

Se ha tabulado, en la Tabla A4.CVII, las dimensiones D, el diámetro del perno, D<sub>1</sub> el diámetro del agujero de la oreja, B, el tamaño del borde cortado a cizalla y el brazo del momento E, para una carga máxima de 97000 lb. La tabla de dimensiones mínimas de las orejas se proporcionó parcialmente en el anexo segundo. En el capítulo previo figura completa en sus últimas páginas.

Puesto que el separador es muy pesado deberá dividirse en varias partes susceptibles de ser elevadas por las orejas instaladas. Se preverá la división en 7 partes iguales con vistas a su construcción.

El espesor de las orejas se redondea a 5/8 in. La soldadura se practica directamente al casco, (que también debe incluir clips de sujeción para el aislamiento y la chapa envolvente). Para la dimensión de la soldadura se considera la tabla mostrada por la Figura A2.17.

Puesto que el espesor de la placa más gruesa, (a la sazón el casco, cuyo espesor corresponde a 13/16 de pulgada frente a la oreja de 5/8 de pulgada), el tamaño de la soldadura de filete, o angular, será de 5/16 de pulgada. Esta dimensión corresponde al cateto del triángulo rectángulo isósceles mayor que puede inscribirse en el cordón.

Según normas, la longitud de la unión debe estar comprendida entre 15 y 60 veces el tamaño de la garganta, (la hipotenusa correspondiente al triángulo anterior). Así, se tiene:

$$l_{sold}(\text{in}) = 30 \cdot a(\text{in}) = 30 \cdot \sqrt{(5/16)^2 + (5/16)^2} \cong 13,5 \text{ in}$$

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Donde  $a$  es la dimensión de la garganta, calculada a partir del teorema de *Pitágoras*. La longitud de la oreja será de 13,5 pulgadas.

En lo tocante a la pintura, es éste un elemento importante de protección frente a la corrosión bajo aislamiento, como queda explicado en el capítulo primero del segundo anexo.

Debe calcularse tanto la superficie del casco como la de los cabezales. Se obtiene:

Pintura			
$D_{e,c}$ (in)	240,256	$D_{e,cab}$ (in)	237,970
$H_{tot}$ (in)	2432,157	$t_{cab,pi}$ (in)	0,875
$S_{casco}$ (in <sup>2</sup> )	1835757,368	$S_{cab}$ (in <sup>2</sup> )	45131,211
$e_{capa}$ (in)	0,001	$e_{capa}$ (in)	0,001
$V_{pint,casco}$ (in <sup>3</sup> )	1835,757	$V_{pint,cabezales}$ (in <sup>3</sup> )	90,262
$V_{pint,casco}$ (gal(US))	<b>7,947</b>	$V_{pint,cabezales}$ (gal(US))	<b>0,391</b>
	<b><math>V_{pint,tot}</math> (gal(US))</b>		<b>70,037</b>

Tabla. A4.CVIII. Cálculo de volumen de pintura

Se ha seleccionado un sistema de pinturas siguiendo especificaciones del *Steel Structures Painting Council*, (SSPC). Dicho sistema viene recomendado para ambientes secos, no corrosivos en interior de edificios o protegidos temporalmente contra intemperie. No se han considerado condiciones excesivamente severas, ya que la mayor parte del tiempo la estructura estará guarnecida por el aislamiento y chapa envolvente.

La identificación del sistema viene dada por SSPC-PS 7.01. No obliga al tratamiento previo, (sólo una limpieza de contaminantes superficiales del casco: grasa, tierra, entre otros componentes), y requiere un espesor de pintura seca de una milésima de pulgada, ( $e_{capa}$  en la Tabla A4.CVIII).

El volumen de pintura de cada componente, (casco y cabezales) se ha calculado multiplicando la superficie por el espesor de la

capa de pintura. En el caso de los cabezales, debe multiplicarse por dos el anterior volumen, (a fin de obtener el volumen requerido por los dos cabezales). El volumen final es la suma de los volúmenes del casco y los dos cabezales, convertido a galones estadounidenses, la unidad de referencia de los sistemas SSPC.

El sistema SSPC-PS 7.01 indica aplicar una mano de pintura de taller roja o café, cuyo contenido en sólidos es del 60%. Se exige una capa de pintura de espesor seco de una milésima de pulgada: cuando la pintura se seca, el espesor aplicado merma por la pérdida de volátiles, luego será necesario aumentar la cantidad de pintura aplicada el tanto por ciento correspondiente a los componentes volátiles: 40% para un contenido en sólidos del 60% como se muestra más arriba. El incremento del 40% se aplica multiplicando la suma de los volúmenes de casco y cabezales por 1,4.

Debe incrementarse un 50% la cantidad de pintura requerida en concepto de pérdidas por aplicación, (se trata del factor 1,5 de la última ecuación). Finalmente, el volumen de pintura se multiplica por cuatro, esto es la ecuación (A2.76) no sufre modificación alguna, debido a los cuatro recipientes requeridos por la operación “MÚLTIPLE”.

#### **A4.C2.4. Diseño mecánico de “BINARIA”**

Esta segunda sección se dividirá en varios apartados imbricados en el diseño mecánico de la misma. No se incluirán aspectos como el diseño de la red de tuberías, si bien, se indicarán los diámetros nominales requeridos en las bridas de entrada y salida a la unidad de “BINARIA”. Se remite al lector a la Figura A2.32 del segundo anexo, donde se muestra un esquema de la unidad.

La siguiente tabla resume la información general acerca de las torres que componen “BINARIA”, de forma análoga a como la Tabla A4.I describía las torres de “EXTRACTIVA 1”:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Datos de las torres							
Torre primera		Torre segunda		Torre segunda		Torre tercera	
Agotamiento		Agotamiento		Rectificación		Rectificación	
<b>NPR</b>	71	<b>NPR</b>	5	<b>NPR</b>	67	<b>NPR</b>	72
<b>T (ft)</b>	21,325	<b>T (ft)</b>	22,966	<b>T (ft)</b>	22,966	<b>T (ft)</b>	22,966
<b>t (ft)</b>	2,953	<b>t (ft)</b>	2,953	<b>t (ft)</b>	2,953	<b>t (ft)</b>	2,953
<b>H<sub>L</sub> (ft)</b>	12	<b>H<sub>L</sub> (ft)</b>	12	<b>H<sub>p,s</sub> (ft)</b>	4	<b>H<sub>L</sub> (ft)</b>	12
<b>H<sub>p,s</sub> (ft)</b>	4					<b>H<sub>p,s</sub> (ft)</b>	4

Tabla. A4.CIX. Datos de los cuerpos cilíndricos de las torres de “BINARIA”

En este caso no se prevé reducción por diámetro, ergo todas las torres estarán compuestas por un único casco cilíndrico, cerrado por dos cabezales iguales. Se decide diseñar la torre segunda, por ser ésta más alta, (las medidas entre platos primero y último y cabezales se respetan respecto del capítulo anterior, si bien, la segunda torre se construye con un plato más).

### A4.C2.4.1. Diseño mecánico (I). Determinación de la presión de diseño

Se evitará repetir procedimientos ya mostrados con anterioridad, por lo que se presenta directamente la tabla conteniendo la información concerniente al apartado en cuestión, y se emplaza al lector a la revisión del capítulo primero del presente anexo, donde se proporcionan las expresiones y datos precisos para el cálculo.

Cálculo para P <sub>agua</sub>		Cálculo para P <sub>diseño</sub>	
<b>H (ft)</b>	228,598	<b>P<sub>operación</sub> (atm)</b>	3
<b>T (ft)</b>	22,966	<b>10% P (atm)</b>	0,3
<b>V (m<sup>3</sup>)</b>	2681,478	<b>30 psi (atm)</b>	2,041
<b>S (m<sup>2</sup>)</b>	1532,273	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	<b>76,577</b>
<b>m<sub>agua</sub> (kg)</b>	2681477,507		
<b>p<sub>agua</sub> (N)</b>	26296311,390		
<b>P<sub>agua</sub> (atm)</b>	0,169		

Tabla. A4.CX. Cálculo de la presión de diseño

A4.C2.4.2. Diseño mecánico (II). Determinación de espesores para el casco y los cabezales

Se obtiene para el casco:

Espesor por presión interna	
<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	76,577
<b>S (psi)</b>	17500
<b>E</b>	0,85
<b>R (in) (interior)</b>	137,795
<b>D (in) (interior)</b>	275,590
<b>C.A. (in) (20 años)</b>	0,1
<b>t (in)</b>	<b>0,712</b>
<b>t<sub>c,pi</sub> (in) (20 años)</b>	<b>0,812</b>
<b>P<sub>adm</sub> (psi)</b>	<b>87,400</b>
<b>t<sub>c,circ</sub> (in) (20 años)</b>	<b>0,454</b>

Tabla. A4.CXI. Cálculo del espesor de casco sometido a presión interna

El material seleccionado para el separador es acero al carbono según especificación SA-515 grado 70, por los motivos expuestos en el capítulo anterior. Nuevamente se observa que el régimen longitudinal de esfuerzos predomina sobre el circunferencial y la presión admisible supera la de diseño. Lo que proporciona un espesor comercial:

$$t_{c,pi} = 13/16 \text{ de pulgada (20,64 mm)}$$

Este será el espesor de casco sometido a presión interna, que se empleará en cálculos posteriores.

Los cabezales en este caso son del tipo “Klopper” tal como se recomendó, en el primer capítulo del presente anexo, para una presión de operación inferior a 6,8 atm, por lo que se está a las ecuaciones dadas en el primer capítulo del anexo segundo. Así, se obtiene:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Espesor por presión interna	
<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	76,577
<b>D (in) (interior)</b>	275,590
<b>S (psi)</b>	17500
<b>E</b>	1
<b>M</b>	1,54
<b>C.A. (in) (20 años)</b>	0,1
<b>t (in)</b>	<b>0,929</b>
<b>t<sub>cab,pi</sub> (in) (20 años)</b>	<b>1,029</b>
<b>P<sub>adm</sub> (psi)</b>	<b>82,429</b>

Tabla. A4.CXII. Cálculo del espesor de cabezales sometidos a presión interna

La presión admisible supera la de diseño, por lo que el cálculo es conforme. Así, se toma para cada cabezal el siguiente espesor comercial:

$$t_{cab,pi} = 1-3/16 \text{ de pulgada (30,16 mm)}$$

Según normas de diseño mecánico, el espesor de los cabezales debe ser superior al del casco, a fin de asegurar un cierre adecuado, lo que se verifica a tenor de lo mostrado.

### A4.C2.4.3. Diseño mecánico (III). Determinación del espesor del aislamiento y de la chapa envolvente

Para el caso de temperatura de operación superior a la ambiental, se ha estimado un espesor requerido de 40 mm, frente a 25 mm para temperatura de operación inferior a la ambiente. Por tanto, se toma 40 mm (1,575 in) como espesor requerido de aislamiento.

$$t_{ais} = 40 \text{ mm}$$

El espesor de la envolvente se mantiene respecto del capítulo de diseño mecánico de "SIMPLE". En definitiva, se tiene como espesor de la envolvente de aluminio:

$$t_{env} = 0,61 \text{ mm}$$

Según normas ASTM B 209, incluirá recubrimiento corrosivo a base de papel *kraft* con película de polietileno para protección contra intemperie.

#### A4.C2.4.4. Diseño mecánico (IV). Determinación del espesor final requerido para soportar la carga por viento

En este apartado se presenta una tabla conteniendo los datos relativos a la determinación del espesor por viento, que debe sumarse a la carga por presión interna y sismo. Como se ha mostrado en capítulos previos de diseño mecánico, el procedimiento de cálculo de este requerimiento depende del diámetro externo del recipiente que, al incrementar por la suma de las distintas contribuciones al espesor total del aparato, requiere su evaluación en varios ciclos de cálculo.

Carga por viento (Recalculada)					
Velocidad básica del viento (m/s)		29		(mile/h) 70	
$q_s$ (lb/ft <sup>2</sup> )	13	$C_e$	2,1	$C_q$	0,9
$P_w$ (lb/ft <sup>2</sup> )	24,57	$D_e$ (ft)	23,430	$E$	0,85
$h_T$ (ft)	6,562	$H_{tot}$ (ft)	235,160	$h_1$ (ft)	117,580
$H_{esc}$ (ft lin.)	233,160	$H_{plat}$ (ft lin.)	8	Nº plataformas	8
$V$ (lb)	135377,352	$M$ (lb-ft)	15917676,203	Recipiente	
$V$ (lb)	5728,744	$M$ (lb-ft)	667857,251	Escalera	
$V$ (lb)	196,560	$M$ (lb-ft)	5896,800	$h_{plat,1}$ (ft)	30,000
$V$ (lb)	196,560	$M$ (lb-ft)	11793,600	$h_{plat,2}$ (ft)	60,000
$V$ (lb)	196,560	$M$ (lb-ft)	17690,400	$h_{plat,3}$ (ft)	90,000
$V$ (lb)	196,560	$M$ (lb-ft)	23587,200	$h_{plat,4}$ (ft)	120,000
$V$ (lb)	196,560	$M$ (lb-ft)	29484,000	$h_{plat,5}$ (ft)	150,000
$V$ (lb)	196,560	$M$ (lb-ft)	35380,800	$h_{plat,6}$ (ft)	180,000
$V$ (lb)	196,560	$M$ (lb-ft)	41277,600	$h_{plat,7}$ (ft)	210,000
$V$ (lb)	196,560	$M$ (lb-ft)	45829,950	$h_{plat,8}$ (ft)	233,160
$V$ (lb)	142678,576	$M$ (lb-ft)	16796473,804	Total	
$M_T$ (lb-ft)	15872655,845	$R_m$ (in)	139,188	$S$ (lb/in <sup>2</sup> )	17500
		$t$ (in)	0,210		

Tabla. A4.CXIII. Cálculo del espesor final requerido para la carga por viento

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

En este caso se presenta directamente la contribución final convergida. En la Tabla A4.CXIII aparecen también datos de interés como el número de plataformas instaladas, (estando la primera, quinta y octava a la altura de las bocas de hombre), o la presión del viento calculada para un recipiente comprendido entre 200 y 250 ft de altura, (véase Tabla A2.XXXVII).

### A4.C2.4.5. Diseño mecánico (V). Determinación del espesor final requerido para soportar la carga sísmica

De nuevo se presenta la solución convergida para el espesor resistente a carga sísmica.

<b>Carga sísmica (Recalculada)</b>					
<b>Z</b>	0,375	<b>I</b>	1	<b>K</b>	2
<b>H<sub>tot</sub> (ft)</b>	235,160	<b>D<sub>e</sub> (ft)</b>	23,430	<b>t<sub>faldón</sub> (1-3/16 in)</b>	1,1875
<b>w (lb/ft)</b>	30387,117	<b>T (s)</b>	2,067	<b>C (obtenido)</b>	0,046
<b>C (tomado)</b>	0,046	<b>S</b>	1,5	<b>W (lb)</b>	7145837,706
<b>V (lb)</b>	372774,991	<b>0,25V (lb)</b>	93193,747	<b>F<sub>t</sub> (lb)</b>	53936,169
<b>M (lb·ft)</b>	62669082,480	<b>M<sub>T</sub> (lb·ft)</b>	1748657,375	<b>R<sub>m</sub> (in)</b>	139,188
<b>S (psi)</b>	17500	<b>E</b>	0,85	<b>t<sub>c,s</sub> (in)</b>	<b>0,023</b>

Tabla. A4.CXIV. Cálculo del espesor final requerido para la carga por sismo

Donde se ha introducido el espesor final del faldón, a la sazón:

$$t_{\text{faldón}} = 1-3/16 \text{ de pulgada (30,16 mm)}$$

### A4.C2.4.6. Diseño mecánico (VI). Determinación del peso final del aparato en operación

Se excusa referir el procedimiento íntegro de cálculo y se emplaza al lector a la revisión del capítulo primero del segundo anexo, de donde son aplicables todas las ecuaciones referidas.

Sea la siguiente tabla-resumen:

Peso del separador (Recalculado)					
$m_{\text{casco}} \text{ (lb)}$	802531,670	$m_{\text{cabezales}} \text{ (lb)}$	34076,845	$m_{\text{envolvente}} \text{ (lb)}$	5702,272
$m_{\text{aislamiento}} \text{ (lb)}$	8908,896	$m_{\text{platos}} \text{ (lb)}$	183306,924	$m_{\text{armado}} \text{ (lb)}$	1050468,324
$m_{\text{agua,rec}} \text{ (lb)}$	6055341,089	$m_{\text{rec, op}} \text{ (lb)}$	7105809,413	$m_{\text{faldón}} \text{ (lb)}$	23301,971
		$m_{\text{sep,op}} \text{ (lb)}$	7145837,706		

Tabla. A4.CXV. Estimación del peso final del aparato en operación

El peso de armado es la suma de los que le preceden, mientras que el peso  $m_{\text{rec, op}}$  incluye el peso de armado y líquido. Finalmente,  $m_{\text{sep, op}}$  suma al anterior el peso del faldón, así como de las tubuladuras y refuerzos que corresponden a la torre primera, (que incluye una brida más por ser el recipiente que recibe la alimentación), y el anillo de la base. Los espesores finales de los cuerpos del recipiente son los que siguen:

$$t_{c,pi+w+s} = 1-3/16 \text{ de pulgada (30,16 mm)}$$

$$t_{cab,pi} = 1-1/4 \text{ de pulgada (31,75 mm)}$$

Estos espesores son el resultado de sumar las contribuciones de presión interna, viento y sismo en el caso del casco, y de aumentar en una fracción comercial el espesor atendiendo a normas, para el caso de los cabezales.

#### A4.C2.4.7. Diseño mecánico (VII). Diseño final del anillo de la base

Se presenta seguidamente la tabla-resumen de la solución convergida para el cálculo del anillo de la base.

Diseño del anillo de la base (Recalculado)					
$S_B \text{ (psi)}$	14835,904	$S_1 \text{ (psi)}$	1761,417	$S_2 \text{ (psi)}$	17120,980
$l_2 \text{ (in)}$	5	$l_3 \text{ (in)}$	4	$N$	48
$D_{\text{pernos}} \text{ (in)}$	5	$t_B \text{ (in)}$	5	$m_B \text{ (lb)}$	14338,421

Tabla. A4.CXVI. Dimensiones y comprobaciones finales del anillo de la base

El material de construcción del anillo de la base será acero al carbono según SA-285 grado C ya que pese a ser el esfuerzo máximo permitido por el material de 13800 psi a la temperatura de operación, (véase apartados anteriores), *Megyesy* señala un valor de 18000 psi como esfuerzo máximo permisible para el anillo de la base. Así, los esfuerzos  $S_1$  y  $S_2$  cumplen con el requerimiento mecánico, por lo que la solución encontrada es conforme. El esfuerzo  $S_B$  máximo permisible para los pernos (según SA-325) es de 15000 psi.

#### A4.C2.4.8. Diseño mecánico (VIII). Cálculo de las tubuladuras y refuerzos

La estimación del peso de las bridas asociadas al recipiente requiere el dimensionado de las tuberías de la alimentación, de descarga del líquido y del vapor y de carga de vapor y de líquido. El método de cálculo se explicó convenientemente en el capítulo primero del presente anexo, por lo que se omite su repetición.

Conocidas las velocidades óptimas y los caudales volumétricos, puede encontrarse el radio interno para las conducciones. Debe recordarse que el diseño de la columna segunda, por ser la más alta, está procurando, hasta este punto, las características esenciales de los recipientes que constituyen "BINARIA". Para el caso de las tubuladuras se considerará también la torre segunda, pues esta dispone una brida adicional correspondiente a la conducción de alimentación.

Sin perjuicio de lo antedicho, se requieren las siguientes tuberías para ambas columnas:

- Conducción general de alimentación a temperatura de operación: Transporta el destilado de "MÚLTIPLE", de carga a "BINARIA", a su temperatura de operación y una presión de 3,5 atm para compensar las pérdidas de carga a su trasiego por columna. Procede del cambiador E-25 que aumenta la temperatura a la que procede de la operación anterior, por

requerimientos de diseño. Se divide en tres ramales que alimentan sendos trenes de "BINARIA".

- Ramales de alimentación a "BINARIA": Trasiegan un tercio del caudal de la conducción general de alimentación. Las condiciones de presión y temperatura no difieren.
- Conducción de descarga de fondo de primera columna: La presión es la de operación: 3 atm.
- Conducción de carga de vapor recirculado a primera columna: Procede del rehervidor. A presión de operación: 3 atm.
- Conducción de descarga de vapor de primera columna: Es la misma conducción de carga a segunda columna. A presión de operación: 3 atm.
- Conducción de recirculación de líquido de segunda a primera columna: Es la misma conducción de descarga de fondo de la segunda columna. A 4,5 atm para compensar pérdidas.
- Conducción de recirculación de líquido de tercera a segunda columna: Es la misma conducción de descarga de fondo de la tercera columna. A 4,5 atm para compensar pérdidas.
- Conducción de descarga de vapor de segunda columna: Es la misma conducción de carga a tercera columna. A presión de operación: 3 atm.
- Conducción de descarga de vapor de tercera columna: A presión de operación: 3 atm.
- Conducción de recirculación de líquido a tercera columna: Procede del acumulador de reflujo. A 4,5 atm para compensar pérdidas.

Las pérdidas de carga del líquido por plato se estiman multiplicando el nivel de líquido en plato, (véanse apartados de pérdidas de carga en el anexo previo) por la aceleración de la gravedad, y la mayor densidad de la columna como criterio conservador. Multiplicando por el número de platos se obtiene la pérdida de carga en unidades de presión, tal como se indicó en el capítulo anterior. Otro tanto puede realizarse con las corrientes de vapor, si bien la caída de presión es despreciable, (apenas unos milímetros de mercurio).

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

A continuación se presenta el cálculo de la presión de diseño de cada tubería, y se tabulan los resultados que permitirán establecer las especificaciones del sistema de tuberías asociado a “BINARIA”.

Cálculo de las conducciones: P-145					
<b>P (psi)</b>	51,436	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	81,436	<b>S (psi)</b>	15000
<b>G (Mmol/año)</b>	6251,148	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	0,011	<b>G (ft<sup>3</sup>/s)</b>	0,626
<b>A<sub>i,tubo</sub> (ft<sup>2</sup>)</b>	0,053	<b>R<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	1,565	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,110	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	1007,825	<b>D<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	<b>3,131</b>

Tabla. A4.CXVII. Estimación del tamaño de la conducción general de alimentación a temperatura de operación

Cálculo de las conducciones: P-87, P-88 y P-89					
<b>P (psi)</b>	51,436	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	81,436	<b>S (psi)</b>	15000
<b>G/3 (Mmol/año)</b>	2083,716	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	0,011	<b>G/3 (ft<sup>3</sup>/s)</b>	0,209
<b>A<sub>i,tubo</sub> (ft<sup>2</sup>)</b>	0,018	<b>R<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	0,904	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,106	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	1636,950	<b>D<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	<b>1,808</b>

Tabla. A4.CXVIII. Estimación del tamaño de los ramales de alimentación a “BINARIA”

Cálculo de las conducciones: P-90, P-102 y P-116					
<b>P (psi)</b>	44,088	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	74,088	<b>S (psi)</b>	15000
<b>L' (Mmol/año)</b>	25118,160	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	0,011	<b>L' (ft<sup>3</sup>/s)</b>	2,474
<b>A<sub>i,tubo</sub> (ft<sup>2</sup>)</b>	0,219	<b>R<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	3,168	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,118	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	544,950	<b>D<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	<b>6,336</b>

Tabla. A4.CXIX. Estimación del tamaño de la conducción de descarga de fondo de primera columna

Cálculo de las conducciones: P-91, P-103 y P-117					
<b>P (psi)</b>	44,088	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	74,088	<b>S (psi)</b>	15000
<b>V' (Mmol/año)</b>	23504,535	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	1,313·10 <sup>-4</sup>	<b>V' (ft<sup>3</sup>/s)</b>	200,448
<b>A<sub>i,tubo</sub> (ft<sup>2</sup>)</b>	4,662	<b>R<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	14,618	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,181	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	184,837	<b>D<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	<b>29,235</b>

Tabla. A4.CXX. Estimación del tamaño de la conducción de carga de vapor recirculado a primera columna

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Cálculo de las conducciones: P-93, P-105 y P-119					
<b>P (psi)</b>	44,088	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	74,088	<b>S (psi)</b>	15000
<b>V' (Mmol/año)</b>	23504,535	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	$9,027 \cdot 10^{-5}$	<b>V' (ft<sup>3</sup>/s)</b>	291,576
<b>A<sub>i,tubo</sub> (ft<sup>2</sup>)</b>	4,703	<b>R<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	14,682	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,182	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	184,392	<b>D<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	<b>29,364</b>

Tabla. A4.CXXI. Estimación del tamaño de la conducción de descarga de vapor de primera columna

Cálculo de las conducciones: P-92, P-104 y P-118					
<b>P (psi)</b>	66,132	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	96,132	<b>S (psi)</b>	15000
<b>L' (Mmol/año)</b>	25118,160	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	0,011	<b>L' (ft<sup>3</sup>/s)</b>	2,513
<b>A<sub>i,tubo</sub> (ft<sup>2</sup>)</b>	0,215	<b>R<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	3,138	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,123	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	573,155	<b>D<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	<b>6,276</b>

Tabla. A4.CXXII. Estimación del tamaño de la conducción de recirculación de líquido de segunda a primera columna

Cálculo de las conducciones: P-94, P-106 y P-120					
<b>P (psi)</b>	66,132	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	96,132	<b>S (psi)</b>	15000
<b>L (Mmol/año)</b>	23034,444	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	0,011	<b>L (ft<sup>3</sup>/s)</b>	2,375
<b>A<sub>i,tubo</sub> (ft<sup>2</sup>)</b>	0,201	<b>R<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	3,035	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,122	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	588,579	<b>D<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	<b>6,070</b>

Tabla. A4.CXXIII. Estimación del tamaño de la conducción de recirculación de líquido de tercera a segunda columna

Cálculo de las conducciones: P-95, P-107 y P-121					
<b>P (psi)</b>	44,088	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	74,088	<b>S (psi)</b>	15000
<b>V (Mmol/año)</b>	23504,535	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	$8,578 \cdot 10^{-5}$	<b>V (ft<sup>3</sup>/s)</b>	306,847
<b>A<sub>i,tubo</sub> (ft<sup>2</sup>)</b>	4,649	<b>R<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	14,598	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,181	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	184,971	<b>D<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	<b>29,196</b>

Tabla. A4.CXXIV. Estimación del tamaño de la conducción de descarga de vapor de segunda columna

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Cálculo de las conducciones: P-96, P-108 y P-122					
<b>P (psi)</b>	44,088	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	74,088	<b>S (psi)</b>	15000
<b>V (Mmol/año)</b>	23504,535	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	$8,129 \cdot 10^{-5}$	<b>V (ft<sup>3</sup>/s)</b>	323,806
<b>A<sub>i,tubo</sub> (ft<sup>2</sup>)</b>	4,693	<b>R<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	14,666	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,182	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	184,499	<b>D<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	<b>29,333</b>

Tabla. A4.CXXV. Estimación del tamaño de la conducción de descarga de vapor de tercera columna

Cálculo de las conducciones: P-99, P-111 y P-125					
<b>P (psi)</b>	66,132	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	96,132	<b>S (psi)</b>	15000
<b>L (Mmol/año)</b>	23034,444	<b><math>\rho</math> (mol/cm<sup>3</sup>)</b>	0,011	<b>L (ft<sup>3</sup>/s)</b>	2,449
<b>A<sub>i,tubo</sub> (ft<sup>2</sup>)</b>	0,205	<b>R<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	3,067	<b>E</b>	1
<b>t (in)</b>	0,122	<b>P<sub>máx</sub> (psi)</b>	583,635	<b>D<sub>i,tubo</sub> (in)</b>	<b>6,135</b>

Tabla. A4.CXXVI. Estimación del tamaño de la conducción de recirculación de líquido a tercera columna

En el título de cada tabla de conducciones se indica la denominación correspondiente, tal como figura en el plano que muestra el diagrama de flujo del proceso. Las conducciones se dan por duplicado, puesto que se tienen dos trenes idénticos de separación.

Con las conducciones conocidas, resta sumar el peso de las bridas correspondientes. Para el diseño en cuestión, se supondrá que cada recipiente contará con una brida de alimentación de diámetro nominal de 2 in, una brida de descarga de líquido de 6 in y otra de descarga de vapor de 30 in. A lo que deben añadirse la brida de carga de vapor, de 30 in y la de recirculación de líquido, de 6 in.

Todas las bridas se construirán en acero forjado según especificación SA-105; se clasifican por su clase de presión o, en inglés, “rating”, expresadas en psi. La clase inferior de bridas, para servicios a baja presión como los requeridos para el presente diseño es de 150 psi ó 150#, como se nota técnicamente.

Para la clase de presión seleccionada, *Megyesy* proporciona una tabla de pesos de bridas, según diámetro nominal de las conducciones embridadas y tipo de brida. De dicha tabla se toman los pesos mostrados en la Tabla A4.CXXVII, para bridas de la clase 150# de tipo cuello soldable, según los distintos diámetros nominales de tubo asociado. La mencionada tabla de pesos, tomada de *Megyesy* se presentó al final del capítulo primero del segundo anexo.

Las bridas de cuello soldable son las más extensamente utilizadas en la industria petroquímica, para líneas de proceso. Esta aplicación se denomina de responsabilidad. Por ello, se seleccionan, para las tubuladuras de entrada y salida de corrientes, este tipo de bridas.

Las bridas se sueldan a un tubo de longitud determinada por normas, (según las dimensiones de las mismas) y, por forzar la pérdida de material al insertarse en el casco o cabezales del recipiente, pueden requerir refuerzo: aquéllas conducciones de 3 pulgadas, o menor espesor, introducidas en casco o cabezal de espesor de 3/8 de pulgada, o menos, no requieren refuerzo según normas *ASME*.

Se emplearán bridas de cuello soldable introducidas en el casco, (bridas de alimentación, carga de vapor y recirculación de líquido), y cabezales, (brida de descarga de líquido y de descarga de vapor), con la mínima extensión para soldar y sobresaliendo, del casco una determinada longitud según normas. Esto obliga a soldar un tramo recto de tubería, que complemente la longitud de las bridas, tabulada en *Megyesy* y transcritas en las figuras finales del primer capítulo del anexo segundo, de modo tal que la longitud sobresaliente de la brida y el tramo de tubo sea conforme a las normas, también transcrita en el capítulo citado.

El peso de los tubos debe añadirse al nominal de la brida en la Tabla A4.CXXVII, multiplicando las longitudes correspondientes por el peso por pie de tubería, también proporcionado por *Megyesy*. Las dimensiones de las bridas, del tramo de tubo y el su peso por unidad

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

de longitud, se proporcionan en sendas figuras al final del capítulo primero del anexo segundo como queda indicado.

Con lo antedicho y las dimensiones tomadas de las figuras indicadas, se recopila y calculan los siguientes pesos de las tubuladuras:

<b>Peso de las tubuladuras</b>			
<b>Bridas (2" Sch 10)</b>		<b>Bridas (6" Sch 10)</b>	
$W_{\text{brida } 150\#, 2"} \text{ (lb)}$	6	$W_{\text{brida } 150\#, 6"} \text{ (lb)}$	24
<b>Tubo 2", Sch 10 (ft)</b>	0,292	<b>Tubo 6", Sch 10 (ft)</b>	0,375
$W_{\text{tubo } 2", \text{ Sch } 10} \text{ (lb/ft)}$	3,53	$W_{\text{tubo } 6", \text{ Sch } 10} \text{ (lb/ft)}$	9,29
$W_{\text{tub } 2"} \text{ (lb)}$	7,065	$W_{\text{tub } 6"} \text{ (lb)}$	27,484
<b>Bridas (30" Sch 10)</b>			
$W_{\text{brida } 150\#, 30"} \text{ (lb)}$	375		
<b>Tubo 30", Sch 10 (ft)</b>	0,406		
$W_{\text{tubo } 30", \text{ Sch } 10} \text{ (lb/ft)}$	99		
$W_{\text{tub } 30"} \text{ (lb)}$	415,219		
$m_{\text{bridas}} \text{ (lb)}$	<b>892,470</b>		

Tabla. A4.CXXVII. Peso de las tubuladuras

Donde los pesos  $W_{\text{brida } 150\#, \text{ DN}}$  son los pesos de brida de la categoría de 150 psi, correspondientes a los distintos diámetros nominales de las tuberías calculadas.

Las magnitudes "Tubo DN, Sch" incluyen las longitudes de los tramos de tubería soldados a las bridas, debidamente convertidas.

Los valores  $W_{\text{tubo DN, Sch}}$  recogen el peso por pie de las distintas tuberías según su número de *Schedule* y diámetro nominal. Este peso se multiplica por la longitud de la tubería, de la fila previa, y se suma al peso de las bridas obteniéndose los pesos  $W_{\text{tub DN}}$ , el peso de las tubuladuras de distintos diámetros nominales.

Finalmente, el peso total,  $m_{\text{bridas}}$ , es la suma de los pesos individuales de las tubuladuras. A la sazón suman dos bridas de 30 in, (carga y descarga de vapor), dos de 6 in Sch 10 (recirculación de líquido de segunda a primera columna y descarga de líquido) y una

última de 2 in (alimentación), como corresponde a la primera columna.

Por mor de lo indicado procede reforzar todas las bridas, ya que su diámetro nominal supera las 3 pulgadas o, en todo caso, el espesor del casco o cabezales es superior a 3/8 de pulgada, (1-3/16 de pulgada y 1-1/4 de pulgada respectivamente).

El refuerzo para las bridas consiste en un anillo que debe reponer la cantidad de metal eliminado por la abertura del, casco o cabezales, al perforarlo. El anillo de refuerzo se construye del mismo material que el casco y cabezales, (acero al carbono según especificación SA-515 grado 70).

La Figura A2.13, del segundo anexo, muestra el dibujo esquemático y dimensiones asociadas al anillo de refuerzo.

<b>Cálculo de anillos de refuerzo</b>					
<b>Tuberías de 6" Sch 10</b>					
<b>d (in)</b>	6,357	<b>t<sub>r</sub> (in)</b>	1,1875	<b>A<sub>ref</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	7,549
<b>t<sub>ref</sub> (in)</b>	1,1875	<b>a<sub>ref</sub> (in)</b>	3,178	<b>d<sub>i</sub> (in)</b>	6,625
<b>d<sub>o</sub> (in)</b>	12,982	<b>m<sub>ref</sub> (lb)</b>	<b>32,937</b>	<b>m<sub>ref</sub> (lb)</b>	<b>34,670</b>
<b>Tuberías de 30" Sch 10</b>					
<b>d (in)</b>	29,376	<b>t<sub>r</sub> (in)</b>	1,1875	<b>A<sub>ref</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	34,884
<b>t<sub>ref</sub> (in)</b>	1,1875	<b>a<sub>ref</sub> (in)</b>	14,688	<b>d<sub>i</sub> (in)</b>	30
<b>d<sub>o</sub> (in)</b>	59,376	<b>m<sub>ref</sub> (lb)</b>	<b>693,792</b>	<b>m<sub>ref</sub> (lb)</b>	<b>730,308</b>
<b>Tuberías de 2" Sch 10</b>					
<b>d (in)</b>	2,067	<b>t<sub>r</sub> (in)</b>	1,1875	<b>A<sub>ref</sub> (in<sup>2</sup>)</b>	2,454
<b>t<sub>ref</sub> (in)</b>	1,1875	<b>a<sub>ref</sub> (in)</b>	1,034	<b>d<sub>i</sub> (in)</b>	2,375
	<b>d<sub>o</sub> (in)</b>	4,442	<b>m<sub>ref</sub> (lb)</b>	<b>3,723</b>	

Tabla. A4.CXXVIII. Dimensiones y peso de los anillos de refuerzo

El área transversal del anillo,  $A_{ref}$ , viene dada por la ecuación (A2.63) y las consideraciones efectuadas en el capítulo primero del anexo segundo siguen siendo válidas. Las dimensiones del refuerzo se calculan, a partir de la anterior ecuación, mediante (A2.64) y su peso, mediante (A2.65). Con lo anterior se obtienen los refuerzos mostrados en la Tabla A4.CXXVIII, donde en aquéllos que se han presentado dos valores de peso, el segundo corresponde al del anillo

de refuerzo de una brida insertada en el cuerpo de mayor espesor, esto es, un cabezal.

En cada refuerzo, se ha tomado bien el espesor del casco, bien el del cabezal, según corresponda al cuerpo en el que se inserta la brida. El peso de los refuerzos, los que corresponden a las bridas indicadas previamente, ya se incluyó en el del separador apartados atrás, así como el de las bridas.

#### A4.C2.4.9. Diseño mecánico (IX). Comprobaciones

El diseño mecánico concluye, una vez dimensionados todos los elementos estructurales, con la constatación de que todos los esfuerzos, ocasionados por las distintas cargas, no superan el máximo tolerable por el material.

Además debe comprobarse si el período fundamental de vibración encontrado supera al permitido. Lo mismo se efectuará para la deflexión del recipiente.

Se considerarán los siguientes esfuerzos:

- Presión interna,  $S_i$ .
- Viento,  $S_w$ .
- Peso en montaje,  $S_{vac}$ .
- Peso en operación,  $S_{op}$ .
- Carga sísmica,  $S_s$ .

Las ecuaciones se mostraron en el anexo segundo, (A2.69), y las consideraciones establecidas en dicho punto continúan siendo válidas. Se tiene:

Comprobaciones							
<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>	76,577	<b>D<sub>e</sub> (in)</b>	281,163	<b>t<sub>e</sub> (in)</b>	2,786	<b>S<sub>pi</sub> (psi)</b>	<b>1931,815</b>
<b>M<sub>T</sub> (lb·ft)</b>	15872655,845	<b>R<sub>m</sub> (in)</b>	139,188	<b>t<sub>e</sub> (in)</b>	2,786	<b>S<sub>w</sub> (psi)</b>	<b>1123,166</b>
<b>m<sub>armado</sub> (lb)</b>	1050468,324	<b>C<sub>m</sub> (in)</b>	869,524	<b>t<sub>e</sub> (in)</b>	2,786	<b>S<sub>vac</sub> (psi)</b>	<b>433,581</b>
<b>m<sub>rec,op</sub> (lb)</b>	7105809,413	<b>C<sub>m</sub> (in)</b>	869,524	<b>t<sub>e</sub> (in)</b>	2,786	<b>S<sub>op</sub> (psi)</b>	<b>2932,927</b>
<b>M<sub>T</sub> (lb·ft)</b>	1748657,375	<b>R<sub>m</sub> (in)</b>	139,188	<b>t<sub>e</sub> (in)</b>	2,786	<b>S<sub>s</sub> (psi)</b>	<b>123,737</b>

Tabla. A4.CXXIX. Comprobación de esfuerzos

Ninguna sollicitación supera el esfuerzo máximo admisible por el material, (S = 17500 psi para acero al carbono según SA-515 grado 70).

Se verifica seguidamente si el período de vibración, tabulado en A4.CXIV, supera al permisible, T<sub>a</sub>. Éste último se calcula según la ecuación (A2.71) y las consideraciones descritas en el capítulo primero del anexo segundo. Se tiene:

Comprobaciones							
<b>m<sub>sep,op</sub> (lb)</b>	7145837,706	<b>H<sub>tot</sub> (ft)</b>	235,160	<b>V (lb)</b>	372774,992	<b>T<sub>a</sub> (s)</b>	<b>9,466</b>

Tabla. A4.CXXX. Comprobación de vibración

Por comparación con el período de vibración recalculado, se comprueba que el problema de vibración excesiva no sucede en las torres diseñadas.

Por último, se verifica la deflexión del recipiente. Cuando actúa una carga de viento sobre un recipiente es de esperar una cierta deformación o deflexión, Δ<sub>m</sub>, (véase la Figura A2.14), tanto mayor cuanto más se eleve sobre el nivel del suelo y mayor sea la relación de longitud a diámetro. Debe comprobarse que ésta no supera 6 pulgadas cada 100 pies de altura. Es de aplicación la ecuación (A2.72) y las consideraciones que se establecieron en el capítulo primero del anexo segundo. Así, se tiene:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Comprobaciones							
$P_w$ (lb/ft <sup>2</sup> )	24,57	$D_e$ (ft)	23,430	$H_{tot}$ (ft)	235,160	$R$ (in)	139,188
$t_{faldón}$ (in)	1,1875	$I$ (in <sup>4</sup> )	10059883,392	$E$ (lb/in <sup>2</sup> )	$29,3 \cdot 10^6$	$\Delta_m$ (in)	1,290
		$\Delta_{m,perm}$ (in)		14,110			

Tabla. A4.CXXXI. Comprobación de deflexión

La deflexión máxima permitida,  $\Delta_{m,perm}$ , se calcula multiplicando la altura total por 6 pulgadas y dividiendo por 100 pies de altura. Como se puede comprobar, la deflexión de los recipientes es despreciable. El dato de módulo de elasticidad, tomado de *Megyesy*, se justifica en la composición de la aleación SA-515 grado 70 que, según especificaciones comerciales contiene un 0,31% en carbono.

Este apartado cierra el diseño mecánico, puesto que los espesores encontrados para cada elemento estructural, son coherentes con el peso y el esfuerzo a que se somete. El siguiente apartado incluye el cálculo de las orejas de izado de los recipientes vacíos, así como del volumen de pintura requerido.

### A4.C2.4.10. Cálculo de orejas de izado y pintado del casco y cabezales

Los recipientes debe construirse incluyendo al menos un par de orejas de izado: eslabones atornillados a una base, con forma de oreja, soldada al casco, tal como muestra la Figura A2.15.

Cálculo de las orejas de izado					
$S$ (psi)	17500	$W$ (lb)	90874,718	$D$ (in)	3,25
$D_1$ (in)	3,375	$B$ (in)	5,875	$E$ (in)	9,74
		$t$ (in)	0,620		

Tabla. A4.CXXXII. Dimensiones de las orejas de izado

Para el cálculo del espesor de la oreja, *Megyesy* sugiere la ecuación (A2.74). Las consideraciones efectuadas en el anexo segundo continúan siendo válidas.

Se ha tabulado, en la Tabla A4.CXXXII, las dimensiones  $D$ , el diámetro del perno,  $D_1$  el diámetro del agujero de la oreja,  $B$ , el tamaño del borde cortado a cizalla y el brazo del momento  $E$ , para una carga máxima de 97000 lb. La tabla de dimensiones mínimas de las orejas se proporcionó parcialmente en el anexo segundo. En el capítulo previo figura completa en sus últimas páginas.

Puesto que el separador es muy pesado deberá dividirse en varias partes susceptibles de ser elevadas por las orejas instaladas. Se preverá la división en 12 partes iguales con vistas a su construcción.

El espesor de las orejas se redondea a  $5/8$  in. La soldadura se practica directamente al casco, (que también debe incluir clips de sujeción para el aislamiento y la chapa envolvente). Para la dimensión de la soldadura se considera la tabla mostrada por la Figura A2.17.

Dado que el espesor de la placa más gruesa, (a la sazón el casco, cuyo espesor corresponde a  $1-3/16$  de pulgada frente a la oreja de  $5/8$  de pulgada), el tamaño de la soldadura de filete, o angular, será de  $3/8$  de pulgada. Esta dimensión corresponde al cateto del triángulo rectángulo isósceles mayor que puede inscribirse en el cordón.

Según normas, la longitud de la unión debe estar comprendida entre 15 y 60 veces el tamaño de la garganta, (la hipotenusa correspondiente al triángulo anterior). Así, se tiene:

$$l_{sold}(\text{in}) = 30 \cdot a(\text{in}) = 30 \cdot \sqrt{(3/8)^2 + (3/8)^2} \cong 16 \text{ in}$$

Donde  $a$  es la dimensión de la garganta, calculada a partir del teorema de *Pitágoras*. La longitud de la oreja será de 16 pulgadas.

En lo tocante a la pintura, es éste un elemento importante de protección frente a la corrosión bajo aislamiento, como queda explicado en el capítulo primero del segundo anexo.

Debe calcularse tanto la superficie del casco como la de los cabezales. Se obtiene:

Pintura			
$D_{e,c}$ (in)	281,163	$D_{e,cab}$ (in)	278,090
$H_{tot}$ (in)	2821,921	$t_{cab,pi}$ (in)	1,25
$S_{casco}$ (in <sup>2</sup> )	2492603,638	$S_{cab}$ (in <sup>2</sup> )	61830,319
$e_{capa}$ (in)	0,001	$e_{capa}$ (in)	0,001
$V_{pint,casco}$ (in <sup>3</sup> )	2492,604	$V_{pint,cabezales}$ (in <sup>3</sup> )	123,661
$V_{pint,casco}$ (gal(US))	10,790	$V_{pint,cabezales}$ (gal(US))	0,535
$V_{pint,tot}$ (gal(US))	214,058		

Tabla. A4.CXXXIII. Cálculo de volumen de pintura

Se ha seleccionado un sistema de pinturas siguiendo especificaciones del *Steel Structures Painting Council*, (SSPC). Dicho sistema viene recomendado para ambientes secos, no corrosivos en interior de edificios o protegidos temporalmente contra intemperie. No se han considerado condiciones excesivamente severas, ya que la mayor parte del tiempo la estructura estará guarnecida por el aislamiento y chapa envolvente.

La identificación del sistema viene dada por SSPC-PS 7.01.No obliga al tratamiento previo, (sólo una limpieza de contaminantes superficiales del casco: grasa, tierra, entre otros componentes), y requiere un espesor de pintura seca de una milésima de pulgada, ( $e_{capa}$  en la Tabla A4.CXXXIII).

El volumen de pintura de cada componente, (casco y cabezales) se ha calculado multiplicando la superficie por el espesor de la capa de pintura. En el caso de los cabezales, debe multiplicarse por dos el anterior volumen, (a fin de obtener el volumen requerido por los dos cabezales). El volumen final es la suma de los volúmenes del

casco y los dos cabezales, convertido a galones estadounidenses, la unidad de referencia de los sistemas SSPC.

El sistema SSPC-PS 7.01 indica aplicar una mano de pintura de taller roja o café, cuyo contenido en sólidos es del 60%. Se exige una capa de pintura de espesor seco de una milésima de pulgada: cuando la pintura se seca, el espesor aplicado merma por la pérdida de volátiles, luego será necesario aumentar la cantidad de pintura aplicada el tanto por ciento correspondiente a los componentes volátiles: 40% para un contenido en sólidos del 60% como se muestra más arriba. El incremento del 40% se aplica multiplicando la suma de los volúmenes de casco y cabezales por 1,4.

Debe incrementarse un 50% la cantidad de pintura requerida en concepto de pérdidas por aplicación, (se trata del factor 1,5 de la última ecuación). Finalmente, el volumen de pintura se multiplica por nueve, lo que deberá modificarse de la ecuación (A2.76), debido a los nueve recipientes requeridos por la operación "BINARIA".



# Documento 1. Memoria

---

## Anexo 5. Diseño de unidades auxiliares

1. Red de tuberías y bombeo
2. Diseño de acumuladores de reflujo
3. Estimación de cambiadores de calor
4. Dimensionado de tanques



---

## **Capítulo A5.C1. Red de tuberías y bombeo**

### **A5.C1.1. Planteamiento general**

El capítulo de diseño de la red de tuberías está ligado de forma sustancial a la disposición en terreno de la planta, cuyos rudimentos se presentaron en la memoria descriptiva. El emplazamiento en campo de los equipos determina las distancias entre los mismos y, por ende, dimensiona la red básica de tuberías.

Dentro del objeto del presente PFC, no figura llevar a cabo el planteamiento completo de una red de tuberías, que incluiría no sólo su dimensionamiento, sino un estudio mecánico profundo y una disposición en planta acorde con tal estudio. No puede ser objeto del PFC por dos razones fundamentales: en primer lugar porque, como se estableció convenientemente en el capítulo introductorio de la memoria descriptiva, el objeto del PFC es servir de pre-ingeniería básica de la planta proyectada y, en segundo lugar, justificando lo anterior, porque un diseño en detalle de la red de tuberías constituiría el objeto de un proyecto aparte a distintos niveles, (desde la ingeniería básica hasta el detalle de líneas completas de tuberías, incluyendo el estudio de accesorios y control).

De esta forma, el planteamiento general consistirá en proveer de los datos suficientes el sistema de tuberías, de modo que puedan seleccionarse los equipos de impulsión pertinentes y así poder establecer un presupuesto lo más certero posible, que justifique la viabilidad de un estudio de ingeniería más profundo sobre la planta proyectada.

Por tanto, será objeto del presente estudio la determinación de los siguientes parámetros:

- Longitud de las conducciones.
- Pérdida de carga por fricción.
- Carga de altura.

- Carga de presión.
- Pérdida total de carga.
- Potencia de bombeo estimada.

En resumen, el presente capítulo se dedicará a garantizar el correcto flujo de fluidos a través de conducciones, relegando la disposición en *rack* de las mismas a un estudio más detallado, (que profundice en el control automático del flujo y disposición de los accesorios en tuberías), ante un eventual desarrollo del presente PFC.

### **A5.C1.2. Descripción teórica**

Antes de presentar los datos, se hace precisa una visión, cuando menos de soslayo, de las principales características del estudio llevado a cabo. Para ello, se discutirá cada uno de los guiones de la sección anterior.

#### **A5.C1.2.1. Longitud de las conducciones**

En base al plano segundo, de distribución en planta, los equipos de proceso se situarán en parcelas colindantes respetando las distancias mínimas entre equipos, según especificación *CEPSA* (ESP-0200-1). Separados por un carril, sobre el que se dispone el *rack* de tuberías, se encuentran los tanques de proceso ubicados en el centro de sus respectivos cubetos.

Las distancias que marca la especificación determinarán la longitud de las conducciones. Al disponer 146 líneas de tuberías, no se justificará la longitud tomada de todas ellas, sino que se participará el siguiente ejemplo para la tubería P-10, a la sazón ramal de descarga de líquido de los separadores gas-líquido de la operación "SIMPLE".

Como se verá en las tablas de resultados que se mostrarán en la siguiente sección, para cada ramal P-10 se ha seleccionado una longitud de tubería de 15,5 m. Se trata del ramal de descarga de líquido del separador S-1.

Sobre el plano segundo, en la parcela de "SIMPLE", se observan los cuatro separadores, siendo S-1 el de la esquina superior izquierda, S-2 el que se encuentra a su derecha, S-3 bajo S-1 y, lo mismo, S-4 bajo S-2.

Se llevará la tubería desde el equipo mencionado hasta su bomba correspondiente para finalizar el tramo en su disposición en el *rack* de tuberías.

1. Tramo de descarga del equipo S-1: Una tubería recta de la misma altura que el faldón: 2 m.
2. Tramo entre el equipo S-1 y S-2: Tramo de tubería que recorre la distancia entre los equipos: 2,5 m, (según especificación, para reactores y recipientes de diámetro inferior a 3 m como muestra el plano cuarto).
3. Tramo de diámetro de S-2: Tramo de tubería que recorre una distancia igual al equipo S-2: 1,5 m, (véase plano cuarto, donde el diámetro de los equipos de "SIMPLE" se aproxima a 1,5).
4. Tramo de separación con las bombas: Tramo de tubería que recorre la distancia hasta la bomba correspondiente: 3 m, (según especificación, entre recipientes y reactores y bombas).
5. Tramo de separación con el *rack*: La bomba asociada a la conducción P-10 dista del *rack* de tuberías 2 m, exactamente donde se posiciona otra bomba, (que bombearía la descarga del separador S-2), situada a pie de *rack*: 2 m.
6. Tramo de subida al *rack*: En el *rack* de tuberías la conducción P-10 confluye a un colector junto a sus gemelas P-11, P-12 y P-13 que entrega el fluido como corriente excedente del proceso. La distancia de este tramo es la diferencia de altura entre la impulsión de bomba, (a nivel del terreno) y el primer piso del *rack* a 4,5 m según especificación: 4,5 m.

Si se suman todos los tramos, la longitud obtenida resulta de 15,5 m *quod erat demonstrandum*. Siguiendo un procedimiento similar se han calculado las longitudes de todas las líneas.

#### A5.C1.2.2. Pérdida de carga por fricción

Considérese la ecuación de *Bernoulli*, cuya demostración se excusa por motivos de brevedad:

$$\frac{\Delta P}{\rho g} + \Delta z + \frac{\Delta v^2}{2g} + h_B + h_f - h_M = 0 \quad (A5.1)$$

Esta ecuación no es más que la concreción del balance de energía mecánica a una conducción. Los sumandos corresponden a la carga de presión, carga de altura, carga de velocidad, aportación de energía mecánica por bombeo, pérdida de carga por fricción, (o simplemente fricción) y cesión de energía mecánica a motores hidráulicos, de izquierda a derecha. Todos presentan unidades de longitud, de modo que concuerden con la unidad de la carga de altura.

*Sensu stricto*, la ecuación de *Bernoulli* coincide con la suma de las tres primeras cargas igualadas a cero. Los términos de adición y cesión de energía, así como el de fricción, se añaden a la ecuación original, puesto que ésta se formuló según la hipótesis de idealidad de flujo en la que ningún elemento externo retira o aporta energía, (lo que podría ser posible en conducciones que fluyen por gravedad) y no se cede energía por el contacto con las paredes o al cambiar de dirección o caudal en los accesorios de la red de conducciones, (lo que es imposible evitar en cualquier sistema real).

De este modo, la ecuación (A5.1) concita todas las formas posibles de intercambio de energía de un fluido en una conducción. En el caso particular de la red de tuberías del presente PFC, se considerarán variaciones de presión entre el punto de tubería previo a la aspiración de la bomba y posterior, variación de altura entre el punto inicial considerado y el final y pérdidas de carga por fricción. No se

contempla la inclusión de ningún motor hidráulico en la red de tuberías, ergo  $h_M$  es nulo. Asimismo, puesto que se considerarán puntos de una misma tubería de sección constante, se despreciará la carga de velocidad, puesto que un caudal constante de fluido, que discurre por una conducción de sección invariable, lo hace siempre a la misma velocidad.

De este modo, la ecuación de *Bernoulli* particularizada al caso en estudio resulta:

$$h_B = \frac{\Delta P}{\rho g} + \Delta z + h_f \quad (A5.2)$$

Donde la determinación de las pérdidas de carga, esto es, la suma de la carga de presión, cota y fricción, llevará a conocer la carga de bombeo requerida para superarla y, de este modo, garantizar el flujo de fluidos en las condiciones operativas requeridas.

La fricción debe calcularse tanto en tramo recto como en accesorios de la tubería. Para el primer caso, se ha optado por obtener de la bibliografía\* valores tabulados en pies de carga perdidos por cada 100 pies de tubería. Siguiendo el ejemplo de la tubería P-10, se trata ésta de una conducción de diámetro nominal 2 pulgadas y número de *Schedule* 120. El caudal que trasiega se ha calculado en el anexo segundo y corresponde a 91 gal (US)/min. Con estos datos el libro de *Ingersoll-Rand* sugiere una pérdida de carga de 44,8 ft/100ft, (redondeando el caudal a 95, para una conducción de diámetro nominal 2 pulgadas y número de *Schedule* 160, como criterio conservador).

De este modo, la pérdida en tramo recto se calcula multiplicando la pérdida señalada por la longitud de tubería dada en el apartado anterior:

$$15,5 \text{ m} \cdot 44,8 \frac{\text{ft}}{100 \text{ ft}} = 6,944 \text{ m}$$

\* Cameron hydraulic data. *Ingersoll-Rand Company*. 16ª edición.

Así figura en las tablas de resultados. Debe aclararse que los datos tomados suponen flujo de agua por las conducciones. Considerando que la fricción está relacionada con el número de *Reynolds* por el gráfico de *Moody*, (véase anexo tercero en los apartados de pérdidas de carga en platos), de tal forma que cuanto mayor es el módulo adimensional, es tanto menor la fricción; si los fluidos involucrados en las conducciones presentan menor viscosidad que el agua, (como es el caso), el número de *Reynolds* será mayor que el del agua, (a idénticas condiciones de flujo y considerando que la diferencia de densidades es menos significativa que la de viscosidad), de donde la fricción real para las conducciones diseñadas será menor que la estimada.

De esta forma queda asegurado el buen desempeño de las bombas, puesto que las pérdidas por fricción vienen sobreestimadas.

En cuanto a la pérdida de carga por accesorios, dado que éstos no se contemplan como objetivos de diseño, su contribución se tomará, por recomendación profesional, como un 20% de la pérdida de carga total.

#### A5.C1.2.3. Carga de altura

La carga de altura se toma como la diferencia de cota entre los dos puntos considerados de una tubería. Siguiendo el ejemplo de la conducción P-10, puesto que el punto inicial se toma en la descarga del separador S-1 y el punto final en la descarga de la conducción al colector de los ramales de líquido de "SIMPLE", la carga de altura vendrá dada por la diferencia de cota con el terreno de estas dos alturas.

Cuando un depósito en general descarga, la altura del fluido debería tomarse como la de su nivel en dicho recipiente. Si bien se ha despreciado la altura de líquido por ser relativamente baja y como criterio conservador, puesto que cuanto mayor es la altura de la columna de líquido, tanto menor la carga de altura y, por ende, la carga

de bombeo. Así se toma como cota del separador S-1 los 2 m que separan la descarga del suelo, mientras que la cota de la descarga de P-10 es 4,5 m, esto es, la altura del primer piso del *rack*.

Por tanto la carga que figura en las tablas de resultados es la que sigue:

$$4,5 \text{ m} \cdot 2 \text{ m} = 2,5 \text{ m}$$

Para las tuberías que descargan tanques, se seleccionará como altura del líquido la mitad del mismo, esto es, la altura a la que se cargan.

#### A5.C1.2.4. Carga de presión

La carga de presión supone encontrar la diferencia entre la presión del tramo de impulsión y el de aspiración. Siguiendo el ejemplo de P-10, a su descarga de S-1 el líquido se encuentra a una presión de 2,5 atm, (presión que, adicionalmente es de saturación, puesto que tal líquido se ha separado en condiciones de equilibrio de un vapor). Para su transporte se decide elevar la presión a 3 atm, de modo que se evite su vaporización en la tubería.

La diferencia de carga de presión entre la aspiración e impulsión viene dada por:

$$\frac{\Delta P}{\rho g} = \frac{3 \text{ atm} \cdot 101325 \frac{\text{Pa}}{\text{atm}}}{604,552 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} - \frac{2,5 \text{ atm} \cdot 101325 \frac{\text{Pa}}{\text{atm}}}{604,552 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \cong 8,545 \text{ m}$$

Así figura en las tablas de resultados. La densidad se ha tomado del anexo segundo para la corriente de líquido.

#### A5.C1.2.5. Pérdida total de carga

La pérdida total de carga es el resultado de sumar las cargas de fricción, altura y presión, según (A5.2) y multiplicarla por 1,2, esto

es, aumentar un 20% en concepto de sobreestimación por inclusión de accesorios.

En el ejemplo en curso sobre la conducción P-10, además se incluye, (en la suma previo aumento del 20%), la pérdida total de carga de la conducción P-18, el colector del líquido de “SIMPLE”, a la sazón 4,234 m, dividida por cuatro.

Puesto que el diseño de la red de tuberías discurre paralelo a la selección de bombas, la contribución de la pérdida de carga total del colector proporcionará la pérdida total en las conducciones de líquido de “SIMPLE”, lo que llevará al cálculo de la potencia de bombeo requerido. Dicha contribución se divide por cuatro, dado que se disponen cuatro bombas, una por ramal, para el trasiego del líquido de cada uno de los separadores. La acción conjunta de las cuatro bombas debe vencer las distintas cargas mencionadas tanto en los ramales como en el colector general.

Así, se obtiene para P-10:

$$h_B = \frac{\Delta P}{\rho g} + \Delta z + h_f = \left( 8,545 + 2,5 + 6,944 + \frac{4,234}{4} \right) \cdot 1,2 \cong 22,857 \text{ m}$$

Donde la pérdida de carga total coincide con la carga de bombeo requerida. Así figura en las tablas de resultados.

#### A5.C1.2.6. Potencia de bombeo estimada

La potencia de bombeo se calcula multiplicando la carga de la bomba por la velocidad de flujo en peso, (el producto del caudal másico y la aceleración de la gravedad):

$$P_B = \frac{h_B \cdot W_m \cdot g}{\eta_h \cdot \eta_e} = \frac{h_B \cdot Q \cdot \rho \cdot g}{\eta_h \cdot \eta_e} \quad (A5.3)$$

Siendo  $W_m$  el caudal másico, (producto del caudal volumétrico  $Q$  y la densidad  $\rho$ ) y los rendimientos  $\eta_h$  y  $\eta_e$  los que sobreestiman la potencia de la bomba considerando disipación de energía mecánica

en forma de calor, (rendimiento hidráulico  $\eta_h$ ) y pérdida por la transformación de la energía eléctrica en mecánica, (rendimiento eléctrico  $\eta_e$ ). Por recomendación profesional se tomará el rendimiento hidráulico como el 50% y el eléctrico como el 90%, valores muy conservadores. Así se obtiene:

$$P_B = \frac{22,857 \text{ m} \cdot 0,006 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 604,552 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{0,5 \cdot 0,9} \cong 1728,986 \text{ W (2,35 CV)}$$

Donde el caudal dado anteriormente, 91 gal (US)/min, se ha convertido directamente a  $\text{m}^3/\text{s}$ .

Las bombas se escogen a partir de curvas H-Q comerciales como la que muestra la Figura A5.1, por lo que la potencia de bombeo será la que corresponda a la curva seleccionada y esta estimación servirá de referencia. En dichas curvas el caudal se tomará el que corresponda a la conducción y la altura será la pérdida de carga total.

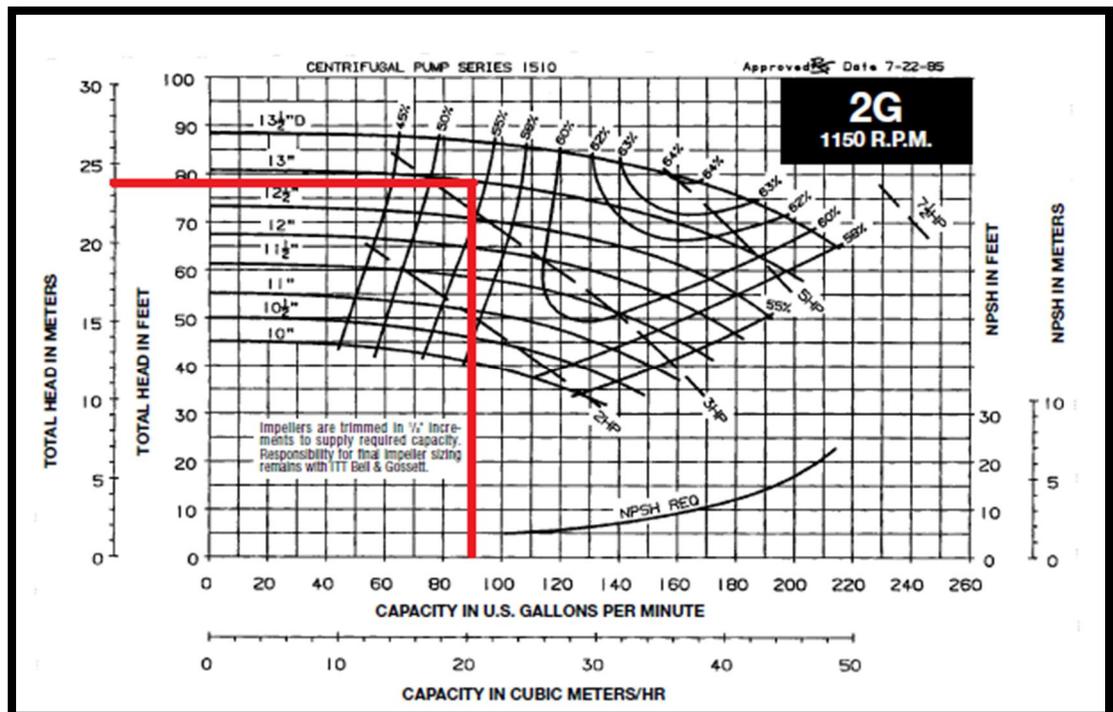


Figura. A5. 1. Curva comercial de bombas (1). (Empresa *Bell & Gossett*)

Queda por tanto concluido el cálculo de la conducción P-10, que ha servido de ejemplo, y se ha escogido una bomba de la empresa *Bell & Gossett (B& G)* de la Serie 1510 modelo 2G con una frecuencia de 1150 rpm y una potencia de 5 HP (aproximadamente 4,9 CV).

La siguiente sección presenta las tablas con todos los resultados y bombas seleccionadas para las líneas de líquido de la planta proyectada.

### **A5.C1.3. Tablas de resultados**

<b>Datos para la selección de bombas B-1, B-2, B-3 y B-4</b>							
<b>Id.</b>	<b>Caudal</b>	<b>L</b>	<b>Fricción</b>	<b><math>\Delta h</math></b>	<b><math>\Delta P</math></b>	<b><math>h_B</math></b>	<b><math>P_B</math></b>
	<b>gpm</b>	<b>m</b>	<b>ft/100ft</b>	<b>m</b>	<b>m</b>	<b>m</b>	<b>CV</b>
<b>P-10</b>	91,004	15,500	44,800	2,500	8,545	22,857	2,351
<b>P-11</b>	91,004	15,500	44,800	2,500	8,545	22,857	2,351
<b>P-12</b>	91,004	15,500	44,800	2,500	8,545	22,857	2,351
<b>P-13</b>	91,004	15,500	44,800	2,500	8,545	22,857	2,351
<b>P-18</b>	364,017	24,000	14,700	0,000	0,000	4,234	

Tabla. A5.I. Cálculo de las bombas de líquido de “SIMPLE”

Donde la primera columna proporciona la identificación de la línea en cuestión, el caudal viene dado en gal (US)/min, L es la longitud, la fricción está tomada del libro de *Ingersoll-Rand* para las tuberías más aproximadas a las condiciones de caudal y diámetro interno,  $\Delta h$  es la diferencia de cota entre el punto de descarga e inicial de la tubería, (en este primer caso la diferencia de altura es la existente entre el primer piso del rack de tuberías, donde se sitúa el colector de líquido y el nivel de líquido en los separadores de “SIMPLE”, como queda explicado),  $\Delta P$  es la carga de presiones entre la aplicada al fluido y aquella a la que parte el punto inicial de las tuberías,  $h_B$  es la carga de bombeo calculada a partir de las anteriores y  $P_B$  la correspondiente potencia de bombeo\*. En función del caudal y la altura (pérdida de carga total), se seleccionan las bombas pertinentes.

\* Se ha proporcionado la potencia en CV cuyo cambio al SI es: 1CV = 735W

Aquellas conducciones para las que no se aportan datos de potencia de bombeo, son tramos de tubería añadidos a aquéllos a los que se le calcula. Más concretamente, en la Tabla A5.I, las pérdidas de carga del colector P-18 se añaden (divididas por cuatro) a cada uno de los ramales. Se entiende que las bombas son capaces de bombear el líquido a través de los ramales y el colector una vez que se han sumado todas las pérdidas. En cuanto a la variabilidad de la velocidad por cambio de sección de paso de las tuberías, no se ha considerado la carga de velocidad, puesto que tales cambios de sección no son muy pronunciados, por lo que la velocidad puede tomarse relativamente constante, como puede comprobarse en la descripción de las líneas de proceso efectuada en la memoria descriptiva.

No se redundará en explicar los pormenores de los criterios de diseño establecidos. Las tuberías están identificadas en la memoria descriptiva y la mecánica de cálculo ha sido convenientemente ejemplificada. Por tanto, para cada tabla se irá indicando las bombas requeridas como resultado final de los cálculos de tuberías. Para concluir el capítulo, se proporcionarán las curvas de todas las bombas seleccionadas.

Para la Tabla A5.I las bombas seleccionadas son las que siguen:

<b>4 bombas</b>	<b>B-1</b>
<b>B &amp; G</b>	<b>B-2</b>
<b>Serie 1510, 2G, 1150 rpm</b>	<b>B-3</b>
<b>5 HP</b>	<b>B-4</b>

En la siguiente tabla se muestran los cálculos para la selección de las bombas de líquido condensado de la operación "SIMPLE".

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Datos para la selección de bombas B-5, B-6, B-7 y B-8							
Id.	Caudal	L	Fricción	$\Delta h$	$\Delta P$	$h_B$	$P_B$
	gpm	m	ft/100ft	m	m	m	CV
P-19	152,494	17,500	17,500	4,500	34,258	56,884	9,781
P-20	152,494	17,500	17,500	4,500	34,258	56,884	9,781
P-21	152,494	17,500	17,500	4,500	34,258	56,884	9,781
P-22	152,494	17,500	17,500	4,500	34,258	56,884	9,781
P-23	609,978	51,836	6,890	0,000	0,000	4,286	
P-24	451,384	49,644	6,890	4,644	0,000	13,007	
P-25	158,594	24,000	17,500	0,000	0,000	5,040	

Tabla. A5.II. Cálculo de las bombas de líquido condensado de "SIMPLE"

El salto de presión considerado es de 2,5 a 4,5 atm. Las bombas seleccionadas son las que siguen:

4 bombas	B-5
B & G	B-6
Serie 1510, 1-1/2 AC, 1150 rpm	B-7
10 HP	B-8

En la siguiente tabla se muestran los cálculos para la selección de la bomba de carga del tanque de "BLENDING" en arranque:

Datos para la selección de bomba B-9							
Id.	Caudal	L	Fricción	$\Delta h$	$\Delta P$	$h_B$	$P_B$
	gpm	m	ft/100ft	m	m	m	CV
P-142	137,148	157,510	17,500	-1,596	29,843	66,974	20,807

Tabla. A5.III. Cálculo para bomba de carga del tanque de "BLENDING" en arranque

El salto de presión considerado es de 1 a 4,5 atm. La bomba seleccionada es la que sigue:

Bomba B & G Serie 1510, 1-1/4 BC 3525 rpm 15 HP	B-9
---	-----

En la siguiente tabla se muestran los cálculos para la selección de la bomba de carga del tanque de "BLENDING" en estacionario.

Datos para la selección de bomba B-10							
Id.	Caudal	L	Fricción	$\Delta h$	$\Delta P$	$h_B$	$P_B$
	gpm	m	ft/100ft	m	m	m	CV
P-142	2,873	157,510	9,940	-1,596	29,843	52,684	0,343

Tabla. A5.IV. Cálculo para bomba de carga del tanque de “BLENDING” en estacionario

El salto de presión considerado es de 1 (la presión del tanque) a 4,5 atm. La bomba seleccionada es la que sigue:

**Bomba B & G Serie 1510, 1-1/4 AC 3500 rpm 3 HP B-10**

En la siguiente tabla se muestran los cálculos para la selección de la bomba de descarga del tanque de “BLENDING”:

Datos para la selección de bomba B-11							
Id.	Caudal	L	Fricción	$\Delta h$	$\Delta P$	$h_B$	$P_B$
	gpm	m	ft/100ft	m	m	m	CV
P-26	741,072	36,000	9,090	-8,534	5,037	82,581	82,441
P-27	755,144	75,200	9,090	50,700	0,000	69,043	

Tabla. A5.V. Cálculo para bomba de descarga del tanque de “BLENDING”

El salto de presión considerado es de 4,649 (la presión del tanque) a 5 atm. La bomba seleccionada es la que sigue:

**Bomba B & G Serie 1510, 3 BC 3550 rpm 100 HP B-11**

En la siguiente tabla se muestran los cálculos para la selección de la bomba de descarga de fondo de segunda columna de “EXTRACTIVA 1” y carga a primera:

Datos para la selección de bomba B-12							
Id.	Caudal	L	Fricción	$\Delta h$	$\Delta P$	$h_B$	$P_B$
	gpm	m	ft/100ft	m	m	m	CV
P-30	806,389	89,800	11,600	73,800	15,027	119,093	123,433

Tabla. A5.VI. Cálculo de la bomba de descarga de 2ª columna de “EXTRACTIVA 1”

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

El salto de presión considerado es de 3 a 4 atm. La bomba seleccionada es la que sigue:

**Bomba B & G Serie 1510, 4 E 3550 rpm 125 HP B-12**

En la siguiente tabla se muestran los cálculos para la selección de la bomba de descarga de fondo de tercera columna de “EXTRACTIVA 1” y carga a segunda:

Datos para la selección de bomba B-13							
Id.	Caudal	L	Fricción	$\Delta h$	$\Delta P$	$h_B$	$P_B$
	gpm	m	ft/100ft	m	m	m	CV
P-32	835,562	101,200	11,600	71,200	32,754	138,832	136,809

Tabla. A5.VII. Cálculo de la bomba de descarga de 3ª columna de “EXTRACTIVA 1”

El salto de presión considerado es de 3 a 5 atm. La bomba seleccionada es la que sigue:

**Bomba Hidromac Serie AZ, 11 A 3500 rpm 100 HP B-13**

En la siguiente tabla se muestran los cálculos para la descarga del acumulador de “EXTRACTIVA 1”:

Datos para la selección de bomba B-14							
Id.	Caudal	L	Fricción	$\Delta h$	$\Delta P$	$h_B$	$P_B$
	gpm	m	ft/100ft	m	m	m	CV
P-36	1121,528	11,500	8,870	4,500	17,993	81,791	98,468
P-39	66,197	69,480	31,500	4,644	0,000	31,386	
P-40	188,406	52,600	24,400	0,000	0,000	12,810	

Tabla. A5.VIII. Cálculo para bomba de descarga del acumulador de “EXTRACTIVA 1”

El salto de presión considerado es de 3 a 4 atm. La bomba seleccionada es la que sigue:

**Bomba B & G Serie 1510, 4 E 3550 rpm 100 HP B-14**

En la siguiente tabla se muestran los cálculos para la conducción del residuo de “EXTRACTIVA 1”.

Datos para la selección de bomba B-15							
Id.	Caudal	L	Fricción	$\Delta h$	$\Delta P$	$h_B$	$P_B$
	gpm	m	ft/100ft	m	m	m	CV
P-41	503,460	4,000	4,990	0,000	13,412	133,749	96,969
P-42	246,105	45,500	14,800	41,700	0,000	58,121	
P-43	246,105	34,500	14,800	41,700	0,000	56,167	
P-144	492,211	7,500	4,990	4,500	0,000	5,849	

Tabla. A5.IX. Cálculo para bomba de conducción del residuo de “EXTRACTIVA 1”

El salto de presión considerado es de 3 a 4 atm. La bomba seleccionada es la que sigue:

<b>Bomba B &amp; G Serie 1510, 2 E 3550 rpm 100 HP</b>	<b>B-15</b>
--	-------------

En la siguiente tabla se muestran los cálculos para la descarga de fondo de segunda columna de “EXTRACTIVA 2” y carga a primera:

Datos para la selección de bombas B-16 y B-19							
Id.	Caudal	L	Fricción	$\Delta h$	$\Delta P$	$h_B$	$P_B$
	gpm	m	ft/100ft	m	m	m	CV
P-46	835,129	99,200	4,550	55,200	6,557	79,524	97,817
P-56	835,129	99,200	4,550	55,200	6,557	79,524	97,817

Tabla. A5.X. Cálculo para bombas de descarga de 2ª columna de “EXTRACTIVA 2”

El salto de presión considerado es de 2 a 2,5 atm. Nótese que ambos ramales son gemelos. Las bombas seleccionadas son las que siguen:

<b>2 Bombas Hidromac Serie AZ 11 A 3500 rpm 100 HP</b>	<b>B-16 B-19</b>
--	----------------------

En la siguiente tabla se muestran los cálculos para la descarga de los acumuladores de “EXTRACTIVA 2”:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Datos para la selección de bombas B-17 y B-20							
Id.	Caudal	L	Fricción	$\Delta h$	$\Delta P$	$h_B$	$P_B$
	gpm	m	ft/100ft	m	m	m	CV
P-50	994,792	22,500	6,230	4,500	16,530	98,825	114,870
P-60	994,792	22,500	6,230	4,500	16,530	98,825	114,870
P-52	139,645	81,000	13,500	39,000	0,000	59,922	
P-62	139,645	81,000	13,500	39,000	0,000	59,922	

Tabla. A5.XI. Cálculo para bombas de descarga de los acumuladores de “EXTRACTIVA 2”

El salto de presión considerado es de 2 a 3 atm. Nótese que los ramales P-50 y P-60 son gemelos. Las bombas seleccionadas son las que siguen:

<b>2 Bombas Hidromac Serie AZ 11 A 3500 rpm 125 HP</b>	<b>B-17 B-20</b>
--	----------------------

En la siguiente tabla se muestran los cálculos para la conducción del residuo de “EXTRACTIVA 2”:

Datos para la selección de bombas B-18 y B-21							
Id.	Caudal	L	Fricción	$\Delta h$	$\Delta P$	$h_B$	$P_B$
	gpm	m	ft/100ft	m	m	m	CV
P-53	107,705	16,500	8,510	4,500	83,498	98,483	19,629
P-63	107,705	16,500	8,510	4,500	83,498	98,483	19,629
P-64	215,409	71,500	10,700	-4,500	0,000	3,781	
P-134	208,827	4,000	10,700	0,000	0,000	59,922	
P-135	208,827	4,000	10,700	0,000	-10,117	-11,627	

Tabla. A5.XII. Cálculo para bombas de conducción del residuo de “EXTRACTIVA 2”

El salto de presión considerado es de 2 a 10 atm. En la conducción P-135 se inserta una válvula de reducción de presión que alivia de 10 a 9 atm, la presión de operación. Nótese que los ramales P-53 y P-63 son gemelos. Las bombas seleccionadas son las que siguen:

<b>2 Bombas B &amp; G Serie 1510 1-1/4 BC 3525 rpm 20 HP</b>	<b>B-18 B-21</b>
--	----------------------

En la siguiente tabla se muestran los cálculos para la descarga de fondo de segunda columna de “MÚLTIPLE” y carga a primera:

<b>Datos para la selección de bombas B-22 y B-25</b>							
<b>Id.</b>	<b>Caudal</b>	<b>L</b>	<b>Fricción</b>	<b><math>\Delta h</math></b>	<b><math>\Delta P</math></b>	<b><math>h_B</math></b>	<b><math>P_B</math></b>
	<b>gpm</b>	<b>m</b>	<b>ft/100ft</b>	<b>m</b>	<b>m</b>	<b>m</b>	<b>CV</b>
<b>P-67</b>	595,133	102,600	5,900	56,100	8,265	70,418	48,968
<b>P-77</b>	595,133	102,600	5,900	56,100	8,265	70,418	48,968

Tabla. A5.XIII. Cálculo para bombas de descarga de 2ª columna de “MÚLTIPLE”

El salto de presión considerado es de 2 a 2,5 atm. Nótese que ambos ramales son gemelos. Las bombas seleccionadas son las que siguen:

<b>2 Bombas B &amp; G Serie 1510 3 BC 3550 rpm 50 HP</b>	<b>B-22 B-25</b>
--	----------------------

En la siguiente tabla se muestran los cálculos para la descarga de los acumuladores de “MÚLTIPLE”:

<b>Datos para la selección de bombas B-23 y B-26</b>							
<b>Id.</b>	<b>Caudal</b>	<b>L</b>	<b>Fricción</b>	<b><math>\Delta h</math></b>	<b><math>\Delta P</math></b>	<b><math>h_B</math></b>	<b><math>P_B</math></b>
	<b>gpm</b>	<b>m</b>	<b>ft/100ft</b>	<b>m</b>	<b>m</b>	<b>m</b>	<b>CV</b>
<b>P-71</b>	731,404	30,500	9,090	4,500	24,789	157,834	134,920
<b>P-81</b>	731,404	30,500	9,090	4,500	24,789	177,007	151,310
<b>P-72</b>	594,628	82,100	5,900	56,100	0,000	73,133	
<b>P-82</b>	594,628	82,100	5,900	56,100	0,000	73,133	
<b>P-86</b>	273,553	37,000	17,100	-4,500	0,000	2,192	
<b>P-145</b>	280,754	7,500	19,500	4,500	0,000	5,963	
<b>P-87</b>	93,585	70,300	15,900	4,800	0,000	19,173	
<b>P-88</b>	93,585	70,300	15,900	4,800	0,000	19,173	
<b>P-89</b>	93,585	70,300	15,900	4,800	0,000	19,173	

Tabla. A5.XIV. Cálculo para bombas de descarga de los acumuladores de “MÚLTIPLE”

El salto de presión considerado es de 2 a 3,5 atm. En este caso se tienen los ramales de descarga P-71 y P-81 gemelos. Las bombas B-23 y B-25, respectivamente trasegarán el vapor condensado de “MÚLTIPLE” a través de las conducciones P-72 y P-82, (reflujos de

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

columna), P-73 y P-83, (destilados) y P-86 y P-145 (colector previo y post paso por el cambiador E-25). Adicionalmente, la bomba B-23, garantizará el flujo de un ramal de alimentación de “BINARIA”, (P-87), mientras que la bomba B-25 hará lo propio con los otros dos (P-88 y P-89). Las bombas seleccionadas son las que siguen:

Bomba Hidromac Serie 2196, A30-MTO/LTO 3500 rpm 150 HP	B-23
Bomba Hidromac Serie 2196, A30-MTO/LTO 3500 rpm 200 HP	B-26

En la siguiente tabla se muestran los cálculos para la conducción del residuo de “MÚLTIPLE”:

Datos para la selección de bombas B-24 y B-27							
Id.	Caudal	L	Fricción	$\Delta h$	$\Delta P$	$h_B$	$P_B$
	gpm	m	ft/100ft	m	m	m	CV
P-74	2,884	22,500	9,940	4,500	16,826	75,712	0,251
P-84	2,884	22,500	9,940	4,500	16,826	75,712	0,251
P-85	5,768	90,500	36,400	0,000	0,000	39,530	

Tabla. A5.XV. Cálculo para bombas de conducción del residuo de “MÚLTIPLE”

El salto de presión considerado es de 2 a 3 atm. Nótese que los ramales P-74 y P-84 son gemelos. Las bombas seleccionadas son las que siguen:

2 Bombas B & G Serie 1510	B-24
2 G 1150 rpm 2 HP	B-27

En la siguiente tabla se muestran los cálculos para la descarga de fondo de segunda columna de “BINARIA” y carga a primera:

Datos para la selección de bombas B-28, B-32 y B-36							
Id.	Caudal	L	Fricción	$\Delta h$	$\Delta P$	$h_B$	$P_B$
	gpm	m	ft/100ft	m	m	m	CV
P-92	1128,117	149,100	8,870	65,100	25,441	124,520	159,966
P-104	1128,117	149,100	8,870	65,100	25,441	124,520	159,966
P-118	1128,117	149,100	8,870	65,100	25,441	124,520	159,966

Tabla. A5.XVI. Cálculo para bombas de descarga de 2ª columna de “BINARIA”

El salto de presión considerado es de 3 a 4,5 atm. Nótese que los tres ramales son gemelos. Las bombas seleccionadas son las que siguen:

Bomba Hidromac Serie 2196, A30-MTO/LTO 3500 rpm 200 HP	B-28
Bomba Hidromac Serie 2196, A30-MTO/LTO 3500 rpm 200 HP	B-32
Bomba Hidromac Serie 2196, A30-MTO/LTO 3500 rpm 200 HP	B-36

En la siguiente tabla se muestran los cálculos para la descarga de fondo de tercera columna de “BINARIA” y carga a segunda:

Datos para la selección de bombas B-29, B-33 y B-37							
Id.	Caudal	L	Fricción	$\Delta h$	$\Delta P$	$h_B$	$P_B$
	gpm	m	ft/100ft	m	m	m	CV
P-94	1065,792	164,500	7,490	66,000	25,939	125,112	148,933
P-106	1065,792	164,500	7,490	66,000	25,939	125,112	148,933
P-120	1065,792	164,500	7,490	66,000	25,939	125,112	148,933

Tabla. A5.XVII. Cálculo para bombas de descarga de 3ª columna de “BINARIA”

El salto de presión considerado es de 3 a 4,5 atm. Nótese que los tres ramales son gemelos. Las bombas seleccionadas son las que siguen:

Bomba Hidromac Serie 2196, A30-MTO/LTO 3500 rpm 200 HP	B-29
Bomba Hidromac Serie 2196, A30-MTO/LTO 3500 rpm 200 HP	B-33
Bomba Hidromac Serie 2196, A30-MTO/LTO 3500 rpm 200 HP	B-37

En la siguiente tabla se muestran los cálculos para la descarga de los acumuladores de “BINARIA”:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Datos para la selección de bombas B-30, B-34 y B-38							
Id.	Caudal	L	Fricción	$\Delta h$	$\Delta P$	$h_B$	$P_B$
	gpm	m	ft/100ft	m	m	m	CV
P-98	1121,428	69,000	8,870	4,500	26,457	127,459	156,523
P-110	1121,428	69,000	8,870	4,500	26,457	127,459	156,523
P-124	1121,428	69,000	8,870	4,500	26,457	127,459	156,523
P-99	1098,999	110,600	7,490	65,100	0,000	88,061	
P-111	1098,999	110,600	7,490	65,100	0,000	88,061	
P-125	1098,999	110,600	7,490	65,100	0,000	88,061	
P-128	17,492	129,808	70,800	4,644	0,000	115,858	
P-129	47,794	56,500	36,200	0,000	0,000	24,544	

Tabla. A5.XVIII. Cálculo para bombas de descarga de los acumuladores de “BINARIA”

El salto de presión considerado es de 3 a 4,5 atm. En este caso se tienen los ramales de descarga P-98, P-110 y P-124 gemelos. Las bombas B-30, B-34 y B-38, respectivamente trasegarán el vapor condensado de “BINARIA” a través de las conducciones P-99, P-111 y P-125, (reflujos de columna), P-128, (parte del destilado destinado a “BLENDING”) y P-129, (destilado entregado como corriente terminada). Las bombas seleccionadas son las que siguen:

6 Bombas en serie Hidromac Serie 2196, A30-MTO/LTO 3500 rpm 200 HP	B-30
6 Bombas en serie Hidromac Serie 2196, A30-MTO/LTO 3500 rpm 200 HP	B-34
6 Bombas en serie Hidromac Serie 2196, A30-MTO/LTO 3500 rpm 200 HP	B-38

Las pérdidas de carga se han dividido por 2,5 de modo que sean asumibles por la capacidad impulsora de las bombas. Por ello se ha decidido utilizar 6 bombas en serie, de modo que sumen su altura, (en teoría, si las pérdidas están divididas por 2,5 usar 5 bombas sería suficiente, si bien se ha sobredimensionado a fin de garantizar el flujo).

En la siguiente tabla se muestran los cálculos para la conducción del residuo de “BINARIA”:

Datos para la selección de bombas B-31, B-35 y B-39							
Id.	Caudal	L	Fricción	$\Delta h$	$\Delta P$	$h_B$	$P_B$
	gpm	m	ft/100ft	m	m	m	CV
P-101	71,336	47,000	36,000	4,500	25,201	148,514	12,180
P-114	71,336	47,000	36,000	4,500	25,201	148,514	12,180
P-130	71,336	47,000	36,000	4,500	25,201	148,514	12,180
P-132	49,854	123,808	36,200	4,644	0,000	115,858	
P-133	164,155	140,500	19,700	0,000	0,000	27,679	

Tabla. A5.XIX. Cálculo para bombas de conducción del residuo de "BINARIA"

El salto de presión considerado es de 3 a 4,5 atm. Nótese que los ramales P-101, P-114 y P-130 son gemelos. Las bombas seleccionadas son las que siguen:

Bomba B&G Serie 1510, 1-1/4 BC 3525 rpm 20 HP	B-31
Bomba B&G Serie 1510, 1-1/4 BC 3525 rpm 20 HP	B-35
Bomba B&G Serie 1510, 1-1/4 BC 3525 rpm 20 HP	B-39

En la siguiente tabla se muestran los cálculos para la selección de la bomba de entrega de vapor condensado de "RECUPERACIÓN":

Datos para la selección de bomba B-40							
Id.	Caudal	L	Fricción	$\Delta h$	$\Delta P$	$h_B$	$P_B$
	gpm	m	ft/100ft	m	m	m	CV
P-137	47,123	87,500	36,200	4,500	40,578	92,104	5,165

Tabla. A5.XX. Cálculo de la bomba de entrega de vapor condensado de "RECUPERACIÓN"

El salto de presión considerado es de 9 a 11,5 atm. La bomba seleccionada es la que sigue:

Bomba B & G Serie 1510, 1-1/4 BC 3525 rpm 10 HP	B-40
---	------

En la siguiente tabla se muestran los cálculos para la selección de la bomba de líquido de "RECUPERACIÓN":

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Datos para la selección de bombas B-41							
Id.	Caudal	L	Fricción	$\Delta h$	$\Delta P$	$h_B$	$P_B$
	gpm	m	ft/100ft	m	m	m	CV
P-138	162,011	13,000	19,700	4,500	9,134	69,085	23,668
P-139	3,393	72,500	13,200	0,000	0,000	11,484	
P-140	158,617	115,808	17,500	4,644	0,000	29,892	

Tabla. A5.XXI. Cálculo de la bomba de entrega de líquido de “RECUPERACIÓN”

El salto de presión considerado es de 9 a 10 atm. La bomba seleccionada es la que sigue:

<b>Bomba B &amp; G Serie 1510, 2 BC 3550 rpm 20 HP</b>	<b>B-41</b>
--	-------------

En la siguiente tabla se muestran los cálculos para la selección de la bomba de reflujo de “EXTRACTIVA 1”:

Datos para la selección de bomba B-42							
Id.	Caudal	L	Fricción	$\Delta h$	$\Delta P$	$h_B$	$P_B$
	gpm	m	ft/100ft	m	m	m	CV
P-37	866,925	83,700	13,000	68,700	17,993	117,089	108,962

Tabla. A5.XXII. Cálculo de la bomba de reflujo de “EXTRACTIVA 1”

El salto de presión considerado es de 4 a 5 atm. La bomba seleccionada es la que sigue:

<b>Bomba Hidromac Serie AZ, 11 A 3500 rpm 125 HP</b>	<b>B-42</b>
--	-------------

En la siguiente tabla se muestran los cálculos para la selección de las bombas de reflujo de “EXTRACTIVA 2”:

Datos para la selección de bomba B-43 y B-44							
Id.	Caudal	L	Fricción	$\Delta h$	$\Delta P$	$h_B$	$P_B$
	gpm	m	ft/100ft	m	m	m	CV
P-51	855,147	76,600	6,230	51,600	0,000	67,647	67,592
P-61	855,147	76,600	6,230	51,600	0,000	67,647	67,592

Tabla. A5.XXIII. Cálculo de las bombas de reflujo de “EXTRACTIVA 2”

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

El salto de presión considerado es nulo en este caso. Tanto en las bombas B-43 y B-44, (gemelas), como en la B-42, se decidió utilizar una bomba separada para procurar el reflujo, ya que las pérdidas asumidas por una sola bomba eran incompatibles con las relaciones capacidad-altura comerciales. Las bombas seleccionadas son las que siguen:

Bomba B&G Serie 1510, 4 E 3550 rpm 75 HP	B-43
Bomba B&G Serie 1510, 4 E 3550 rpm 75 HP	B-44

Con lo que queda descrito el sistema de impulsión. Se procuran seguidamente las curvas de todas las bombas necesitadas.

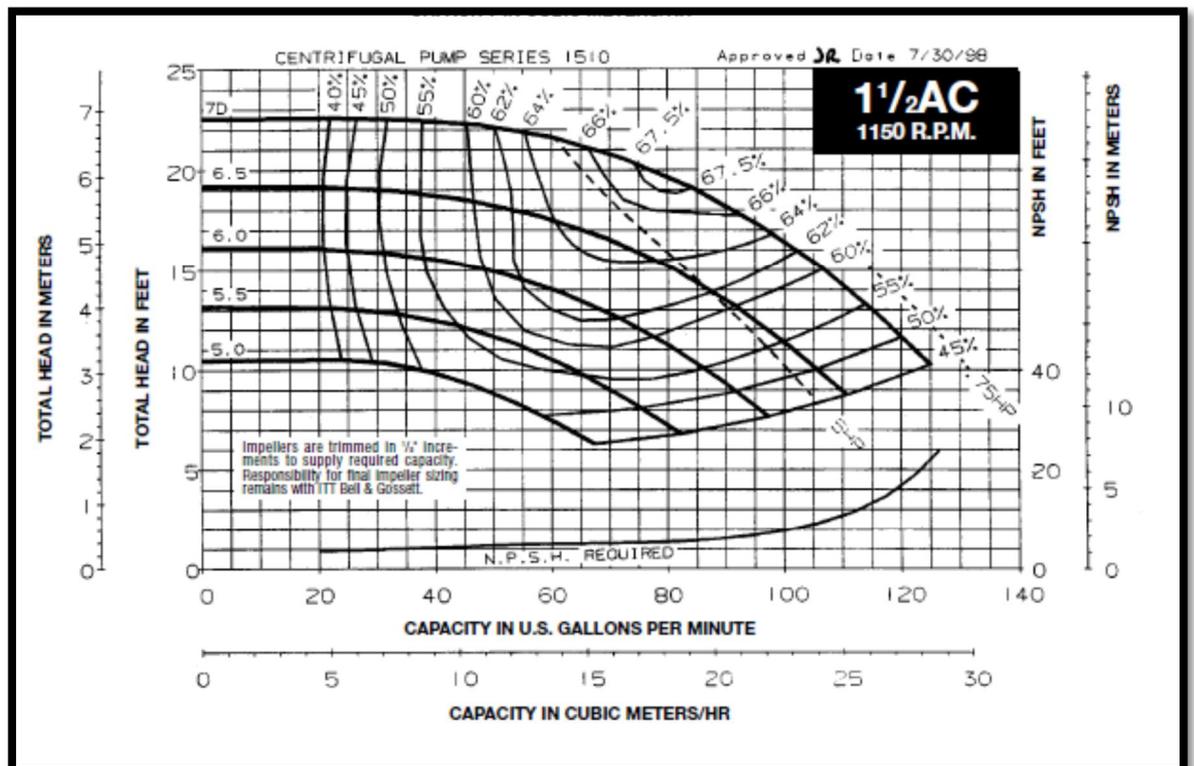


Figura. A5. 2. Curva comercial de bombas (2). (Empresa *Bell & Gossett*)

# Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

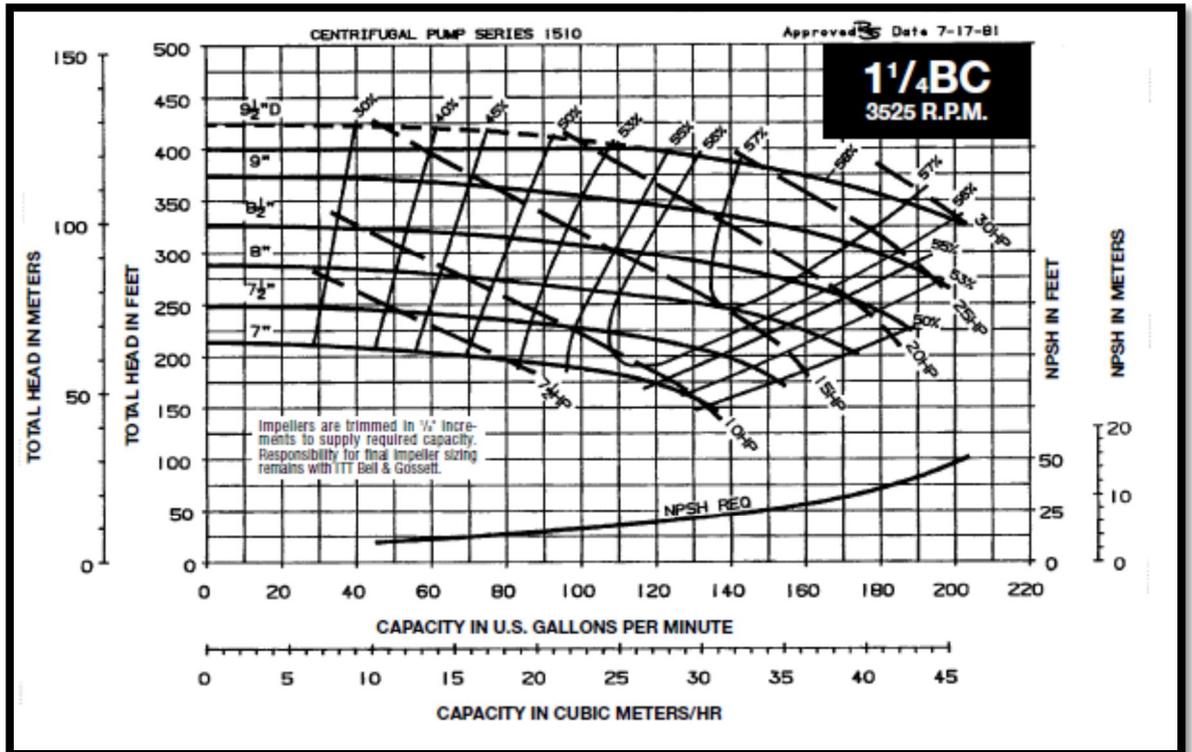


Figura. A5. 3. Curva comercial de bombas (3). (Empresa *Bell & Gossett*)

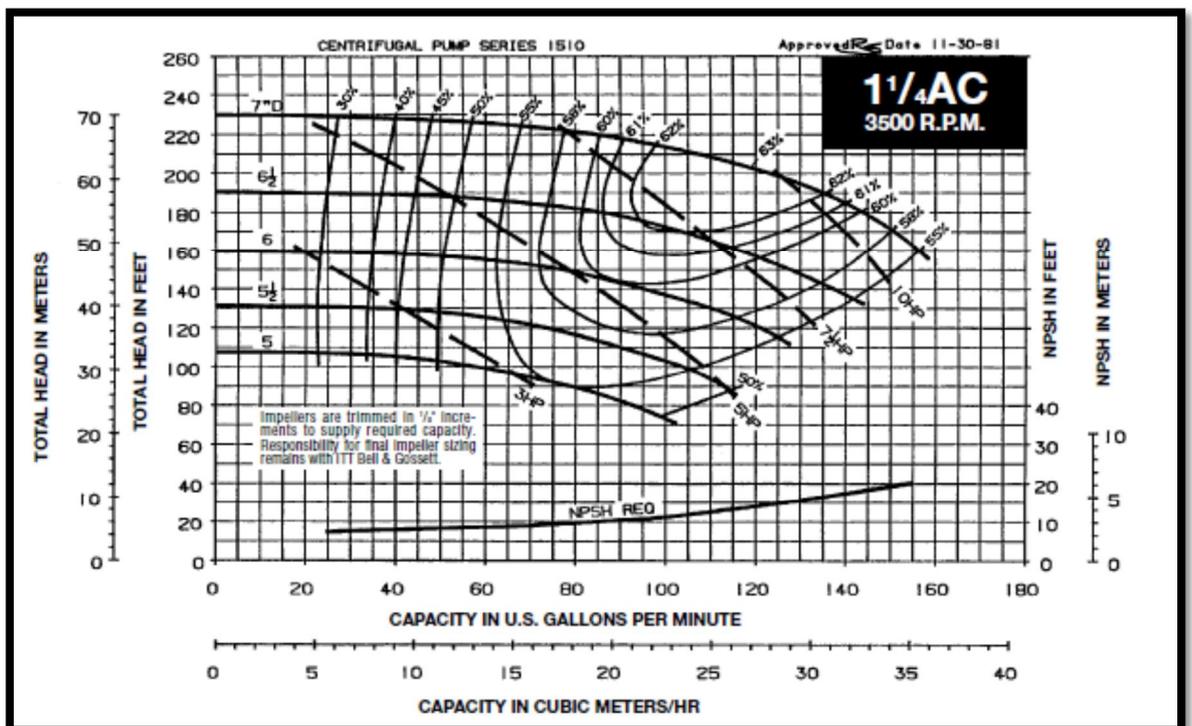


Figura. A5. 4. Curva comercial de bombas (4). (Empresa *Bell & Gossett*)

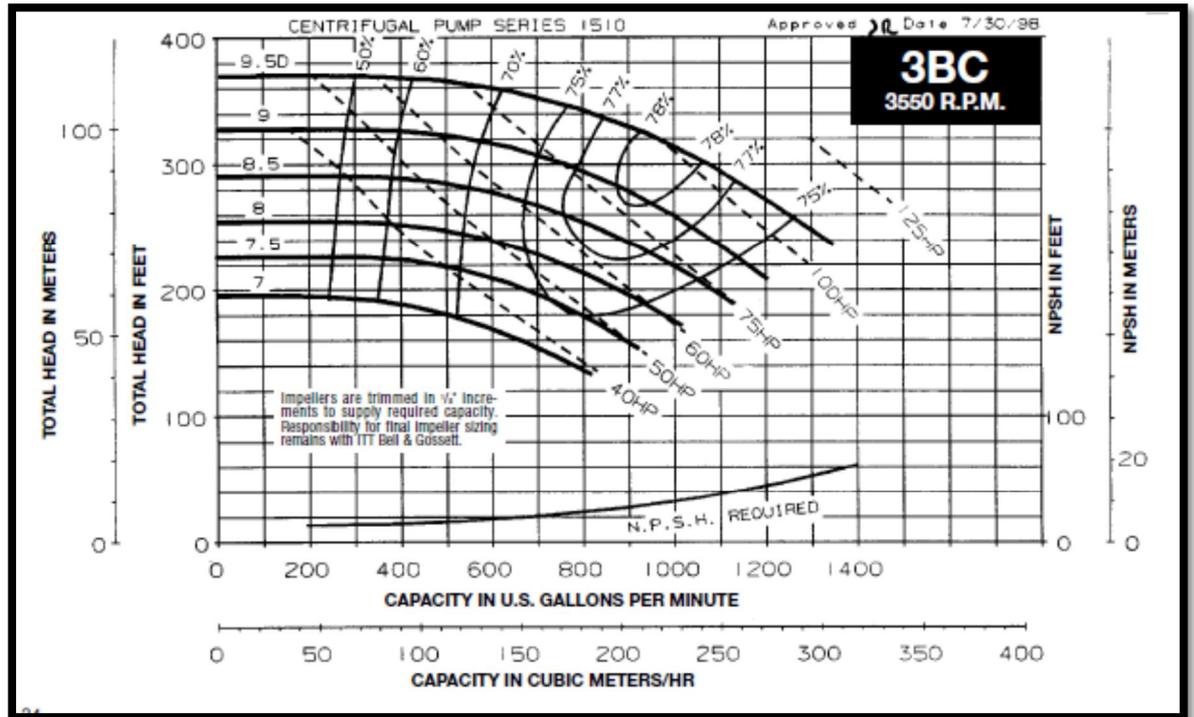


Figura. A5. 5. Curva comercial de bombas (5). (Empresa *Bell & Gossett*)

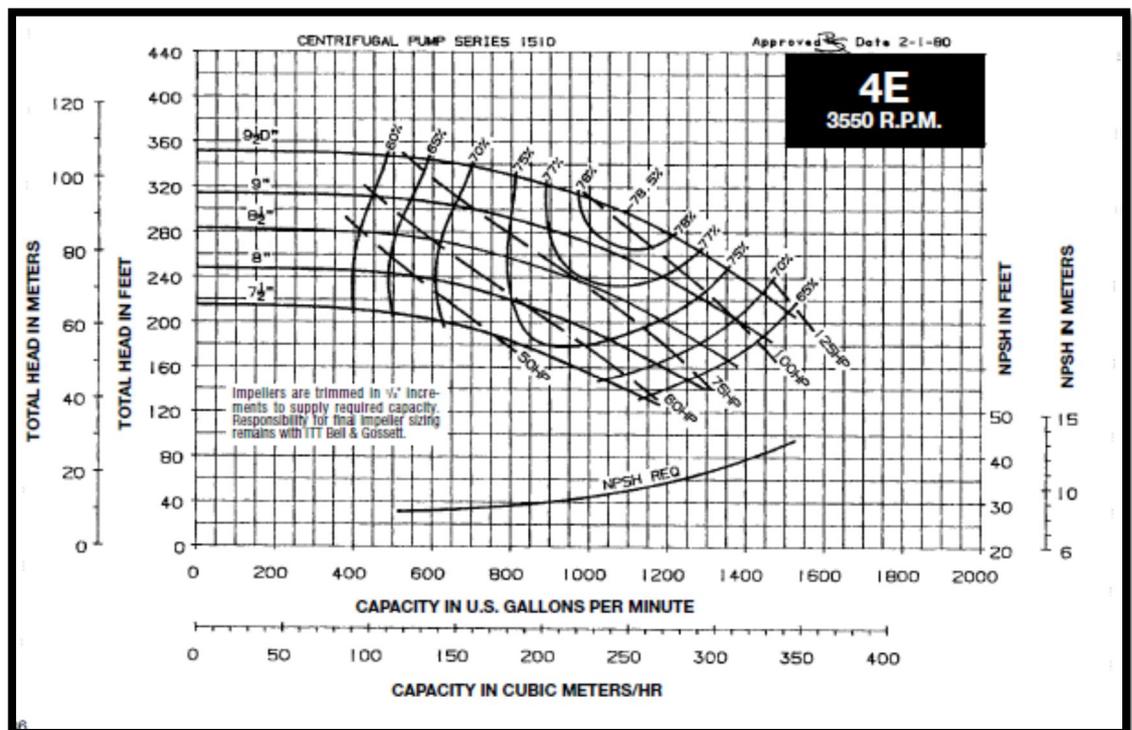


Figura. A5. 6. Curva comercial de bombas (6). (Empresa *Bell & Gossett*)

# Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

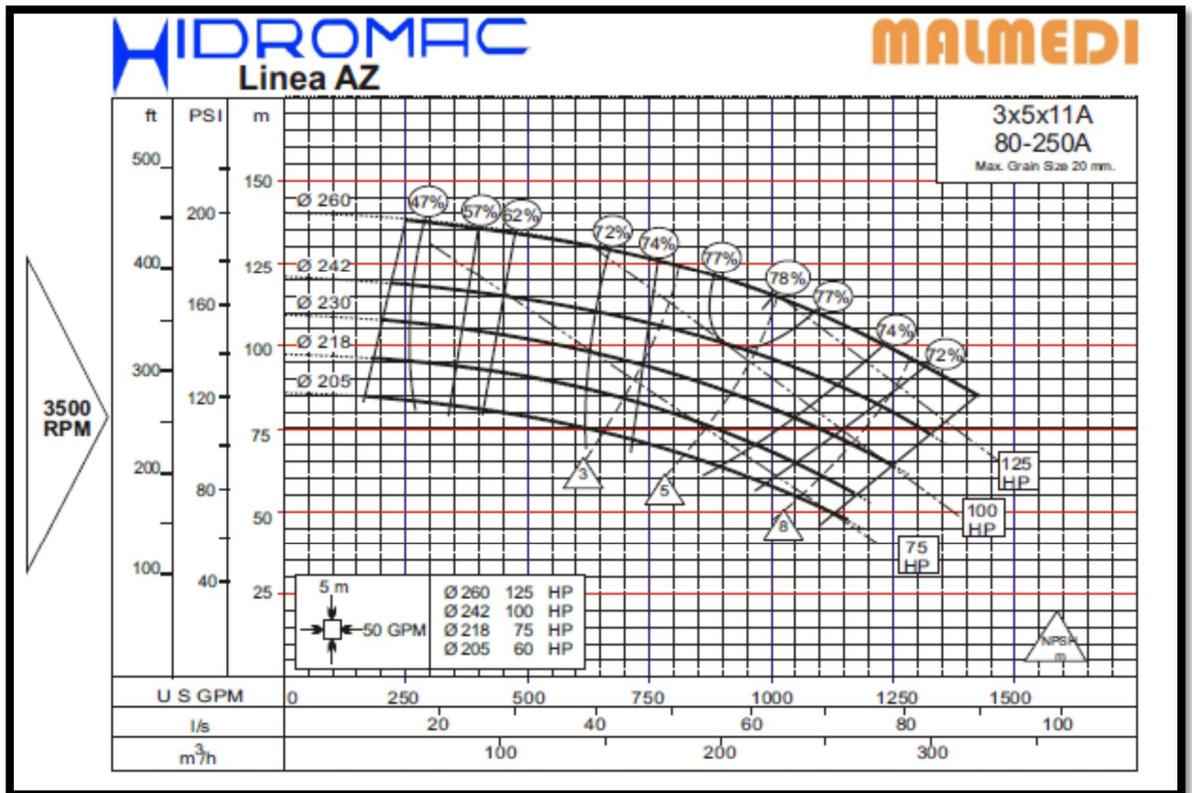


Figura. A5. 7. Curva comercial de bombas (7). (Empresa Hidromac)

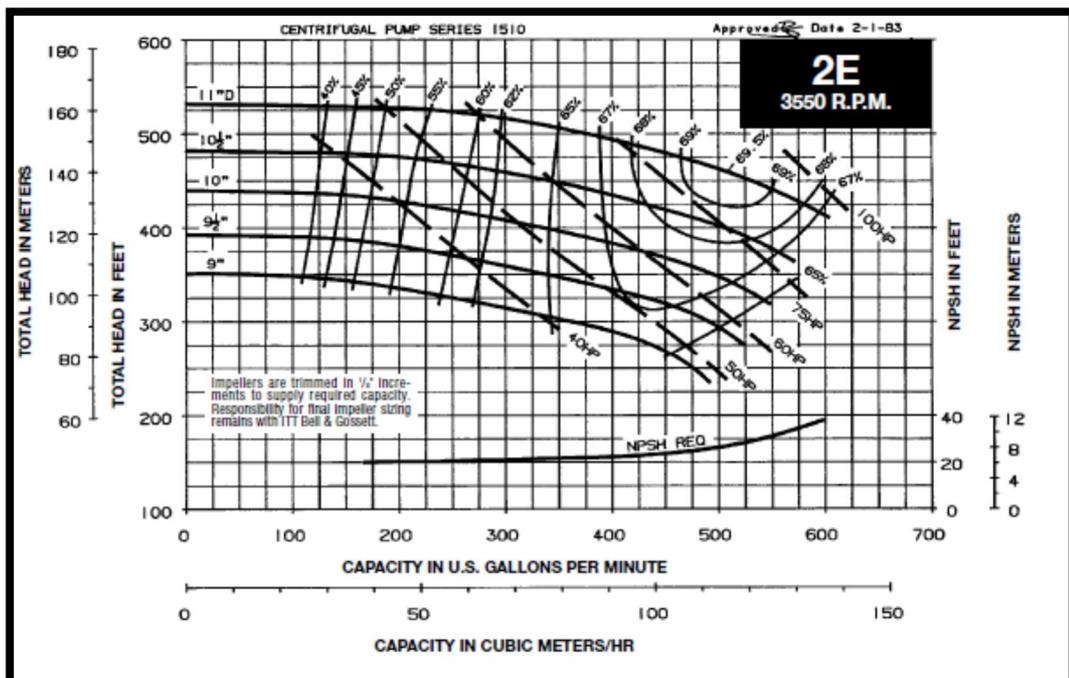


Figura. A5. 8. Curva comercial de bombas (8). (Empresa Bell & Gossett)

Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

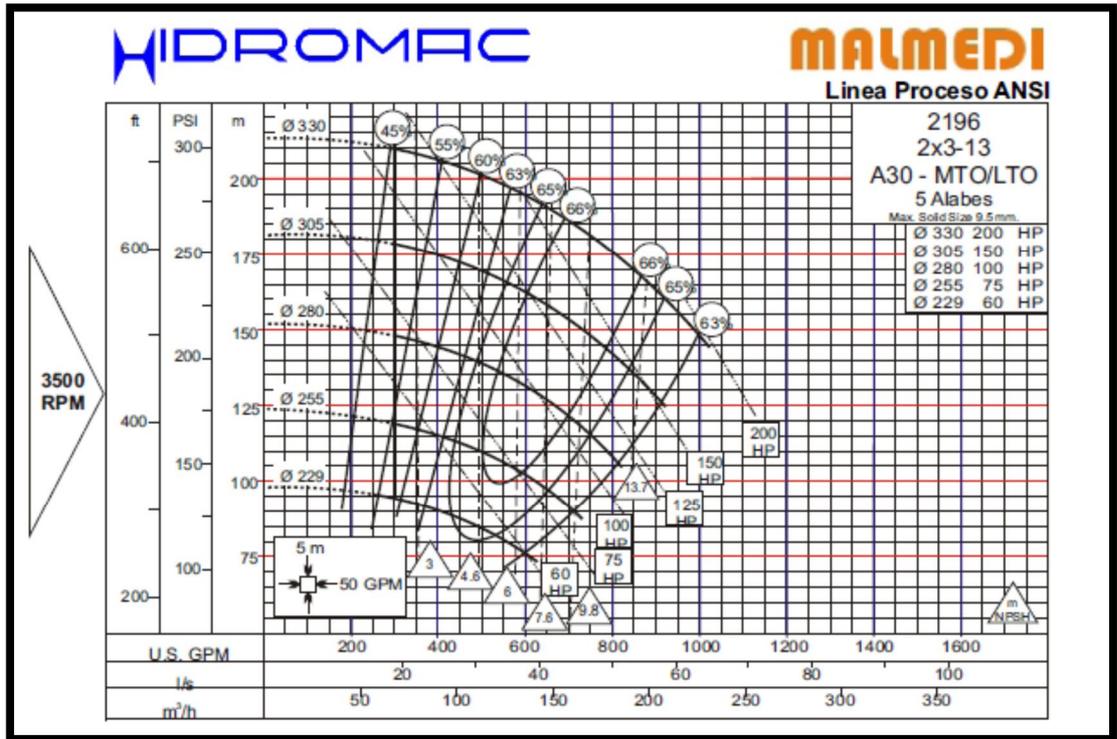


Figura. A5. 9. Curva comercial de bombas (9). (Empresa *Hidromac*)

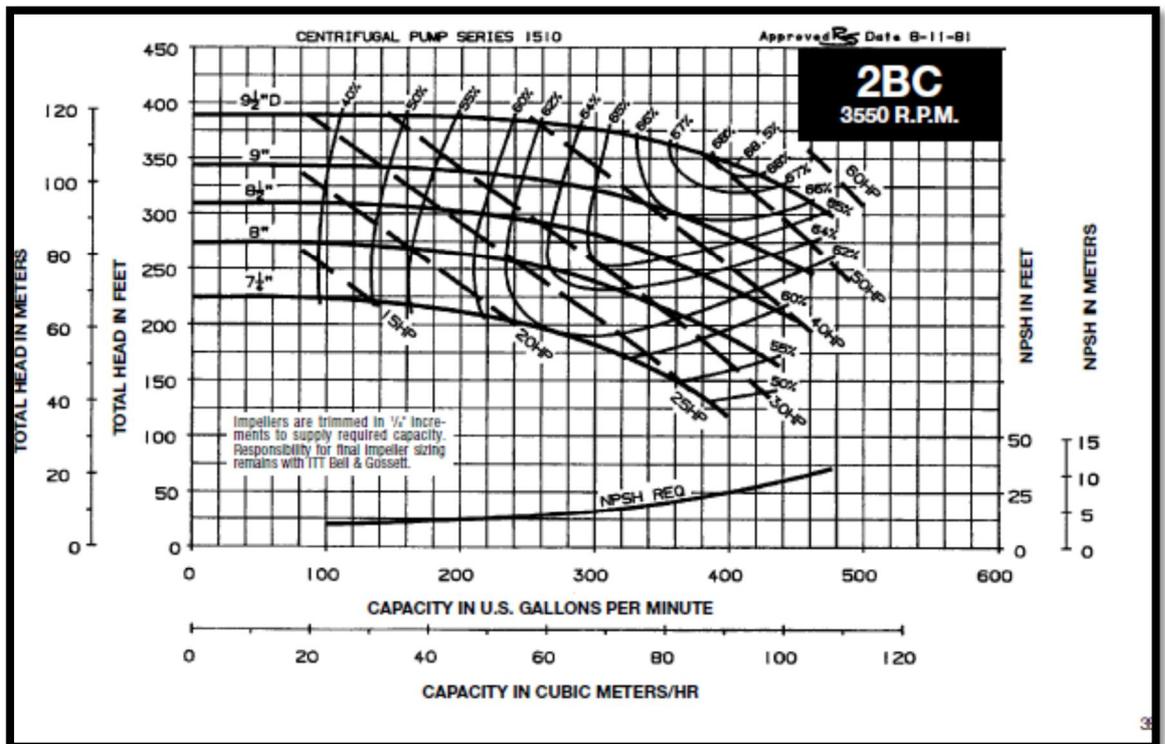


Figura. A5. 10. Curva comercial de bombas (10). (Empresa *Bell & Gossett*)



---

## **Capítulo A5.C2. Diseño de acumuladores de reflujo**

### **A5.C2.1. Introducción**

Los acumuladores de reflujo no son separadores, por ello se aborda su diseño separadamente a las unidades del proceso principal.

Los acumuladores se ubican tras los condensadores totales de las torres de destilación al objeto de proporcionarles el reflujo, previniendo que eventuales fluctuaciones en el flujo afecten a equipos aguas abajo. Su funcionamiento es simple: el líquido procedente del condensador se acumula en un recipiente (habitualmente horizontal, como el que se diseñó para la operación “RECUPERACIÓN”), antes de ser enviado a un divisor de corrientes que separe el reflujo del destilado. Por tanto, el acumulador o botellón de reflujo cuenta con dos tubuladuras para entrada y salida del líquido y, adicionalmente, dispondrá un venteo que evite que gases no condensables retornen al proceso aguas arriba, (el venteo se conectará con la red de antorchas por motivos de seguridad).

El líquido abandona el botellón por su parte inferior y se dirige a la aspiración de una bomba. Para prevenir la formación de gases, siempre se dispondrá un rompedor de vórtices a la salida del líquido, como se ha indicado en todos los aparatos que prevén una cierta acumulación de líquido.

### **A5.C2.2. Dimensionado hidráulico**

Seguidamente pueden presentarse las ecuaciones y secuencia de cálculo para el dimensionado de acumuladores. Sea la Figura A5.11: se muestra en ésta un esquema genérico de acumulador de disposición horizontal.

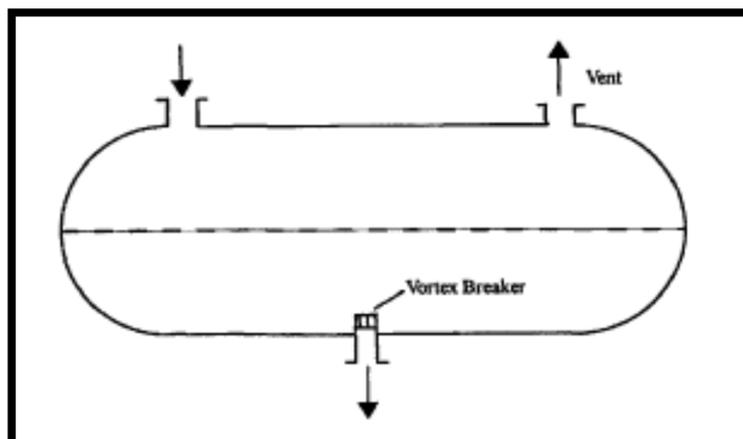


Figura. A5.11. Esquema de un separador horizontal. (H. Silla, 2003)

Existen en la bibliografía distintos procedimientos para el dimensionado de este tipo de aparatos. En este caso se aplicará el que se indica en el libro de Silla\*, contrastado al tiempo que simple.

Inicialmente debe seleccionarse un tiempo de residencia. Silla indica aplicar un tiempo no inferior a 5 minutos ni superior a 10. Como medida ecuánime se tomarán 450 s, (7,5 min). Seguidamente se calcula el volumen del aparato, se decide si los cabezales serán torisféricos o elípticos y, con el dato de volumen se estima el diámetro.

Conocido el volumen puede encontrarse la longitud y verificarse si la relación de aspecto L/D se encuentra entre los márgenes recomendados por la bibliografía. Las ecuaciones son las que siguen:

$$(A5.4) \left\{ \begin{array}{l} V(\text{ft}^3) = 2 \cdot l(\text{ft}^3/\text{s}) \cdot t_s(\text{s}) \quad (1) \\ V(\text{ft}^3) = \frac{\pi \cdot D^2(\text{ft}) \cdot L(\text{ft})}{4} + 2f_{HV} \cdot D^3(\text{ft}) \quad (2) \\ (3) \left\{ \begin{array}{l} L/D \in (2,5 - 6) \\ f_{HV} = 0,1309 \text{ (cabezal elíptico)} \\ f_{HV} = 0,0778 \text{ (cabezal torisférico)} \end{array} \right. \end{array} \right.$$

\* Chemical Process Engineering. Design and Economics. H. Silla. Marcel Dekker, 2003

Donde V corresponde al volumen del acumulador, I es una corriente genérica de líquido entrante al acumulador,  $t_s$  el tiempo de residencia, D, el diámetro del recipiente, L, su longitud y  $f_{HV}$  un factor adimensional para el volumen de los cabezales, (HV proviene del inglés “*head vessel*” o cabezal del recipiente).

Una vez se conoce el volumen, si se selecciona  $L/D = 4,25$  como relación promedio y se divide por D (A5.4.2) se encuentra:

$$V = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot L}{4} + 2f_{HV} \cdot D^3$$

$$\frac{V}{D} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot L}{4 \cdot D} + 2f_{HV} \cdot D^2$$

$$\frac{V}{D} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot 4,25}{4} + 2f_{HV} \cdot D^2 = D^2 \left( \frac{17\pi}{16} - 2f_{HV} \right)$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{V}{\left( \frac{17\pi}{16} - 2f_{HV} \right)}} \quad (A5.5)$$

Donde se ha introducido L/D en el segundo paso de la deducción. De esta forma, una vez dilucidado el diámetro por aplicación de (A5.5), en las mismas unidades que (A5.4.2), deberá redondearse en incrementos de 6 pulgadas y obtenerse la longitud conocida la relación de aspecto.

Ésta última se redondea en incrementos de 3 pulgadas y se verifica, como paso final que la relación de aspecto se cumple.

La aplicación conjunta de (A5.4) y (A5.5) se mostrará para el acumulador de reflujo de la operación “EXTRACTIVA 1” y se adjuntarán los resultados de los siete acumuladores restantes, fruto de aplicar sucesivamente el procedimiento mostrado. Sea:

Dimensionado del separador vertical					
$t_s$ (s)	450	$\rho_D$ (mol/cm <sup>3</sup> )	0,010	D (Mmol/año)	5166,839
1 ft → m	0,3048	1 año → s	31536000	D (ft <sup>3</sup> /s)	0,567
V (ft <sup>3</sup> )	510,532	$f_{HV}$ (ft/s)	0,078	L/D	4,25
D (ft) (m)	5,333 (1,63)	L (ft <sup>2</sup> ) (m)	23,000 (7, 01)	L/D (comprobación)	4,313

Tabla. A5.XXIV. Diseño del acumulador A-1

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

La corriente de destilado de “EXTRACTIVA 1”, D, así como su densidad se han procurado a lo largo de los anexos de cálculo previos. No se confunda D de destilado con D de diámetro, sus unidades las diferencian, (la primera presenta unidades de caudal molar o volumétrico, la segunda de longitud). Las conversiones dadas permiten obtener el caudal volumétrico a partir del molar.

Las magnitudes de la última línea se han redondeado a los valores comerciales, (64 in de diámetro, 276 in de longitud). Asimismo se ha comprobado si la relación L/D después del redondeo es satisfactoria.

Finalizada la demostración, se proporcionan los datos del resto de acumuladores.

Dimensionado del separador vertical					
$t_s$ (s)	450	$\rho_E$ (mol/cm <sup>3</sup> )	0,011	E/2 (Mmol/año)	3188,424
1 ft → m	0,3048	1 año → s	31536000	E/2 (ft <sup>3</sup> /s)	0,311
V (ft <sup>3</sup> )	280,018	$f_{HV}$ (ft/s)	0,078	L/D	4,25
D (ft) (m)	4,333 (1,32)	L (ft <sup>2</sup> ) (m)	18,500 (5,64)	L/D (comprobación)	4,269

Tabla. A5.XXV. Diseño de los acumuladores A-2 y A-3

Dimensionado del separador vertical					
$t_s$ (s)	450	$\rho_G$ (mol/cm <sup>3</sup> )	0,011	G/2 (Mmol/año)	3125,574
1 ft → m	0,3048	1 año → s	31536000	G/2 (ft <sup>3</sup> /s)	0,305
V (ft <sup>3</sup> )	274,265	$f_{HV}$ (ft/s)	0,078	L/D	4,25
D (ft) (m)	4,333 (1,32)	L (ft <sup>2</sup> ) (m)	18,500 (5,64)	L/D (comprobación)	4,269

Tabla. A5.XXVI. Diseño de los acumuladores A-4 y A-5

Dimensionado del separador vertical					
$t_s$ (s)	450	$\rho_H$ (mol/cm <sup>3</sup> )	0,011	H/3 (Mmol/año)	470,091
1 ft → m	0,3048	1 año → s	31536000	H/3 (ft <sup>3</sup> /s)	0,050
V (ft <sup>3</sup> )	44,974	$f_{HV}$ (ft/s)	0,078	L/D	4,25
D (ft) (m)	2,500 (0,76)	L (ft <sup>2</sup> ) (m)	11,000 (3,35)	L/D (comprobación)	4,400

Tabla. A5.XXVII. Diseño de los acumuladores A-6, A-7 y A-8

Donde debe notarse que los acumuladores en las tablas A5.XXV a A5.XXVII son gemelos ya que corresponden a los trenes idénticos de separación descritos en anteriores anexos. Por ello, los caudales de líquido coincidirán con los destilados totales de cada operación divididos por el número de trenes.

Se sigue en los próximos apartados el diseño mecánico de los acumuladores.

### **A5.C2.3. Diseño mecánico**

El diseño mecánico de los acumuladores es análogo al practicado para el separador gas-líquido de “RECUPERACIÓN”, por lo que se evitará redundar en el procedimiento y se presentarán directamente las soluciones para todos los acumuladores.

#### **A5.C2.3.1. Diseño mecánico (I). Determinación de la presión de diseño**

En adelante se evitará repetir procedimientos ya mostrados con anterioridad, por lo que se presenta directamente la tabla conteniendo la información concerniente al apartado en cuestión, y se emplaza al lector a la revisión del capítulo primero del anexo segundo, donde se proporcionan las expresiones y datos precisos para el cálculo.

<b>Presiones significativas en los acumuladores</b>		
<b>Acumulador</b>	<b>P<sub>op</sub> (atm)</b>	<b>P<sub>diseño</sub> (psi)</b>
<b>A-1</b>	<b>3</b>	<b>74,666</b>
<b>A-2 y A-3</b>	<b>2</b>	<b>59,862</b>
<b>A-4 y A-5</b>	<b>2</b>	<b>59,862</b>
<b>A-6, A-7 y A-8</b>	<b>3</b>	<b>74,359</b>

Tabla. A5.XXVIII. Cálculo de las presiones de diseño

### A5.C2.3.2. Diseño mecánico (II). Determinación de espesores para el casco y los cabezales sometidos a presión interna

Se obtiene para los distintos cascos y cabezales:

<b>Espesores de casco y cabezales sometidos a presión interna</b>		
<b>Acumulador</b>	<b><math>t_{c, pi}</math> (in)</b>	<b><math>t_{cab, pi}</math> (in)</b>
<b>A-1</b>	<b>5/16 (7,94 mm)</b>	<b>3/8 (9,53)</b>
<b>A-2 y A-3</b>	<b>1/4 (6,35 mm)</b>	<b>5/16 (7,94 mm)</b>
<b>A-4 y A-5</b>	<b>1/4 (6,35 mm)</b>	<b>5/16 (7,94 mm)</b>
<b>A-6, A-7 y A-8</b>	<b>1/4 (6,35 mm)</b>	<b>5/16 (7,94 mm)</b>

Tabla. A5.XXIX. Espesores de casco y cabezales sometidos a presión interna

El material seleccionado para el acumulador es acero al carbono según especificación SA-285 grado C. Se emplea tal material debido a su económico precio y suficiente resistencia mecánica y a la corrosión para el uso a que se dirige. Nuevamente se observa que el régimen longitudinal de esfuerzos predomina sobre el circunferencial y la presión admisible supera la de diseño, (los datos se omiten por brevedad).

Los cabezales en este caso son del tipo “*Korboggen*” tal como se recomendó, en el primer capítulo del segundo anexo, para una presión de operación entre 6,8 y 10 atm.

Según normas de diseño mecánico, el espesor de los cabezales debe ser superior al del casco, a fin de asegurar un cierre adecuado. Por ello se ha aumentado una fracción comercial respecto a lo calculado en los acumuladores A-6, A-7 y A-8.

### A5.C2.3.3. Diseño mecánico (III). Determinación del espesor del aislamiento y de la chapa envolvente

Se tienen los siguientes espesores, redondeados al mayor entre las situaciones de temperatura de operación superior a la ambiental y viceversa:

Espesores de aislamiento	
Acumulador	$t_{ais}$ (mm)
A-1	40
A-2 y A-3	30
A-4 y A-5	25
A-6, A-7 y A-8	40

Tabla. A5.XXX. Espesores de aislamiento

El espesor de la envolvente se mantiene respecto del anterior capítulo de diseño mecánico de "SIMPLE". En definitiva, se tiene como espesor de la envolvente de aluminio:

$$t_{env} = 0,61 \text{ mm}$$

Según normas ASTM B 209, incluirá recubrimiento corrosivo a base de papel *kraft* con película de polietileno para protección contra intemperie.

#### A5.C2.3.4. Diseño mecánico (IV). Determinación del peso del aparato en operación

Peso de los acumuladores		
Acumulador	$m_{agua, rec}$ (lb)	$m_{acum, op}$ (lb)
A-1	34238,349	40172,880
A-2 y A-3	18196,228	21363,400
A-4 y A-5	18196,228	21348,186
A-6, A-7 y A-8	3606,743	4763,992

Tabla. A5.XXXI. Estimación del peso de los acumuladores

Siendo  $m_{acum, op}$  el peso del acumulador en operación, (contando armado y líquido).

#### A5.C2.3.5. Diseño mecánico (V). Diseño del soporte

El diseño de las siletas viene normalizado según el código STD-RP-004 de *CEPSA*, cuyas figuras se proporcionan al final del capítulo sexto del anexo segundo. Así, se tienen las siguientes dimensiones:

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Cálculo del soporte: Acumulador A-1					
<b>D<sub>e</sub> (mm)</b>	1738,57 (1800 mm)	<b>L (mm)</b>	7010,4	<b>A (mm)</b>	1585
<b>B (mm)</b>	1090	<b>C (mm)</b>	12	<b>D (mm)</b>	16
<b>E (mm)</b>	630	<b>F (mm)</b>	130	<b>b (mm)</b>	200
<b>H (mm)</b>	45	<b>φ (mm)</b>	22	<b>* (mm)</b>	330

Tabla. A5.XXXII. Diseño de las silletas para el acumulador A-1

Cálculo del soporte: Acumulador A-2 y A-3					
<b>D<sub>e</sub> (mm)</b>	1410,595 (1500 mm)	<b>L (mm)</b>	5638,8	<b>A (mm)</b>	1325
<b>B (mm)</b>	940	<b>C (mm)</b>	12	<b>D (mm)</b>	16
<b>E (mm)</b>	500	<b>F (mm)</b>	130	<b>b (mm)</b>	200
<b>H (mm)</b>	45	<b>φ (mm)</b>	22	<b>* (mm)</b>	304

Tabla. A5.XXXIII. Diseño de las silletas para los acumuladores A-2 y A-3

Cálculo del soporte: Acumulador A-4 y A-5					
<b>D<sub>e</sub> (mm)</b>	1410,595 (1500 mm)	<b>L (mm)</b>	5638,8	<b>A (mm)</b>	1325
<b>B (mm)</b>	940	<b>C (mm)</b>	12	<b>D (mm)</b>	16
<b>E (mm)</b>	500	<b>F (mm)</b>	130	<b>b (mm)</b>	200
<b>H (mm)</b>	45	<b>φ (mm)</b>	22	<b>* (mm)</b>	304

Tabla. A5.XXXIV. Diseño de las silletas para los acumuladores A-4 y A-5

Cálculo del soporte: Acumulador A-6, A-7 y A-8					
<b>D<sub>e</sub> (mm)</b>	871,795 (900 mm)	<b>L (mm)</b>	3352,8	<b>A (mm)</b>	805
<b>B (mm)</b>	635	<b>C (mm)</b>	10	<b>D (mm)</b>	12
<b>E (mm)</b>	255	<b>F (mm)</b>	100	<b>b (mm)</b>	150
<b>H (mm)</b>	40	<b>φ (mm)</b>	20	<b>* (mm)</b>	232

Tabla. A5.XXXV. Diseño de las silletas para los acumuladores A-6 y A-7 y A-8

Donde  $D_e$  corresponde al diámetro externo, (el que suma al interno los dobles espesores por presión interna aislamiento y envolvente). El código solicita redondear a la siguiente magnitud disponible y ésta es la indicada entre paréntesis junto al diámetro externo. El resto de dimensiones están dadas en función de este redondeo.

El espesor de la placa de desgaste, sumado al de la silleta deberá resultar 16 mm, (si el espesor de la silleta fuera superior, se prescindiría de dicha placa). Por último, debe indicarse el material de

construcción de las silletas que deberá ser, tanto para el soporte como para la placa de desgaste acero al carbono según SA-515 grado 70.

A5.C2.3.6. Diseño mecánico (VI). Cálculo de las tubuladuras y refuerzos

Se muestran las dimensiones de las tubuladuras de entrada y salida de líquido correspondientes a los acumuladores, así como de sus anillos de refuerzo cuando proceda. Se prescinde de mostrar los pesos, que ya han sido considerados en  $m_{acum, op}$  dos apartados más atrás.

Acumulador	Tubuladuras de los acumuladores		Dimensiones de los refuerzos	
	Tubuladura de entrada	Tubuladura de salida	$a_{ref}$ (in)	$t_{ref}$ (in)
<b>A-1</b>	6" Sch 10 (P-35)	6" Sch 10 (P-36)	3,178	0,3125
<b>A-2</b>	6" Sch 40 (P-49)	6" Sch 40 (P-50)	3,032	0,25
<b>A-3</b>	6" Sch 40 (P-59)	6" Sch 40 (P-60)	3,032	0,25
<b>A-4</b>	5" Sch 10 (P-70)	5" Sch 10 (P-71)	2,524	0,25
<b>A-5</b>	5" Sch 10 (P-80)	5" Sch 10 (P-81)	2,524	0,25
<b>A-6</b>	6" Sch 10 (P-97)	6" Sch 10 (P-98)	3,178	0,25
<b>A-7</b>	6" Sch 10 (P-109)	6" Sch 10 (P-110)	3,178	0,25
<b>A-8</b>	6" Sch 10 (P-123)	6" Sch 10 (P-124)	3,178	0,25

Tabla. A5.XXXVI. Tubuladuras y refuerzos de las conducciones asociadas a los acumuladores

Todas las bridas se construirán en acero forjado según especificación SA-105 y se insertarán en los acumuladores soldadas a un tubo de 4-1/2 pulgadas de longitud, (el saliente correspondiente según la figuras A2.19 y A2.20).

Por mor de lo indicado en capítulos previos procede reforzar todas las bridas, ya que su diámetro nominal supera las 3 pulgadas.

El refuerzo para las bridas consiste en un anillo que debe reponer la cantidad de metal eliminado por la abertura del, casco o cabezales, al perforarlo. El anillo de refuerzo se construye del mismo

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

material que el casco y cabezales, (acero al carbono según especificación SA-285 grado C).

### A5.C6.3.7. Cálculo de orejas de izado y pintado del casco y cabezales

Los recipientes debe construirse incluyendo al menos un par de orejas de izado como las que muestra la Figura A2.15: eslabones atornillados a una base, con forma de oreja, soldada al casco. Se tienen las siguientes dimensiones:

Cálculo de las orejas de izado: A-1					
<b>S (psi)</b>	17500	<b>W (lb)</b>	5934,531 (6375 lb)	<b>D (in)</b>	0,875
<b>D<sub>1</sub> (in)</b>	1	<b>H (in)</b>	1,19	<b>A (in)</b>	1,55
<b>B (in)</b>	1,75	<b>E (in)</b>	2,25	<b>t (in)</b>	<b>0,136</b>

Tabla. A5.XXXVII. Dimensiones de orejas de izado. Acumulador A-1

Cálculo de las orejas de izado: A-2 y A-3					
<b>S (psi)</b>	17500	<b>W (lb)</b>	3167,172 (4420 lb)	<b>D (in)</b>	0,75
<b>D<sub>1</sub> (in)</b>	0,875	<b>H (in)</b>	1,13	<b>A (in)</b>	1,47
<b>B (in)</b>	1,5	<b>E (in)</b>	2,12	<b>t (in)</b>	<b>0,085</b>

Tabla. A5.XXXVIII. Dimensiones de orejas de izado. Acumuladores A-2 y A-3

Cálculo de las orejas de izado: A-4 y A-5					
<b>S (psi)</b>	17500	<b>W (lb)</b>	3167,172 (4420 lb)	<b>D (in)</b>	0,75
<b>D<sub>1</sub> (in)</b>	0,875	<b>H (in)</b>	1,13	<b>A (in)</b>	1,47
<b>B (in)</b>	1,5	<b>E (in)</b>	2,12	<b>t (in)</b>	<b>0,085</b>

Tabla. A5.XXXIX. Dimensiones de orejas de izado. Acumulador A-4 y A-5

Cálculo de las orejas de izado: A-6, A-7 y A-8					
<b>S (psi)</b>	17500	<b>W (lb)</b>	3167,172 (1600 lb)	<b>D (in)</b>	0,4375
<b>D<sub>1</sub> (in)</b>	0,5	<b>H (in)</b>	0,63	<b>A (in)</b>	0,82
<b>B (in)</b>	0,875	<b>E (in)</b>	1,16	<b>t (in)</b>	<b>0,053</b>

Tabla. A5.XL. Dimensiones de orejas de izado. Acumuladores A-6, A-7 y A-8

La tabla de dimensiones relacionadas con el peso se ha tomado del libro de *Megyesy* y se muestra en la Figura A2.16. Los pesos de recipiente se han tomado como la diferencia del total en operación ( $m_{\text{acum, op}}$ ) y el de líquido ( $m_{\text{agua, rec}}$ ). El redondeo aplicado al peso, (con el que están ligadas las dimensiones de las orejas) se indica entre paréntesis en las tablas A5.XXXVII a A5.XL.

El espesor de las orejas se redondea a 3/16 in. La soldadura se practica directamente al casco, (que también debe incluir clips de sujeción para el aislamiento y la chapa envolvente). Para la dimensión de la soldadura se considera la tabla de la Figura A2.17.

Puesto que el espesor de la placa más gruesa, (a la sazón el casco cuyo mayor espesor es de 3/8 de pulgada, para el acumulador A-1, frente a la oreja de 3/16 de pulgada), el tamaño de la soldadura de filete, o angular, será de 3/16 de pulgada. Esta dimensión corresponde al cateto del triángulo rectángulo isósceles mayor que puede inscribirse en el cordón.

Según normas, la longitud de la unión debe estar comprendida entre 15 y 60 veces el tamaño de la garganta, (la hipotenusa correspondiente al triángulo anterior). Así, se tiene:

$$l_{\text{sold}}(\text{in}) = 30 \cdot a(\text{in}) = 30 \cdot \sqrt{(3/16)^2 + (3/16)^2} \cong 8 \text{ in}$$

Donde  $a$  es la dimensión de la garganta, calculada a partir del teorema de *Pitágoras*. La longitud de la oreja será de 8 pulgadas.

Por último, las orejas de izado se colocan, según recomendaciones de ubicación tomadas de *Megyesy*, a 0,207 veces la longitud total del recipiente, (la oreja superior se coloca a una longitud igual a la total menos la cantidad mencionada).

En lo tocante a la pintura, es éste un elemento importante de protección frente a la corrosión bajo aislamiento. En lo tocante a la pintura, es éste un elemento importante de protección frente a la co-

rosión bajo aislamiento, como queda explicado en el capítulo primero del segundo anexo.

Se tienen los siguientes requerimientos de pintura por parte de los acumuladores:

<b>Peso de los acumuladores</b>	
<b>Acumulador</b>	<b>V<sub>pintura</sub> (gal (US))</b>
<b>A-1</b>	<b>0,596</b>
<b>A-2 y A-3</b>	<b>0,777</b>
<b>A-4 y A-5</b>	<b>0,777</b>
<b>A-6, A-7 y A-8</b>	<b>0,423</b>

Tabla. A5.XLI. Cálculo de volumen de pintura

Se ha seleccionado un sistema de pinturas siguiendo especificaciones del *Steel Structures Painting Council, (SSPC)*. Dicho sistema viene recomendado para ambientes secos, no corrosivos en interior de edificios o protegidos temporalmente contra intemperie. No se han considerado condiciones excesivamente severas, ya que la mayor parte del tiempo la estructura estará guarnecida por el aislamiento y chapa envolvente.

La identificación del sistema viene dada por SSPC-PS 7.01. No obliga al tratamiento previo, (sólo una limpieza de contaminantes superficiales del casco: grasa, tierra, entre otros componentes), y requiere un espesor de pintura seca de una milésima de pulgada. En la Tabla A5.XLI se han tabulado los datos obtenidos por aplicación del procedimiento seguido en capítulos precedentes. Se ha considerado la contribución de todos los equipos en cada caso.

---

### **Capítulo A5.C3. Estimación de cambiadores de calor**

#### **A5.C3.1. Introducción**

El diseño en profundidad de la red de intercambio de calor, así como su optimización son, como se viene describiendo a lo largo de éste primer documento, objetivos de un proyecto de ingeniería básica y de detalle.

Por su carácter de pre-ingeniería básica, el presente PFC abordará exclusivamente el cálculo de los calores involucrados en las distintas unidades de intercambio de calor, sin precisar aspectos de diseño que se reservan a futuras revisiones y expansiones del proyecto.

La intención es encontrar el área de intercambio, de modo que pueda aquilatarse de modo razonable la partida presupuestaria correspondiente a estos equipos.

#### **A5.C3.2. Fundamento teórico**

En un cambiador sucede la transferencia de calor entre una corriente de proceso, cuya temperatura se pretende acondicionar, y un fluido auxiliar apropiado a las condiciones en que dicha transferencia tendrá lugar.

En la memoria descriptiva, capítulo sexto, se realizó un desglose con los equipos previstos para la planta. Asimismo, se sugirió una solución para la elección del equipo y de los fluidos auxiliares de intercambio. Procede en este anexo justificar las áreas de intercambio correspondientes a los distintos cambiadores, en base a los cálculos que se presentan en el fundamento teórico.

Se requerirá el uso de calderines, asociados a las operaciones de destilación, condensadores, asociados a las anteriores y a las operaciones de separación en etapa simple, así como cambiadores

para aumentar y disminuir la temperatura de algunas corrientes de carga a los distintos procesos.

En el caso de los calderines, se tendrá una doble operación: calentamiento y separación gas-líquido, puesto que el líquido alimentado, procedente de los fondos de columnas, debe vaporizarse parcialmente y reciclarse a las mismas.

Los condensadores serán totales, esto es, licuarán completamente el caudal de vapor que les acomete.

Finalmente, los cambiadores para aumento o disminución de la temperatura de corrientes de proceso funcionarán sin cambio de fase, modificando, según las condiciones del proceso, unos grados la temperatura de las distintas corrientes. Se dedica un apartado a cada tipo de equipo previa presentación de resultados.

#### A5.C3.2.1. Cálculo de calderines

El calor en juego en las corrientes de fondo que ingresan en los calderines viene dado por:

$$Q \left( \frac{\text{Mcal}}{\text{h}} \right) = \lambda \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \cdot \bar{W} \left( \frac{\text{kmol}}{\text{h}} \right) \cdot PM \left( \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right) \cdot \frac{1 \text{ MJ}}{10^3 \text{ kJ}} \cdot \frac{1 \text{ Mcal}}{4,1858 \text{ MJ}} \quad (A5.5)$$

Donde el calor, Q, se calcula a partir del producto del calor latente de vaporización de la corriente,  $\lambda$  y su caudal molar  $\bar{W}$ . En la ecuación (4.5) se han incluido los cambios de unidades oportunos para que ésta resulte coherente: puesto que se dispone de datos de caudal de corrientes en términos molares, será preciso multiplicar por el peso molecular a fin de hallar el caudal másico.

El calor latente de vaporización de las sustancias es la energía desprendida cuando la unidad de masa modifica su estado de líquido a vapor, que es justo el cambio que sucede en los calderines.

Sea la ecuación de diseño de los cambiadores de calor:

$$Q \left( \frac{\text{Mcal}}{\text{h}} \right) = U \left( \frac{\text{Mcal}}{\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \cdot A (\text{m}^2) \cdot \Delta T (\text{K}) \quad (\text{A5.6})$$

Donde el calor involucrado, Q, en el área, A, de intercambio de calor, es proporcional al salto de temperatura  $\Delta T$  y al coeficiente global de transporte de calor.

Se mostrará un ejemplo de cálculo para el calderín de la operación “EXTRACTIVA 1”. Sean los siguientes datos:

Calderín E-6					
(Calderín de EXTRACTIVA 1)				% Vaporización	66,42
Composición líquido a calderín					
$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$
0,641	0,000	0,133	0,125	0,000	0,101
kmol/h (1)	kmol/h (2)	kmol/h (3)	kmol/h (4)	kmol/h (5)	kmol/h (6)
2506,494	0,000	522,077	488,584	0,000	394,676
L' (kmol/h)	3911,831	T fría (K)	302,810	T caliente (K)	303,917
P (atm)	3	PM (kg/kmol)	58,851	$\lambda$ (kJ/kg)	396,800
Q (kcal/h)	13527,500	U (W/m <sup>2</sup> ·K)	2,399	A (m <sup>2</sup> )	140,982

Tabla. A5.XLII. Ejemplo de cálculo: Calderín de “EXTRACTIVA 1”

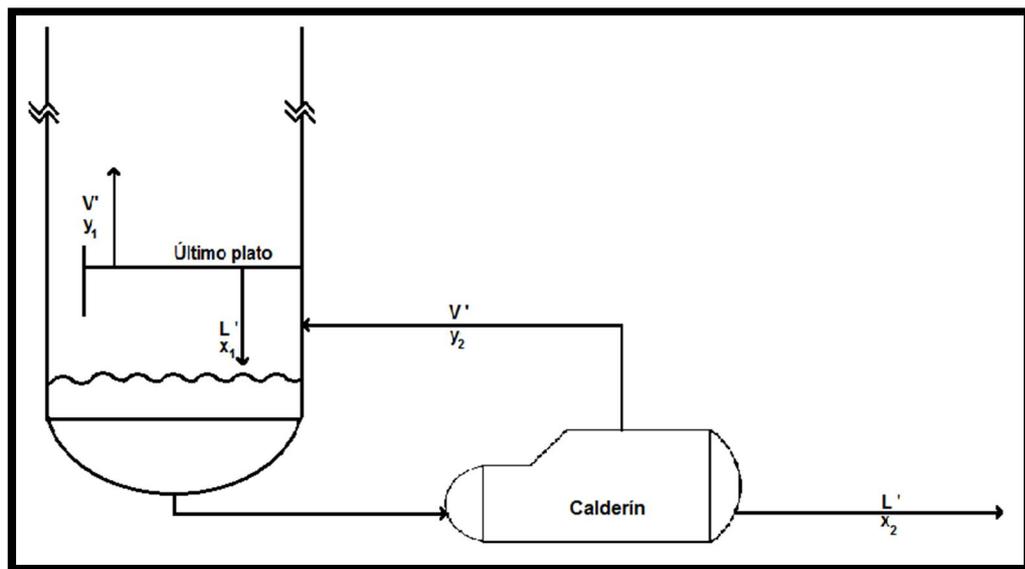


Figura. A5.12. Esquema de corrientes finales de columna. (Elaboración propia)

En el esquema de la Figura A5.12 se presentan las últimas corrientes de una columna de platos: por el subíndice 1 se notan el vapor que parte del plato último a su inmediato superior y su líquido de equilibrio, que abandona la columna y se introduce en el calderín. La composición de ésta última corriente es la que figura directamente tabulada en A5.XLII, y se ha calculado por generalización de la ecuación (A2.96.2), esto es, la ecuación de la recta de operación para la zona de agotamiento. Debidamente despejada se obtiene:

$$x_{m-1} = \frac{y_m + W/V' x_w}{L'/V'} \quad (A5.7)$$

La corriente con la que se ha trabajado hasta este punto, ha sido en toda ocasión el residuo de las columnas, si bien, puesto que se pretende determinar la composición del líquido saliente de la columna, deberá relacionarse ésta con la de residuo conocido. La composición del residuo está en equilibrio con el vapor recirculado, (y presenta la composición y temperatura mostrada en el anexo primero), de modo que, conocida la composición de este vapor, la del líquido que abandona columna se obtiene por aplicación de (A5.7) sobre estas composiciones y los conocidos caudales de  $L'$  y  $V'$ , (líquido y vapor en la sección de agotamiento) y  $W$  (corriente de residuo), así como la composición del residuo,  $x_w$ .

La ecuación (A5.7) se obtuvo para un sistema de destilación binario, si bien se ha tomado como aproximación, extendiendo la ecuación a todos los componentes presentes en las distintas destilaciones multicomponente. Una vez conocida la composición del líquido que abandona la columna siguiendo el procedimiento descrito, se genera la temperatura mediante los procedimientos realizados en el anexo primero, (en el caso de "EXTRACTIVA 1", se trata de los equilibrios 4 y 5, cuyo origen quedó pendiente por explicar y en este apartado se da cumplida justificación).

Conocida la corriente de alimento al calderín, así como el vapor y el líquido, (residuo) que lo abandonan; tanto como la temperatura

de la primera y las últimas, (se encuentran en equilibrio), puede estimarse el calor requerido por aplicación de (A5.6).

Tal ecuación requerirá sólo el dato del calor latente: como se puede apreciar, el salto de temperatura entre la corriente fría y caliente es mínimo, y se tomará la hipótesis de calor sensible despreciable frente a calor latente. Este dato, junto al coeficiente global de transporte se ha tomado, introduciendo los datos de las distintas corrientes en un software de simulación y se tabulará junto a las tablas de resultados en la siguiente sección.

La ecuación (A5.6) tomará como caudal molar, aquél porcentaje del líquido que abandona la columna indicado en la Tabla A5.XLII. El tanto por ciento de vaporización tabulado se obtiene dividiendo el caudal de vapor que se recircula a la columna en cuestión, ( $V'$  de "EXTRACTIVA 1", en el ejemplo en curso), por el líquido que abandona la columna, ( $L'$  de "EXTRACTIVA 1"). Dicho tanto por ciento coincide con la corriente  $V'$  alimentada.

Finalmente, el área de intercambio se calcula despejando convenientemente de (A5.7) y tomando el salto de temperatura que se produce en el vapor de baja presión, usado como fluido calefactor.

Suponiendo un salto del vapor saturado de 100 a 60°C, se tomará  $\Delta T = 40$  K.

Los calores y áreas de todos los calderines se obtienen aplicando el procedimiento descrito.

#### A5.C3.2.2. Cálculo de condensadores

El calor en juego en las corrientes de cabeza que ingresan en los calderines viene dado por (A5.5) y el área de intercambio, por (A5.6).

Las consideraciones efectuadas en el apartado anterior son válidas aplicando el razonamiento contrario: Si en los calderines un lí-

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

quido vaporiza involucrando requiriendo la unidad de masa un calor latente determinado, en este caso, el vapor de cabezas de las distintas operaciones cede su calor latente a un fluido refrigerante, condensando en el aparato de intercambio.

Se mostrará un ejemplo de cálculo para el condensador de la operación “EXTRACTIVA 1”. Sean los siguientes datos:

Condensador E-7					
(Condensador de EXTRACTIVA 1)					
Composición vapor a calderín					
$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_6$
0,011	0,677	0,206	0,000	0,106	0,000
kmol/h (1)	kmol/h (2)	kmol/h (3)	kmol/h (4)	kmol/h (5)	kmol/h (6)
29,284	1759,118	535,169	0,000	274,597	0,000
V (kmol/h)	2598,169	T caliente (K)	297,713	T fría (K)	297,688
P (atm)	3	PM (kg/kmol)	56,298	$\lambda$ (kJ/kg)	359,100
Q (kcal/h)	-12594,000	U (W/m <sup>2</sup> ·K)	2,399	A (m <sup>2</sup> )	350,008

Tabla. A5.XLIII. Ejemplo de cálculo: Condensador de “EXTRACTIVA 1”

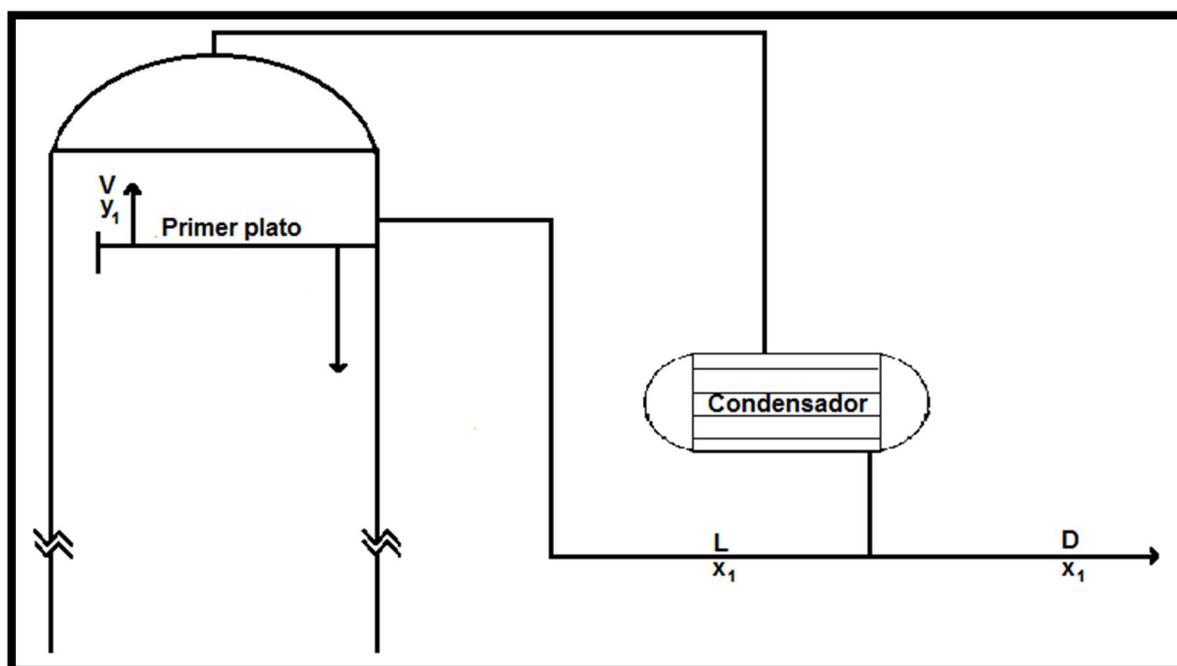


Figura. A5.13. Esquema de primeras corrientes de columna. (Elaboración propia)

En el esquema de la Figura A5.13 se presentan las primeras corrientes de una columna de platos. Todas presentan la misma composición por ser el condensador total. Los datos de equilibrio del anexo primero proporcionan la composición y temperatura del destilado, así como datos, (equilibrios 6 y 7) para interpolar en la composición de un vapor que presente la misma composición del destilado, (como es el caso), la temperatura.

Conocidas las temperaturas, se aplican las ecuaciones (A5.5) y (A5.6) en las mismas condiciones que el caso anterior, considerando en esta ocasión el salto del fluido refrigerante, (agua a 7 °C), de 15 K, (se supone que el agua de refrigeración saldrá 15 °C más caliente tras condensar el vapor).

Los calores y áreas de todos los condensadores se obtienen aplicando el procedimiento descrito. En concreto, los calores de los condensadores, como el que figura en la Tabla A5.XLIII se presentan con signo negativo, que indica, cualitativamente, cesión de calor por parte del fluido de proceso, (como es evidente, una energía no puede ser negativa).

#### A5.C3.2.3. Cálculo de calentadores y refrigerantes

Por último, el calor y área de transferencia involucradas en los intercambiadores aplicados al calentamiento o refrigeración de corrientes, sin cambio de fase, se obtienen, el primero mediante:

$$Q \left( \frac{\text{Mcal}}{\text{h}} \right) = C_p \left( \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \right) \cdot \bar{W} \left( \frac{\text{kmol}}{\text{h}} \right) \cdot PM \left( \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right) \cdot \Delta T(\text{K}) \frac{1 \text{ MJ}}{10^6 \text{ J}} \cdot \frac{1 \text{ Mcal}}{4,1858 \text{ MJ}} \quad (\text{A5.8})$$

Y el segundo por aplicación de (A5.6), considerando en este caso el salto de temperatura como la diferencia entre el fluido caliente y el frío a su entrada. (Recuérdese, para calentamiento se emplea vapor saturado a 100 °C y para enfriamiento agua refrigerada a 7 °C).

El calor específico a presión constante  $C_p$  también se ha obtenido por simulación de las corrientes y el salto de temperatura, por

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

estar referida (A5.8) a la corriente del fluido de proceso, es la diferencia de temperaturas entre la fría y la caliente de dicho fluido, (no debe confundirse con el salto de temperatura del cambiador, entre las temperaturas más caliente y fría de los dos fluidos involucrados).

### **A5.C3.3. Calores y áreas de intercambio**

Se presenta el resumen de resultados tras aplicar el procedimiento indicado en el fundamento teórico.

<b>Designación</b>	<b>Función</b>	<b>Unidad</b>	<b>C<sub>p</sub></b> (J/kg·K)	<b>λ</b> (kJ/kg)	<b>Q</b> (Mcal/h)	<b>A</b> (m <sup>2</sup> )
<b>E-1</b>	Condensador	SIMPLE	-	378,000	-7589,420	210,923
<b>E-2</b>	Condensador	SIMPLE	-	378,000	-7589,420	210,923
<b>E-3</b>	Condensador	SIMPLE	-	378,000	-7589,420	210,923
<b>E-4</b>	Condensador	SIMPLE	-	378,000	-7589,420	210,923
<b>E-5</b>	Calentador	BLEND./EXTR. 1	1967,723	-	603,420	11,482
<b>E-6</b>	Calderín	EXTR. 1	-	396,800	13527,50	140,982
<b>E-7</b>	Condensador	EXTR. 1	-	359,100	-12594,00	350,008
<b>E-8</b>	Calderín	EXTR. 2	-	407,100	14782,30	154,059
<b>E-9</b>	Condensador	EXTR. 2	-	392,700	-13326,60	370,369
<b>E-10</b>	Calderín	EXTR. 2	-	407,100	14782,30	154,059
<b>E-11</b>	Condensador	EXTR. 2	-	392,700	-13326,60	370,369
<b>E-12</b>	Calderín	MÚLT.	-	396,900	10101,300	105,275
<b>E-13</b>	Condensador	MÚLT.	-	392,600	-9792,68	272,155
<b>E-14</b>	Calderín	MÚLT.	-	396,900	10101,300	105,275
<b>E-15</b>	Condensador	MÚLT.	-	392,600	-9792,68	272,155
<b>E-16</b>	Calderín	BINARIA	-	381,400	13391,100	139,560
<b>E-17</b>	Condensador	BINARIA	-	368,600	-13140,00	365,183
<b>E-18</b>	Calderín	BINARIA	-	381,400	13391,100	139,560
<b>E-19</b>	Condensador	BINARIA	-	368,600	-13140,00	365,183
<b>E-20</b>	Calderín	BINARIA	-	381,400	13391,100	139,560
<b>E-21</b>	Condensador	BINARIA	-	368,600	-13140,00	365,183
<b>E-22</b>	Refrigerante	EXTR.2/REC.				
<b>E-23</b>	Condensador	REC.				
<b>E-24</b>	Refrigerante	EXTR.1/EXTR.2	1743,641	-	-3566,020	62,548
<b>E-25</b>	Calentador	MÚLT./BINARIA	2094,712	-	129,165	2,725

Tabla. A5.XLIV. Ejemplo de cálculo: Condensador de “EXTRACTIVA 1”

Las unidades E-22 y E-23, el refrigerador de la alimentación de “RECUPERACIÓN” y su condensador respectivamente, son unidades que trabaja a una temperatura para la que no es suficiente el agua de refrigeración a 7 °C, (manejan temperaturas en torno a 5 °C como se muestra a lo largo de los anexos), por lo que serán objeto de un estudio como unidades criogénicas.



---

### **Capítulo A5.C4. Dimensionado de tanques**

Como último capítulo de los anexos, procede describir el procedimiento de dimensionado de los tanques, esto es, la estimación de sus medidas, espesor de elementos estructurales y dimensiones del cubeto de contención.

#### **A5.C4.1. Diseño de los tanques cilíndricos**

Puesto que la memoria descriptiva presenta las corrientes y condiciones en que se produce el almacenamiento en los tanques cilíndricos, no se redundará en el presente capítulo, presentándose exclusivamente los datos que justifican la elección de los valores en aquélla señalados.

Conocidos y justificados los volúmenes de almacenaje, procede obtener las dimensiones de los tanques a partir de la Figura A5.14, tomada del código *API 650*. Para el tanque T-1, se redondea su volumen a 4,6 Mgal (US), (17413 m<sup>3</sup>), lo que proporciona unas dimensiones de 40 ft de altura y 140 de diámetro.

De igual forma, para el tanque T-2 se redondea su volumen a 1,25 Mgal (US), (4732 m<sup>3</sup>), lo que proporciona unas dimensiones de 40 ft de altura y 140 de diámetro.

Seguidamente, se aplican las directrices de diseño mecánico procuradas por la norma *API 650*. Serán objeto de diseño tanto el espesor del casco, como el del fondo, techo fijo y flotante.

Para el espesor del casco, la norma señala las siguientes vías de cálculo: por condiciones de diseño y por prueba hidráulica. El mayor de los espesores será el escogido. En todo caso, el espesor nunca será menor que el indicado en la Figura A5.15. A la sazón, el espesor de mínimo de los tanques será: para T-1, 8 mm (5/16 in) y para T-2, 6 mm (1/4 in).

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

API Standard Tank Sizes							
Barrels	Gallons	Dia. x Ht	Weight (lbs)	Barrels	Gallons	Dia. x Ht	Weight (lbs)
500	21,000	15'-0" x 16'-0"	11,200	16,800	700,000	50'-0" x 48'-0"	135,500
1,000	41,000	21'-0" x 16'-0"	18,800	18,100	760,000	57'-0" x 40'-0"	147,000
1,150	48,000	18'-6" x 24'-0"	19,600	20,100	840,000	60'-0" x 40'-0"	156,500
1,200	50,000	23'-0" x 16'-0"	21,500	24,100	1,010,000	60'-0" x 48'-0"	184,000
1,500	63,000	26'-0" x 16'-0"	25,000	24,375	1,023,000	66'-0" x 40'-0"	186,500
1,750	75,000	23'-0" x 24'-0"	26,000	25,100	1,050,000	67'-0" x 40'-0"	191,000
2,000	88,000	25'-0" x 24'-0"	29,000	27,400	1,150,000	70'-0" x 40'-0"	205,600
2,500	102,000	27'-0" x 24'-0"	32,100	29,800	1,250,000	73'-0" x 40'-0"	221,000
3,000	126,000	30'-0" x 24'-0"	37,200	30,100	1,260,000	67'-0" x 48'-0"	225,100
3,650	153,000	33'-0" x 24'-0"	42,400	32,900	1,380,000	70'-0" x 48'-0"	244,000
4,000	170,000	30'-0" x 32'-0"	43,500	35,700	1,500,000	73'-0" x 48'-0"	264,200
4,850	204,000	33'-0" x 32'-0"	49,500	35,800	1,500,000	80'-0" x 40'-0"	264,000
5,000	210,000	33'-6" x 32'-0"	50,500	40,420	1,700,000	85'-0" x 40'-0"	293,000
5,000	210,000	30'-0" x 40'-0"	50,000	42,910	1,800,000	80'-0" x 48'-0"	315,900
5,500	230,000	35'-0" x 32'-0"	53,300	45,300	1,900,000	90'-0" x 40'-0"	326,000
6,100	257,000	37'-0" x 32'-0"	57,800	48,300	2,030,000	93'-0" x 40'-0"	347,000
7,150	300,000	40'-0" x 32'-0"	65,000	49,600	2,080,000	86'-0" x 48'-0"	359,000
8,650	364,000	44'-0" x 32'-0"	75,000	54,400	2,280,000	90'-0" x 48'-0"	390,000
8,950	375,000	40'-0" x 40'-0"	74,000	55,900	2,350,000	100'-0" x 40'-0"	394,000
9,650	407,000	46'-6" x 32'-0"	85,900	67,100	2,820,000	100'-0" x 48'-0"	472,000
10,100	424,000	42'-6" x 40'-0"	83,000	67,700	2,840,000	110'-0" x 40'-0"	473,000
10,310	433,000	48'-0" x 32'-0"	85,000	80,600	3,380,000	120'-0" x 40'-0"	574,000
10,700	450,000	40'-0" x 48'-0"	86,300	81,250	3,410,000	110'-0" x 48'-0"	570,000
10,800	455,000	44'-0" x 40'-0"	87,100	96,700	4,060,000	120'-0" x 48'-0"	681,000
12,100	508,000	46'-6" x 40'-0"	96,000	100,470	4,220,000	134'-0" x 40'-0"	699,000
12,100	509,000	52'-0" x 32'-0"	107,000	109,700	4,600,000	140'-0" x 40'-0"	765,000
12,100	510,000	42'-6" x 48'-0"	95,600	120,560	5,060,000	134'-0" x 48'-0"	846,000
12,900	540,000	48'-0" x 40'-0"	99,300	125,900	5,290,000	150'-0" x 40'-0"	871,000
14,000	580,000	50'-0" x 40'-0"	121,200	131,600	5,530,000	140'-0" x 48'-0"	920,000
15,100	635,000	52'-0" x 40'-0"	125,000	143,200	6,020,000	160'-0" x 40'-0"	985,000
15,400	650,000	48'-0" x 48'-0"	117,200	151,000	6,350,000	150'-0" x 48'-0"	1,050,000
Barrels	Gallons	Dia. x Ht	Weight (lbs)	Barrels	Gallons	Dia. x Ht	Weight (lbs)

Figura. A5.14. Dimensiones estándar de tanques. (Norma API 650)

Nominal Tank Diameter		Nominal Plate Thickness	
(m)	(ft)	(mm)	(in.)
< 15	< 50	5	3/16
15 to < 36	50 to < 120	6	1/4
36 to 60	120 to 200	8	5/16
> 60	> 200	10	3/8

Figura. A5.15. Mínimos espesores de casco según diámetro. (Norma API 650)

Adicionalmente, el material seleccionado también prescribe un espesor mínimo que deberá respetarse. La norma *API 650* establece un espesor mínimo para aceros de 3/16 in (4,76 mm), que, en este caso es superada por el mínimo espesor de casco enunciado anteriormente, (se estará como mínimo al espesor indicado para el casco, puesto que es más restrictivo que el referido al material de construcción).

Conocidas las dos restricciones anteriores, la expresión que proporciona el espesor por condiciones de diseño es la que sigue:

$$t_d(\text{mm}) = \frac{4,9 \cdot D(\text{m}) \cdot [h_{\text{liq}}(\text{m}) - 0,3048] \cdot G}{S_d(\text{MPa})} \quad (\text{A5.9})$$

Donde el espesor de diseño del casco,  $t_d$ , se calcula conocidos el diámetro  $D$ , la altura del líquido en el tanque,  $h_{\text{liq}}$ , la densidad relativa de la sustancia almacenada,  $G$  y la tensión máxima admisible en condiciones de diseño.

La altura del líquido en el tanque se calcula dividiendo el volumen de líquido, (véase hoja de datos del tanque en la memoria descriptiva) por el área de la base, calculada como el área de un círculo del diámetro del tanque.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

La densidad relativa se obtiene dividiendo por  $1000 \text{ kg/m}^3$ , (la densidad del agua a que se refiere), la densidad, para el caso del tanque T-1, de la corriente U de “BLENDING” a la temperatura de almacenamiento; para el tanque T-2, la densidad del furfural. En ambos casos, la densidad se calcula como se ha mostrado en los anexos segundo y tercero, conocidas las composiciones de las corrientes y su temperatura, tabulada en las hojas de datos de los tanques en la memoria descriptiva.

Finalmente, el esfuerzo máximo admisible en condiciones de diseño para el tanque se toma de la siguiente figura, para acero al carbono según SA-285 grado C:

Plate Specification	Grade	Minimum Yield Strength MPa (psi)	Minimum Tensile Strength MPa (psi)	Product Design Stress $S_d$ MPa (psi)	Hydrostatic Test Stress $S_t$ MPa (psi)
ASTM Specifications					
A 283M (A 283)	C (C)	205 (30,000)	380 (55,000)	137 (20,000)	154 (22,500)
A 285M (A 285)	C (C)	205 (30,000)	380 (55,000)	137 (20,000)	154 (22,500)
A 131M (A 131)	A, B, CS (A, B, CS)	235 (34,000)	400 (58,000)	157 (22,700)	171 (24,900)
A 36M (A 36)	—	250 (36,000)	400 (58,000)	160 (23,200)	171 (24,900)
A 131M (A 131)	EH 36 (EH 36)	360 (51,000)	490 <sup>a</sup> (71,000 <sup>a</sup> )	196 (28,400)	210 (30,400)
A 573M (A 573)	400 (58)	220 (32,000)	400 (58,000)	147 (21,300)	165 (24,000)
A 573M (A 573)	450 (65)	240 (35,000)	450 (65,000)	160 (23,300)	180 (26,300)
A 573M (A 573)	485 (70)	290 (42,000)	485 <sup>a</sup> (70,000 <sup>a</sup> )	193 (28,000)	208 (30,000)
A 516M (A 516)	380 (55)	205 (30,000)	380 (55,000)	137 (20,000)	154 (22,500)
A 516M (A 516)	415 (60)	220 (32,000)	415 (60,000)	147 (21,300)	165 (24,000)
A 516M (A 516)	450 (65)	240 (35,000)	450 (65,000)	160 (23,300)	180 (26,300)
A 516M (A 516)	485 (70)	260 (38,000)	485 (70,000)	173 (25,300)	195 (28,500)
A 662M (A 662)	B (B)	275 (40,000)	450 (65,000)	180 (26,000)	193 (27,900)
A 662M (A 662)	C (C)	295 (43,000)	485 <sup>a</sup> (70,000 <sup>a</sup> )	194 (28,000)	208 (30,000)
A 537M (A 537)	1 (1)	345 (50,000)	485 <sup>a</sup> (70,000 <sup>a</sup> )	194 (28,000)	208 (30,000)
A 537M (A 537)	2 (2)	415 (60,000)	550 <sup>a</sup> (80,000 <sup>a</sup> )	220 (32,000)	236 (34,300)
A 633M (A 633)	C, D (C, D)	345 (50,000)	485 <sup>a</sup> (70,000 <sup>a</sup> )	194 (28,000)	208 (30,000)
A 678M (A 678)	A (A)	345 (50,000)	485 <sup>a</sup> (70,000 <sup>a</sup> )	194 (28,000)	208 (30,000)
A 678M (A 678)	B (B)	415 (60,000)	550 <sup>a</sup> (80,000 <sup>a</sup> )	220 (32,000)	236 (34,300)
A 737M (A 737)	B (B)	345 (50,000)	485 <sup>a</sup> (70,000 <sup>a</sup> )	194 (28,000)	208 (30,000)
A 841M (A 841)	Class 1 (Class 1)	345 (50,000)	485 <sup>a</sup> (70,000 <sup>a</sup> )	194 (28,000)	208 (30,000)

Figura. A5.16. Esfuerzos de diseño y prueba hidráulica admisibles. (API 650)

Se tienen 137 y 154 MPa para esfuerzos máximos admisibles en condiciones de diseño,  $S_d$  y prueba hidráulica,  $S_t$ , respectivamente.

Una vez evaluado el espesor en condiciones de diseño, el de prueba hidráulica se determina de semejante forma según:

$$t_t(\text{mm}) = \frac{4,9 \cdot D(\text{m}) \cdot [h_{liq}(\text{m}) - 0,3048]}{S_t(\text{MPa})} \quad (\text{A5.10})$$

Siendo  $t_t$  el espesor por prueba hidráulica y conocidos todos los términos.

Con lo anterior, queda determinado el espesor del casco: se seleccionará el mayor de ellos, bien en condiciones o en prueba hidráulica, (teniendo en cuenta que no sean inferiores al determinado en la Tabla A5.15, en cuyo caso se tomaría éste) y se le añadirá el sobreespesor por corrosión ya utilizado y justificado en capítulos anteriores.

Por su parte, el espesor del fondo se obtiene a partir de la siguiente figura:

SI Units				
Nominal Plate Thickness <sup>a</sup> of First Shell Course (mm)	Hydrostatic Test Stress <sup>b</sup> in First Shell Course (MPa)			
	≤ 190	≤ 210	≤ 230	≤ 250
$t \leq 19$	6	6	7	9
$19 < t \leq 25$	6	7	10	11
$25 < t \leq 32$	6	9	12	14
$32 < t \leq 38$	8	11	14	17
$38 < t \leq 45$	9	13	16	19

Figura. A5.16. Espesores de fondo en función de  $S_t$ . (Norma API 650)

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 1. Anexos a la memoria

Donde conocido el esfuerzo admisible en condiciones de prueba hidráulica se determina un espesor de fondo de 6 mm, (1/4 in), que coincide con el indicado por la Figura A5.15 para el tanque T-2, pero no para el T-1, cuyo espesor mínimo por norma será de 8 mm (5/16 in).

Se tomará como espesor de techo fijo, fondo y casco el mayor de todos ellos como criterio de homogenización. Finalmente, la norma prescribe un espesor de 1,3 mm para techos flotantes de aluminio. Los cálculos se resumen en las siguientes tablas. Para el tanque T-1 se tiene:

Tanque T-1			
<b>H (ft)</b>	40	<b>D (ft)</b>	140
<b>h<sub>liq</sub> (m)</b>	8,474	<b>G</b>	0,721
<b>t<sub>min</sub> (in)</b>	0,3125	<b>t<sub>min mat</sub> (in)</b>	0,1875
<b>S<sub>d</sub> (MPa)</b>	137	<b>S<sub>h</sub> (MPa)</b>	154
Espesor casco			
<b>t<sub>d</sub> (in)</b>	0,354	<b>t<sub>h</sub> (in)</b>	0,437
<b>C.A. (in) (20 años)</b>	0,1	<b>t (in)</b>	0,537
<b>t<sub>h</sub> (mm)</b>	0,437	<b>t<sub>f</sub> + C.A. (in)</b>	0,537
Espesor fondo			
<b>t<sub>fondo</sub> (mm)</b>	8	<b>t<sub>fondo</sub> + C.A. (in)</b>	0,415
Espesor techo flotante			
<b>t<sub>flot</sub> (mm)</b>	1,3	<b>t<sub>flot</sub> + C.A. (in)</b>	0,151
Espesores comercial seleccionado			
<b>t<sub>casco</sub> (in)</b>	0,5625	<b>9/16"</b>	
<b>t<sub>fondo</sub> (in)</b>	0,4375	<b>7/16"</b>	
<b>t<sub>cuerpos</sub> (in)</b>	<b>9/16"</b>		
<b>t<sub>techo flot</sub> (in)</b>	0,1875	<b>3/16"</b>	

Tabla. A5.XLV. Diseño mecánico de T-1

Se muestra en la tabla los distintos espesores. Para el caso del casco, se selecciona el espesor en condiciones de prueba hidráulica, por suponer el valor más severo. A todos los espesores se les suma el margen por corrosión y se decide redondear comercialmente al valor indicado para los cuerpos, (techo fijo, casco y fondo). También se

participa el espesor indicado para el techo flotante. De igual forma, para T-2, se tiene:

<b>Tanque T-2</b>			
<b>H (ft)</b>	40	<b>D (ft)</b>	73
<b>h<sub>liq</sub> (m)</b>	5,768	<b>G</b>	1,21
<b>t<sub>min</sub> (in)</b>	0,25	<b>t<sub>min mat</sub> (in)</b>	0,1875
<b>S<sub>d</sub> (MPa)</b>	137	<b>S<sub>h</sub> (MPa)</b>	154
<b>Espesor casco</b>			
<b>t<sub>d</sub> (in)</b>	0,207	<b>t<sub>h</sub> (in)</b>	0,152
<b>C.A. (in) (20 años)</b>	0,1	<b>t (in)</b>	0,25
<b>t<sub>min</sub> (mm)</b>	0,25	<b>t<sub>r</sub> + C.A. (in)</b>	0,35
<b>Espesor fondo</b>			
<b>t<sub>fondo</sub> (mm)</b>	6	<b>t<sub>fondo</sub> + C.A. (in)</b>	0,336
<b>Espesor techo flotante</b>			
<b>t<sub>flot</sub> (mm)</b>	1,3	<b>t<sub>flot</sub> + C.A. (in)</b>	0,151
<b>Espesores comercial seleccionado</b>			
<b>t<sub>casco</sub> (in)</b>	0,375	<b>3/8"</b>	
<b>t<sub>fondo</sub> (in)</b>	0,336	<b>3/8"</b>	
<b>t<sub>cuerpos</sub> (in)</b>	<b>3/8"</b>		
<b>t<sub>techo flot</sub> (in)</b>	0,1875	<b>3/16"</b>	

Tabla. A5.XLVI. Diseño mecánico de T-2

Finalmente, para el dimensionado del cubeto, se tendrá en cuenta la especificación *CEPSA* ESP-0200-001, que indica emplear recintos de contención para cada tanque donde éste quedará centrado, y a una distancia de sus muros de al menos la mitad de su diámetro. Para el tanque T-1, la medida mínima sería de 70 ft, (21,34 m), mientras que para el T-2, la medida correspondería a 36,5 ft, (11,12 m).

Por tanto, siendo el cubeto un recinto cuadrado, su lado medirá dos veces la medida mínima más el diámetro del propio tanque. No obstante lo anterior, puesto que la altura del cubeto no podrá ser superior a 1,8 m, es necesario ampliar la medida hasta 33 m en el caso del tanque T-1 y a 17 m, en el tanque T-2.

De esta forma, se obtendría un nivel de líquido, (suponiendo que el tanque vertiese integro su contenido), dado por la siguiente expresión:

$$h_{LA}(m) = \frac{V(m^3)}{[2(d_{M-T}(m)) + D(m)]^2} = \frac{V(m^3)}{L^2(m)} \quad (A5.11)$$

Siendo  $h_{LA}$  el nivel de líquido almacenado en el cubeto,  $V$ , el volumen calculado del tanque,  $d_{M-T}$ , la distancia entre el tanque y los muros del cubeto antedicha, y  $D$  su diámetro. La altura de los muros deberá aumentarse todavía en 150 mm, constituyendo la altura final del cubeto,  $h_{int}$ . El denominador será el lado del cuadrado que forme el cubeto, como se indicó previamente. Se tiene:

Cubeto tanque T-1					
M-T (m)	33	L (m)	109	$h_{int}$ (m)	1,8
Cubeto tanque T-2					
M-T (m)	17	L (m)	56	$h_{int}$ (m)	1,8

Tabla. A5.XLVII. Dimensiones de los cubetos de los tanques T-1 y T-2

### **A5.C4.2. Diseño del tanque esférico**

El espesor de los tanques esféricos se calcula según norma ASME, a partir de la siguiente expresión:

$$t(mm) = \frac{P(kg/cm^2) \cdot R(m)}{2 \cdot S(kg/cm^2) \cdot E - 0,2 \cdot P(kg/cm^2)} \quad (A5.12)$$

Donde el espesor se calcula conocida la presión de diseño,  $P$ , el radio de la esfera,  $R$ , el esfuerzo a la tensión  $S$  para el material seleccionado, (para acero al carbono según SA-285 grado C, 13800 psi, ó 970,236 kg/cm<sup>2</sup>) y  $E$ , eficacia de junta del 85% para las juntas meridionales de la esfera examinadas por zonas.

La presión de diseño se estima a partir de la presión de almacenamiento, (4 atm y 30 psi como se ha indicado en apartados pre-

vios de diseño mecánico), sumando la presión hidrostática en el punto más severo de la esfera, a la sazón el casquete inferior. Sea:

$$P(\text{kg/cm}^2) = 4,13 \left( \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) + 2,11 \left( \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) + \rho \left( \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3} \right) H(\text{cm}) \quad (A5.13)$$

Donde  $4,13 \text{ kg/cm}^2$  es la presión de almacenamiento, (4 atm),  $2,11 \text{ kg/cm}^2$  equivalen a 30 psi, (la condición de diseño aplicada habitualmente),  $\rho$  es la densidad del agua, ( $0,001 \text{ kg/cm}^3$ ) y  $H$  es la altura a la que se considera la presión hidrostática, a la sazón, para el casquete inferior de la esfera, coincide con su diámetro.

Finalmente, el radio de la esfera se obtiene, conocido el volumen que figura en la hoja de datos:  $3221,313 \text{ m}^3$ , por geometría de la misma. Se tiene 9,2 m de radio, luego 18,4 m (1840 cm) de diámetro.

Con esto, la presión de diseño resulta  $8,08 \text{ kg/cm}^2$ . Al seleccionarse la densidad del agua, se suponen las condiciones más severas de funcionamiento, esto es, en prueba hidráulica. El butadieno purísimo que almacena la esfera es menos denso que el agua, por lo que los cálculos realizados son seguros.

El espesor obtenido a partir de los datos anteriores, por aplicación de (A5.13) es de 2 pulgadas, (50,8 mm).

El cubeto requerido para el tanque T-3, presentará una distancia entre sus muros y la esfera de 20 m, (18,4 m de diámetro del recipiente redondeado a 20 m), por lo que su lado sumará 58,4, de modo que la altura de los muros deberá ser de 1,2 m, en virtud de lo mencionado en la sección anterior.



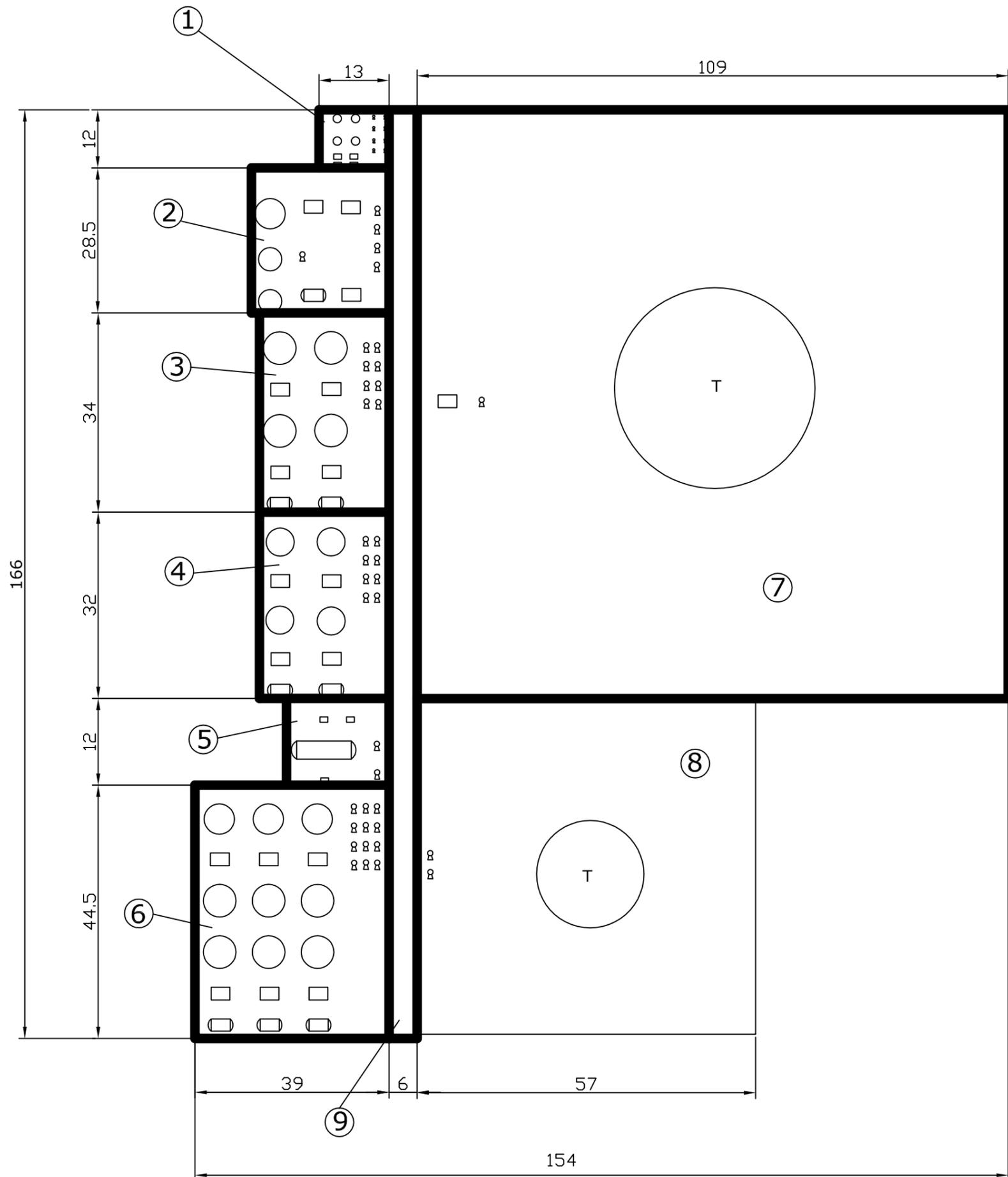
# Documento 2. Planos

---

1. Ubicación del proceso
2. Distribución en terreno
3. Diagrama de flujo del proceso
4. Alzado de los recipientes de "SIMPLE"
5. Planta de los recipientes de "SIMPLE"
6. Alzado de los recipientes de "EXTRACTIVA 1"
7. Alzado de los recipientes de "EXTRACTIVA 2"
8. Alzado de los recipientes de "MÚLTIPLE"
9. Alzado de los recipientes de "BINARIA"
10. Recipiente de "RECUPERACIÓN"
11. Acumuladores de proceso
12. Tanques de proceso
13. Esfera de almacenamiento



 <b>UNIVERSIDAD DE CÁDIZ</b> <b>FACULTAD DE CIENCIAS (PUERTO REAL)</b>		
<p align="center">"DISEÑO DE UN PROCESO DE PURIFICACIÓN DEL 1,3-BUTADIENO CONTENIDA EN UNA FRACCIÓN DE BUTANOS, PROCEDENTE DEL CRAQUEO TÉRMICO DE NAFTAS"</p>		
<b>El proyectista:</b>  Fdo. José Javier Relinque Madroñal	<b>UBICACIÓN DEL PROCESO</b>	PUERTO REAL, (CÁDIZ), enero 2012  Escala: N/P  <b>Plano N° 1</b>

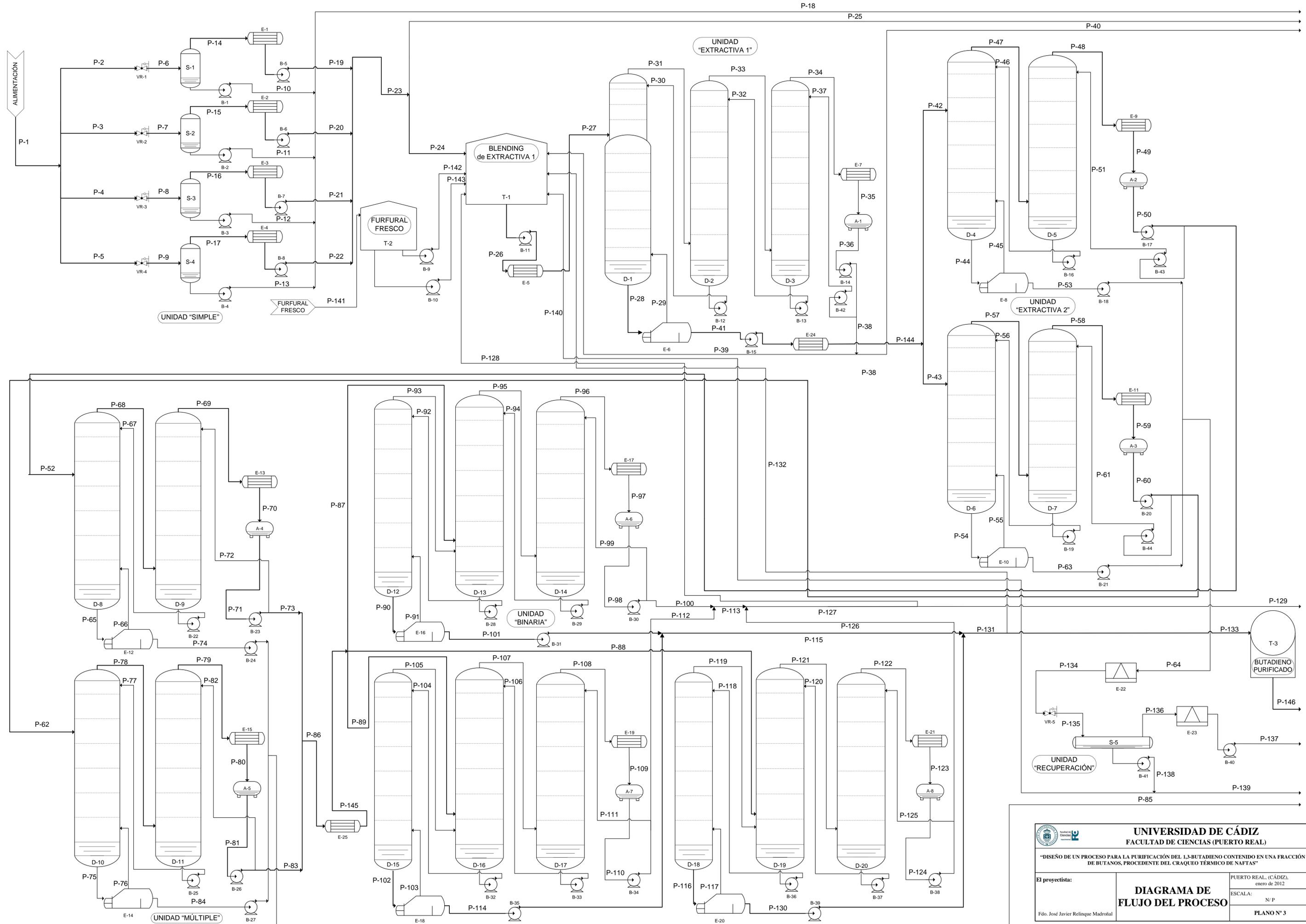


## LEYENDA

	Separadores verticales y torres de destilación
	Cambiadores de calor
	Separador horizontal
	Acumuladores de reflujo
	Bombas
	Tanques de proceso
<b>1</b>	Parcela: Unidad "SIMPLE" (12x13) m
<b>2</b>	Parcela: Unidad "EXTRACTIVA 1" (28,5x17,5) m
<b>3</b>	Parcela: Unidad "EXTRACTIVA 2" (34x24) m
<b>4</b>	Parcela: Unidad "MÚLTIPLE" (32x20) m
<b>5</b>	Parcela: Unidad "RECUPERACIÓN" (12x16) m
<b>6</b>	Parcela: Unidad "BINARIA" (44,5x39) m
<b>7</b>	Parcela tanque: "BLENDING de EXTRACTIVA 1" (109x109) m
<b>8</b>	Parcela tanque: "FURFURAL FRESCO" (57x57) m
<b>9</b>	Rack de tuberías

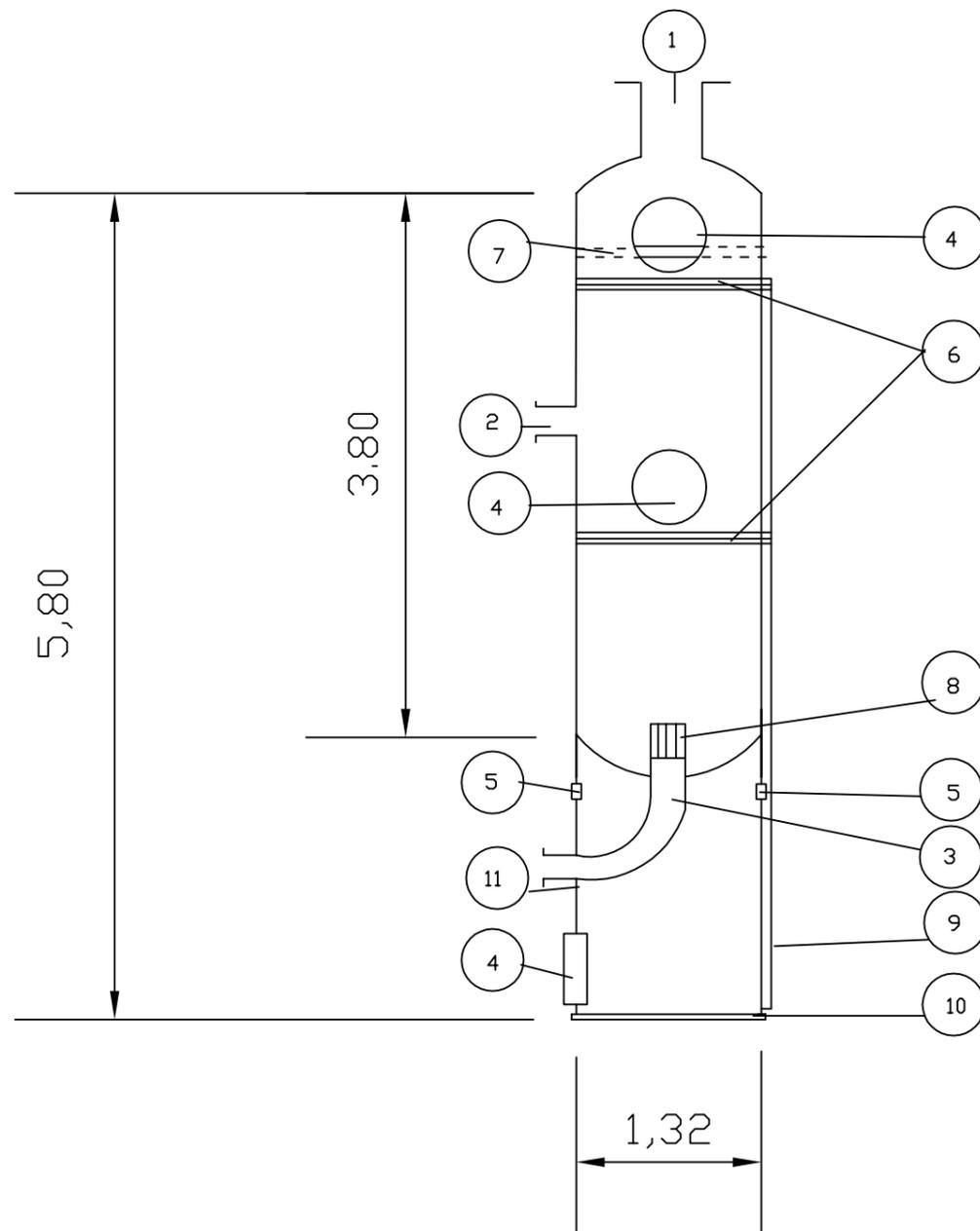
**NOTA:**  
1.Las cotas vienen dadas en metros.

<p align="center"><b>UNIVERSIDAD DE CÁDIZ</b> FACULTAD DE CIENCIAS (PUERTO REAL)</p>		
<p align="center">"DISEÑO DE UN PROCESO DE PURIFICACIÓN DEL 1,3-BUTADIENO CONTENIDA EN UNA FRACCIÓN DE BUTANOS, PROCEDENTE DEL CRAQUEO TÉRMICO DE NAFTAS"</p>		
<p><b>El proyectista:</b>  Fdo. José Javier Relinque Madroñal</p>	<p><b>DISTRIBUCIÓN EN TERRENO</b></p>	<p>PUERTO REAL, (CÁDIZ), enero 2012</p> <hr/> <p>Escala 1/1000</p> <hr/> <p align="center"><b>Plano N° 2</b></p>



 <b>UNIVERSIDAD DE CÁDIZ</b> FACULTAD DE CIENCIAS (PUERTO REAL)		
"DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA PURIFICACIÓN DEL 1,3-BUTADIENO CONTENIDO EN UNA FRACCIÓN DE BUTANOS, PROCEDENTE DEL CRAQUEO TÉRMICO DE NAFTAS"		
El proyectista: Fdo. José Javier Retinque Madroal	<b>DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO</b>	PUERTO REAL, (CÁDIZ), enero de 2012 ESCALA: N/P <b>PLANO N° 3</b>

## SEPARADORES S-1, S-2, S-3 Y S-4



LEYENDA	
1.	Brida de salida de vapor. DN 20"
2.	Brida de alimentación. DN 3"
3.	Brida de salida de líquido. DN 2"
4.	Accesos de hombre. Ø 60 cm
5.	Ventilas del faldón. Ø 2"
6.	Plataformas
7.	Extractor de neblina
8.	Rompedor de vórtices. Ø 4"
9.	Escalera. Altura 5,1 m
10.	Anillo base. Espesor 5/8"
11.	Abertura de faldón. Ø 7"

**NOTA:**  
1. Las cotas vienen dadas en metros.



**UNIVERSIDAD DE CÁDIZ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS (PUERTO REAL)**

**"DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA PURIFICACIÓN DEL 1,3-BUTADIENO CONTENIDO EN UNA FRACCIÓN DE BUTANOS, PROCEDENTE DEL CRAQUEO TÉRMICO DE NAFTAS"**

El proyectista:

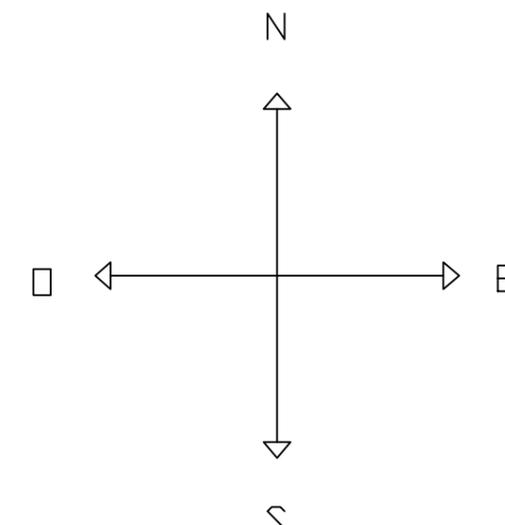
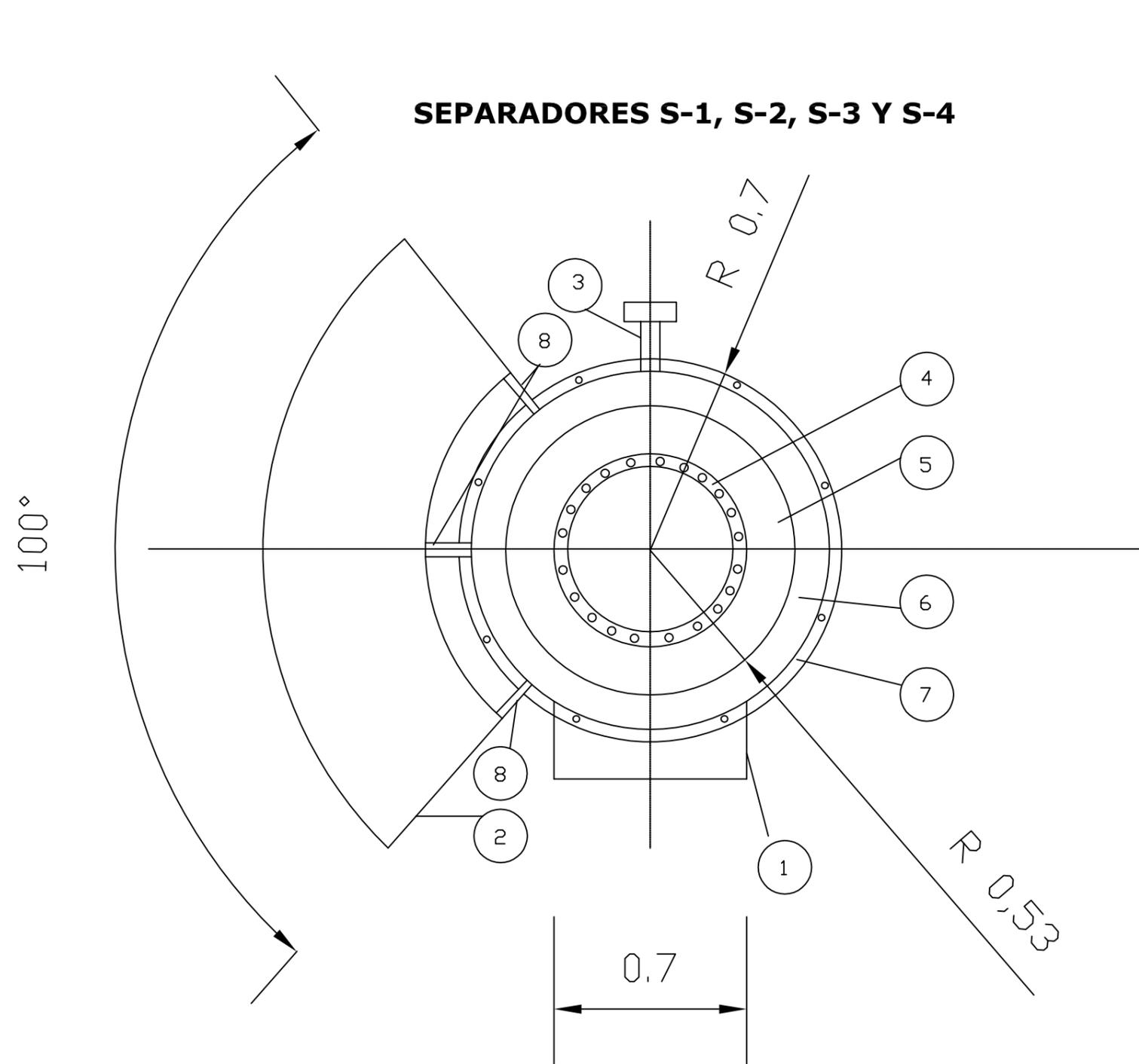
Fdo. José Javier Relinque Madroñal

**ALZADO DE LOS RECIPIENTES DE "SIMPLE"**

PUERTO REAL, (CÁDIZ),  
enero 2012

Escala:  
1:50

**Plano N° 4**

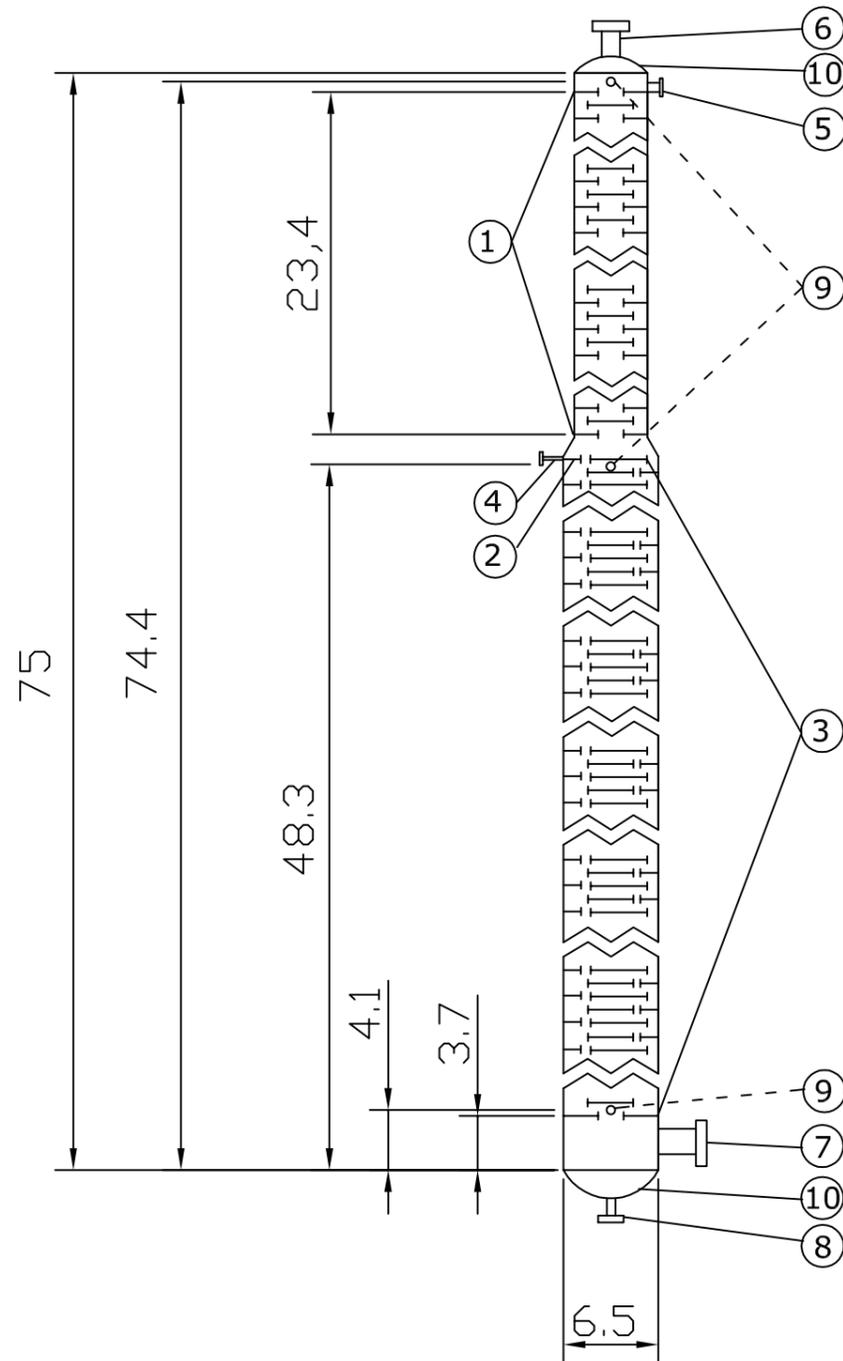


<b>LEYENDA</b>	
1.	Escalera. Separación 7"
2.	Plataforma. Separación 6"
3.	Bridas de alimentación y descarga de líquido
4.	Brida de descarga de vapor
5.	Anillo de refuerzo. 8 pernos 3/8"
6.	Recipiente
7.	Anillo base
8.	Soporte de plataforma

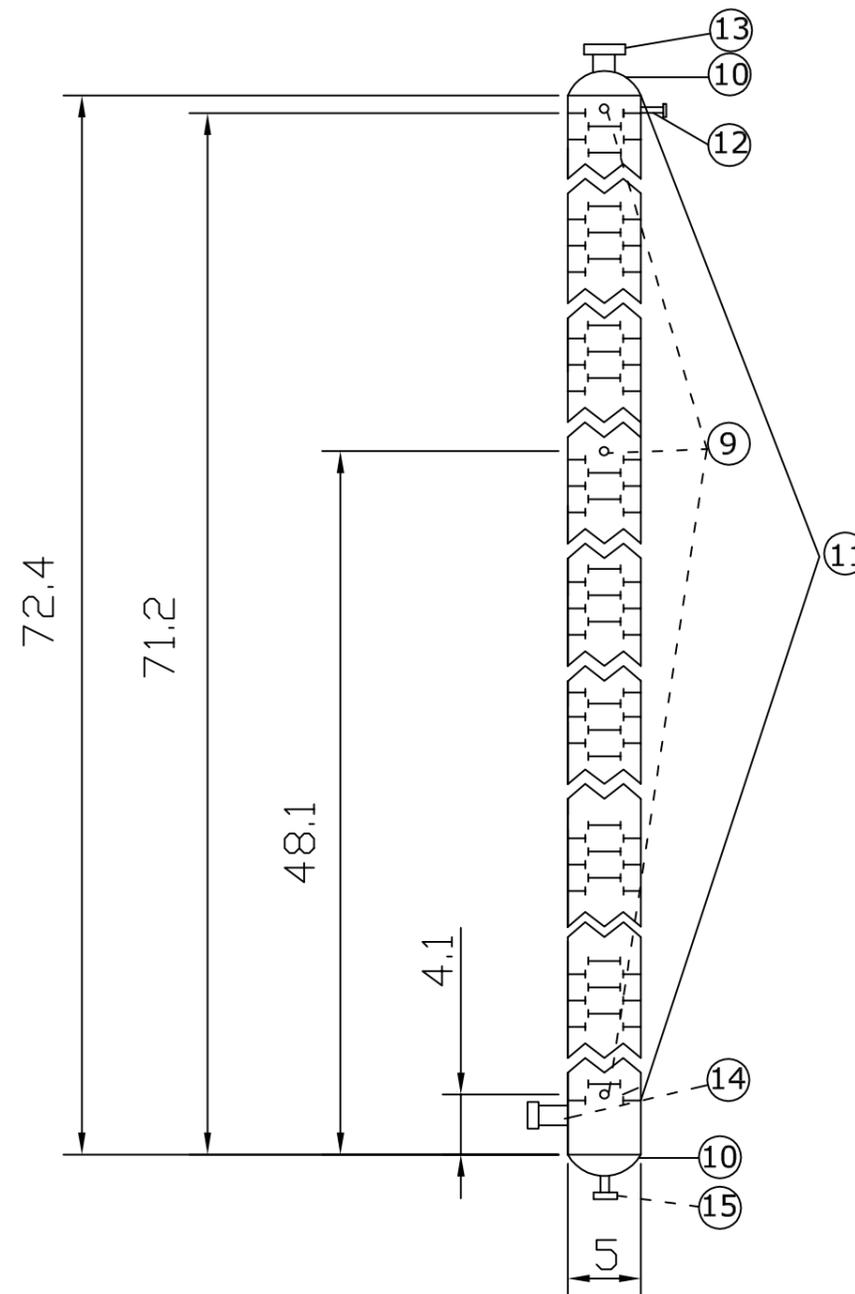
**NOTA:**  
1. Las cotas vienen dadas en metros.

<b>UNIVERSIDAD DE CÁDIZ</b> FACULTAD DE CIENCIAS (PUERTO REAL)		
"DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA PURIFICACIÓN DEL 1,3-BUTADIENO CONTENIDO EN UNA FRACCIÓN DE BUTANOS, PROCEDENTE DEL CRAQUEO TÉRMICO DE NAFTAS"		
<b>El proyectista:</b>  Fdo. José Javier Relinque Madroñal	<b>PLANTA DE LOS RECIPIENTES DE SIMPLE</b>	PUERTO REAL, (CÁDIZ), enero 2012 Escala: 1:20 <b>Plano Nº 5</b>

## COLUMNA D-1



## COLUMNAS D-2 Y D-3



### LEYENDA

1	26 platos de rectificación (176-151). Espaciado 0,9 m
2	Plato de alimentación, nº 177
3	50 platos de agotamiento (226-177). Espaciado 0,9 m
4	Brida de alimentación. DN 5"
5	Brida de retorno de líquido. DN 5"
6	Brida de descarga de vapor. DN 36"
7	Brida de recirculación de vapor. DN 34"
8	Brida de descarga de líquido. DN 8"
9	Accesos de hombre. Ø 60 cm
10	Cabezales de columna, tipo <i>Klopper</i>
11	75 platos de rectificación (150-76) de doble paso. Espaciado 0,9 m
12	Brida de retorno de líquido. DN 5"
13	Brida de descarga de vapor. DN 34"
14	Brida de carga de vapor. Ver nota 2
15	Brida de descarga de líquido. DN 5"

### NOTAS:

- Las cotas vienen dadas en metros.
- Las columnas D-2 y D-3 son idénticas a excepción de lo indicado en la siguiente nota.
- La brida de carga de vapor en la columna D-2 presenta DN 36". La columna D-3 presenta DN 34".



**UNIVERSIDAD DE CÁDIZ**  
FACULTAD DE CIENCIAS (PUERTO REAL)

"DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA PURIFICACIÓN DEL 1,3-BUTADIENO CONTENIDO EN UNA FRACCIÓN DE BUTANOS, PROCEDENTE DEL CRAQUEO TÉRMICO DE NAFTA"

El proyectista:

**ALZADO DE LOS  
RECIPIENTES DE  
"EXTRACTIVA 1"**

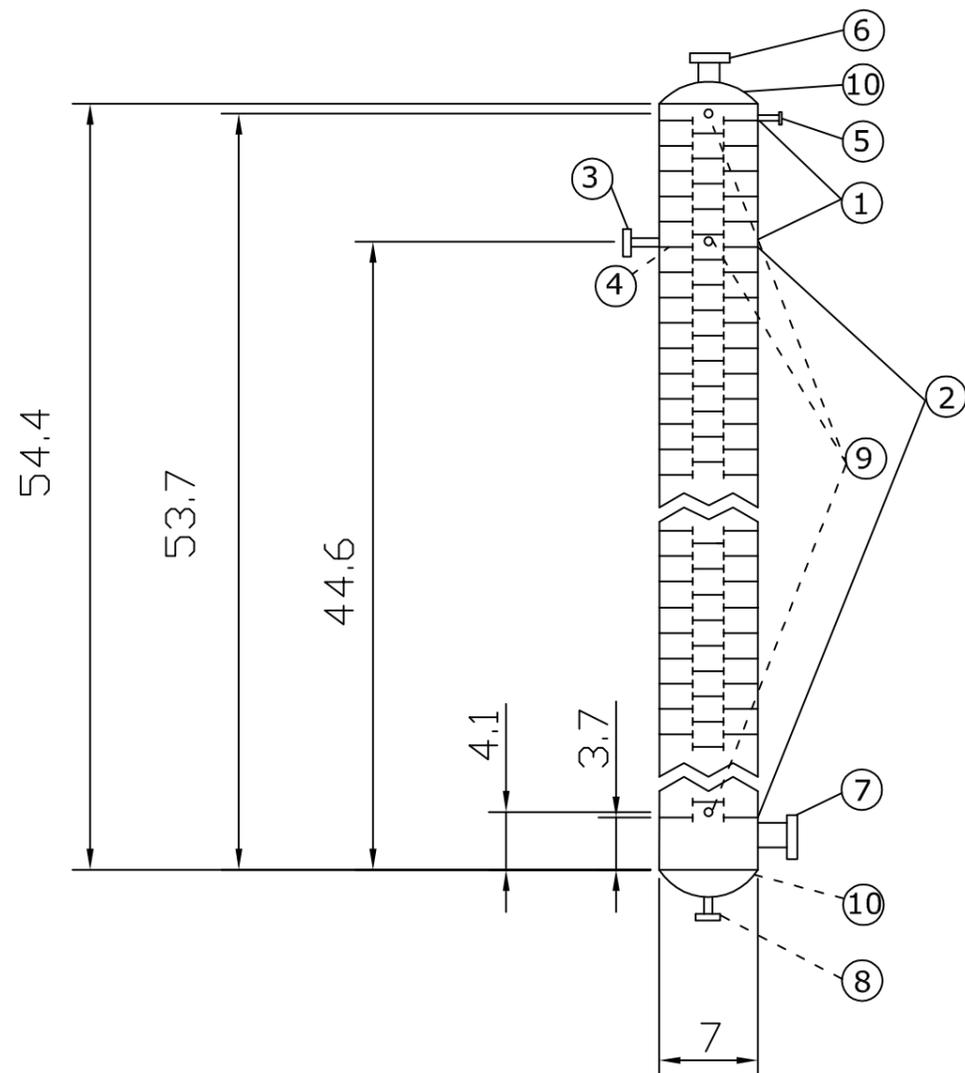
PUERTO REAL, (CÁDIZ),  
enero 2012

Escala:  
1/500

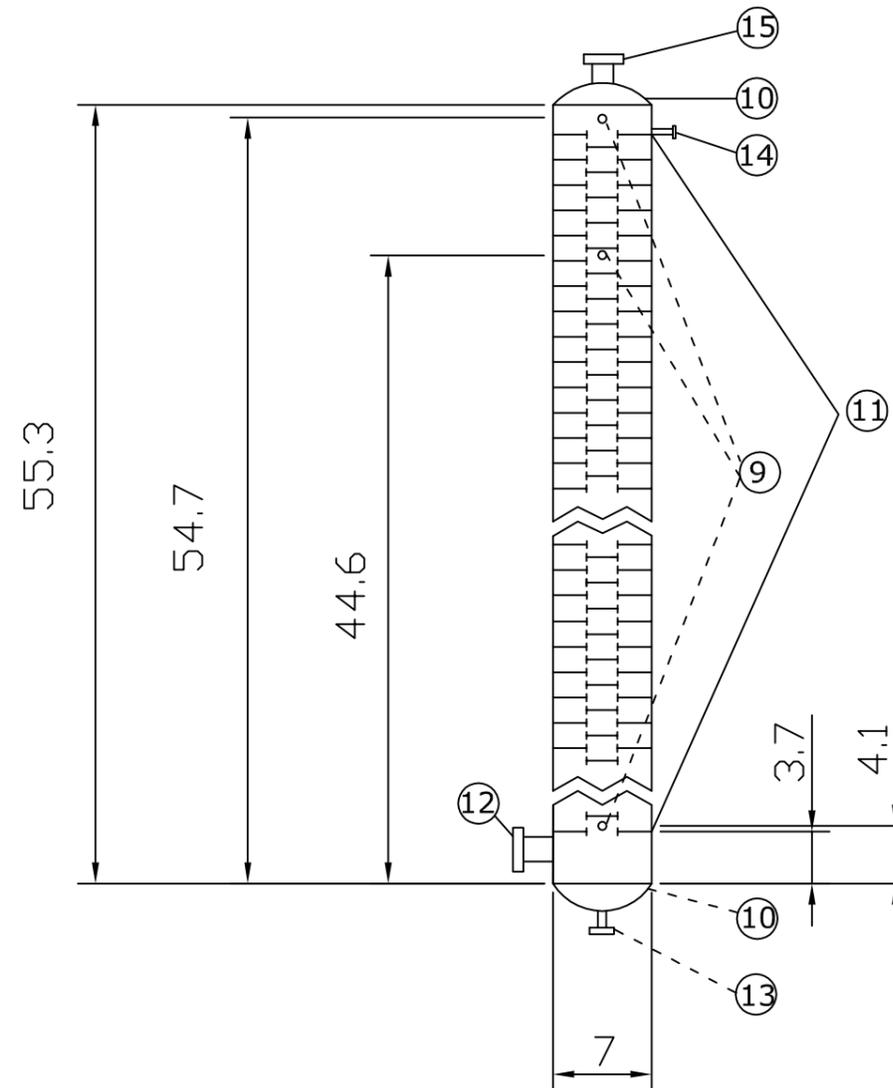
Fdo: José Javier Relinque Madroñal

**Plano N° 6**

## COLUMNAS D-4 Y D-6



## COLUMNAS D-5 Y D-7



### LEYENDA

1	10 platos de rectificación (57-66). Espaciado 0,9 m
2	45 platos de agotamiento (67-111). Espaciado 0,9 m
3	Plato de alimentación, nº 67
4	Brida de alimentación. DN 3"
5	Brida de retorno de líquido. DN 6"
6	Brida de descarga de vapor. DN 36"
7	Brida de recirculación de vapor. DN 36"
8	Brida de descarga de líquido. DN 6"
9	Accesos de hombre. Ø 60 cm
10	Cabezales de columna, tipo <i>Klopper</i>
11	56 platos de rectificación de doble paso (1-56). Espaciado 0,9
12	Brida de carga de vapor. DN 36"
13	Brida de descarga de líquido. DN 6"
14	Brida de retorno de líquido. DN 6"
15	Brida de descarga de vapor. DN 36"

### NOTA:

1. Las cotas vienen dadas en metros.



UNIVERSIDAD DE CÁDIZ  
FACULTAD DE CIENCIAS (PUERTO REAL)

"DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA PURIFICACIÓN DEL 1,3-BUTADIENO CONTENIDO EN UNA FRACCIÓN DE BUTANOS, PROCEDENTE DEL CRAQUEO TÉRMICO DE NAFTAS"

El proyectista:

Fdo. José Javier Relinque Madroñal

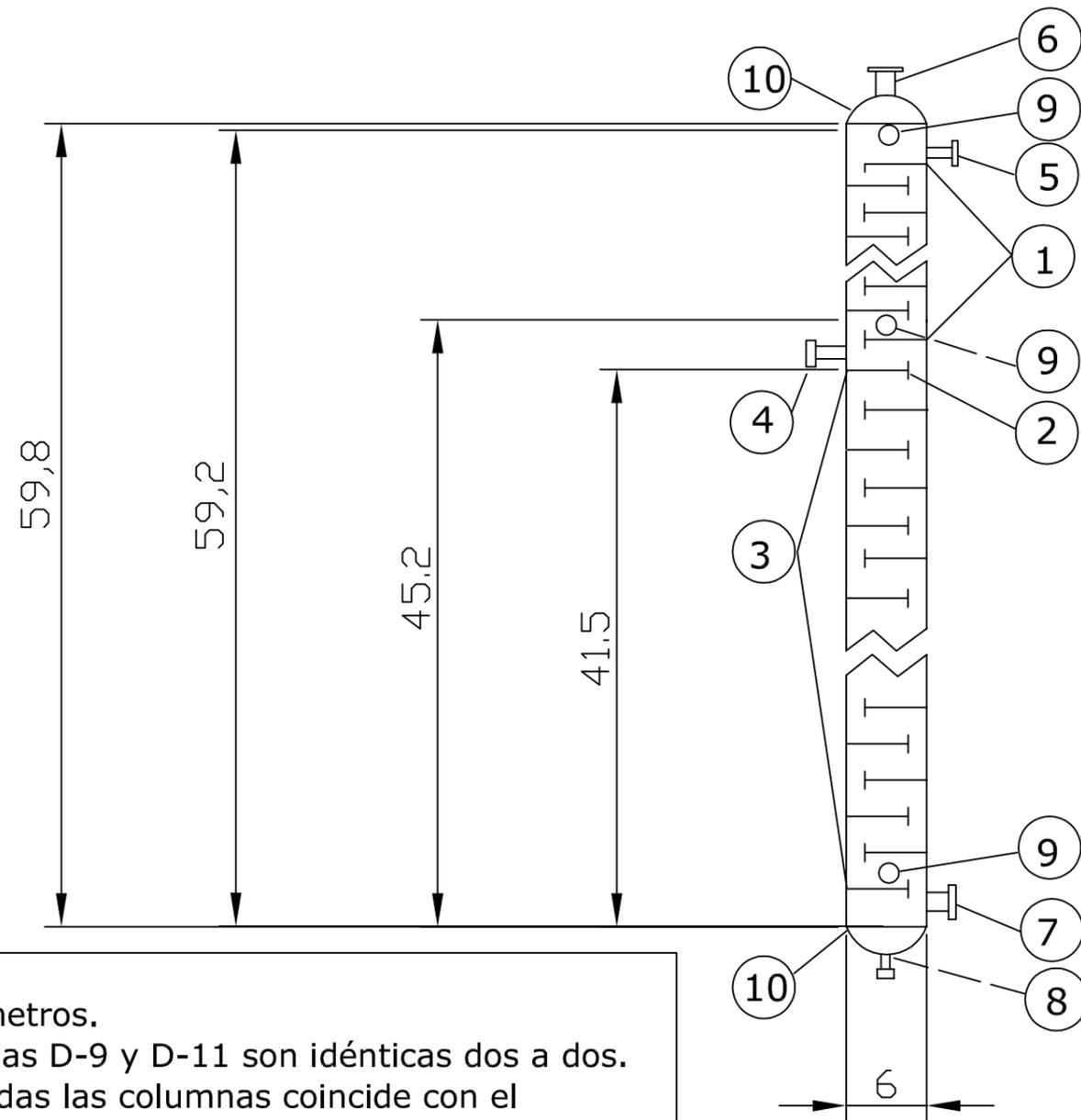
ALZADO DE LOS  
RECIPIENTES DE  
"EXTRACTIVA 2"

Puerto Real, (CÁDIZ),  
enero 2012

Escala:  
1/500

Plano N° 7

## COLUMNAS D-8 Y D-10



### NOTAS:

1. Las cotas vienen dadas en metros.
2. Las columnas D-8 y D-10 y las D-9 y D-11 son idénticas dos a dos.
3. El diámetro y la altura de todas las columnas coincide con el acotado en este plano.
4. La posición de los accesos de hombre es la misma para todas las columnas e igual a las dibujadas en este plano.
5. Las columnas D-9 y D-11 carecen de brida de alimentación, dado que todos los platos son de rectificación.
6. La brida notada como 7 se denomina, en las columnas D-9 y D-11, de carga de vapor y conecta con la brida 6 de las columnas D-8 y D-10 dibujadas en este plano.
7. La brida 7 se sitúa simétrica a la dibujada en las columnas D-8 y D-10 en las columnas D-9 y D-11.
8. La brida notada como 5 se denomina, en las columnas D-9 y D-11, de reflujo de columna. En las columnas D-8 y D-11 dibujadas, conecta con la descarga de fondo de las D-9 y D-11.

### LEYENDA

<b>1</b>	19 platos de rectificación (62-80). Espaciado 0,9 m
<b>2</b>	Plato de alimentación, nº 81
<b>3</b>	42 platos de agotamiento (81-122). Espaciado 0,9 m
<b>4</b>	Brida de alimentación. DN 2-1/2"
<b>5</b>	Brida de retorno de líquido. DN 5"
<b>6</b>	Brida de descarga de vapor. DN 30"
<b>7</b>	Brida de recirculación de vapor. DN 30"
<b>8</b>	Brida de descarga de líquido. DN 5"
<b>9</b>	Accesos de hombre. Ø 60 cm
<b>10</b>	Cabezales de columna, tipo <i>Klopper</i>



**UNIVERSIDAD DE CÁDIZ**  
FACULTAD DE CIENCIAS (PUERTO REAL)

"DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA PURIFICACIÓN DEL 1,3-BUTADIENO CONTENIDO EN UNA FRACCIÓN DE BUTANOS, PROCEDENTE DEL CRAQUEO TÉRMICO DE NAFTAS"

**El proyectista:**

Fdo: José Javier Relinque Madroñal

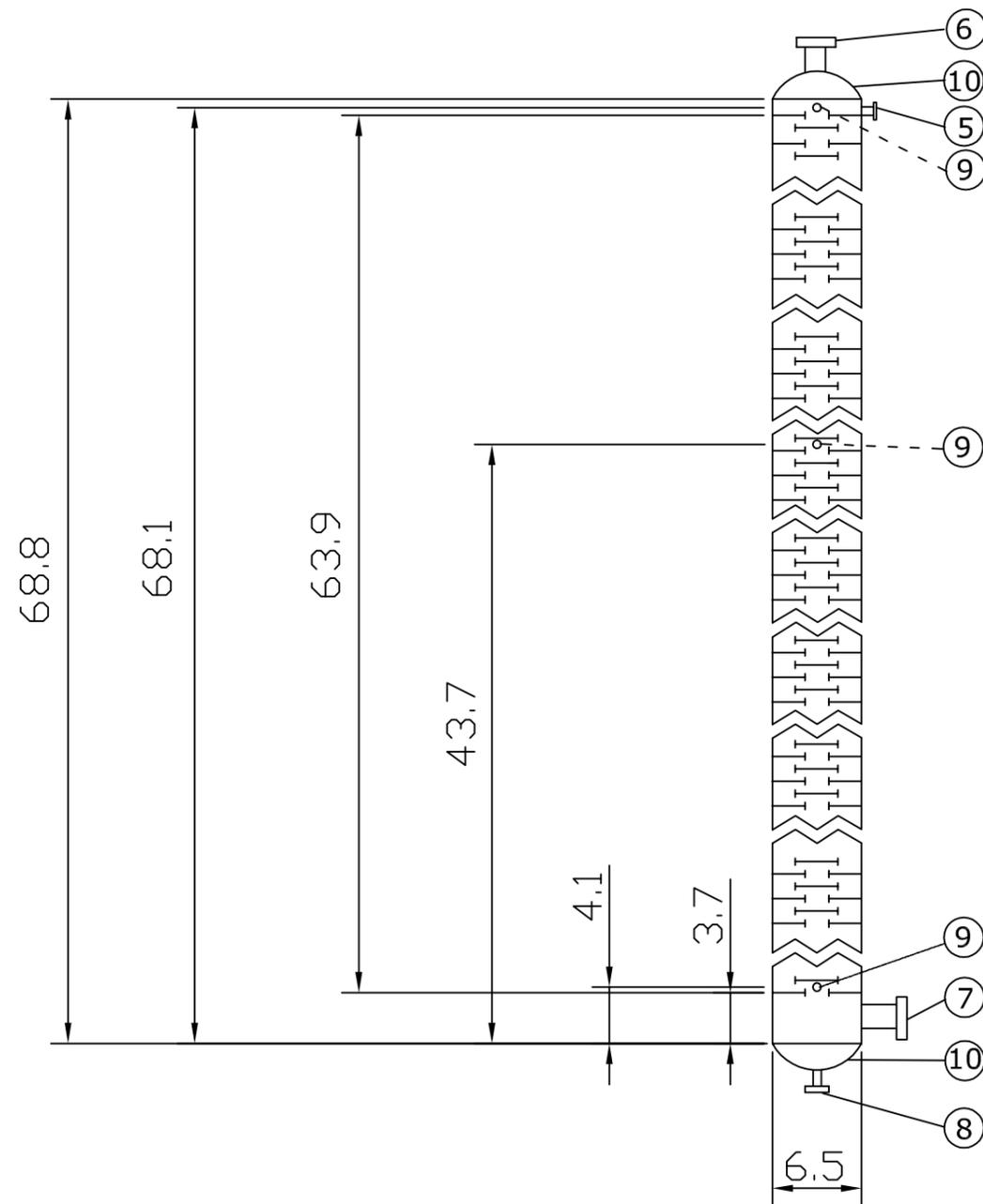
**ALZADO DE LOS RECIPIENTES  
DE "MÚLTIPLE"**

PUERTO REAL, (CÁDIZ),  
enero de 2012

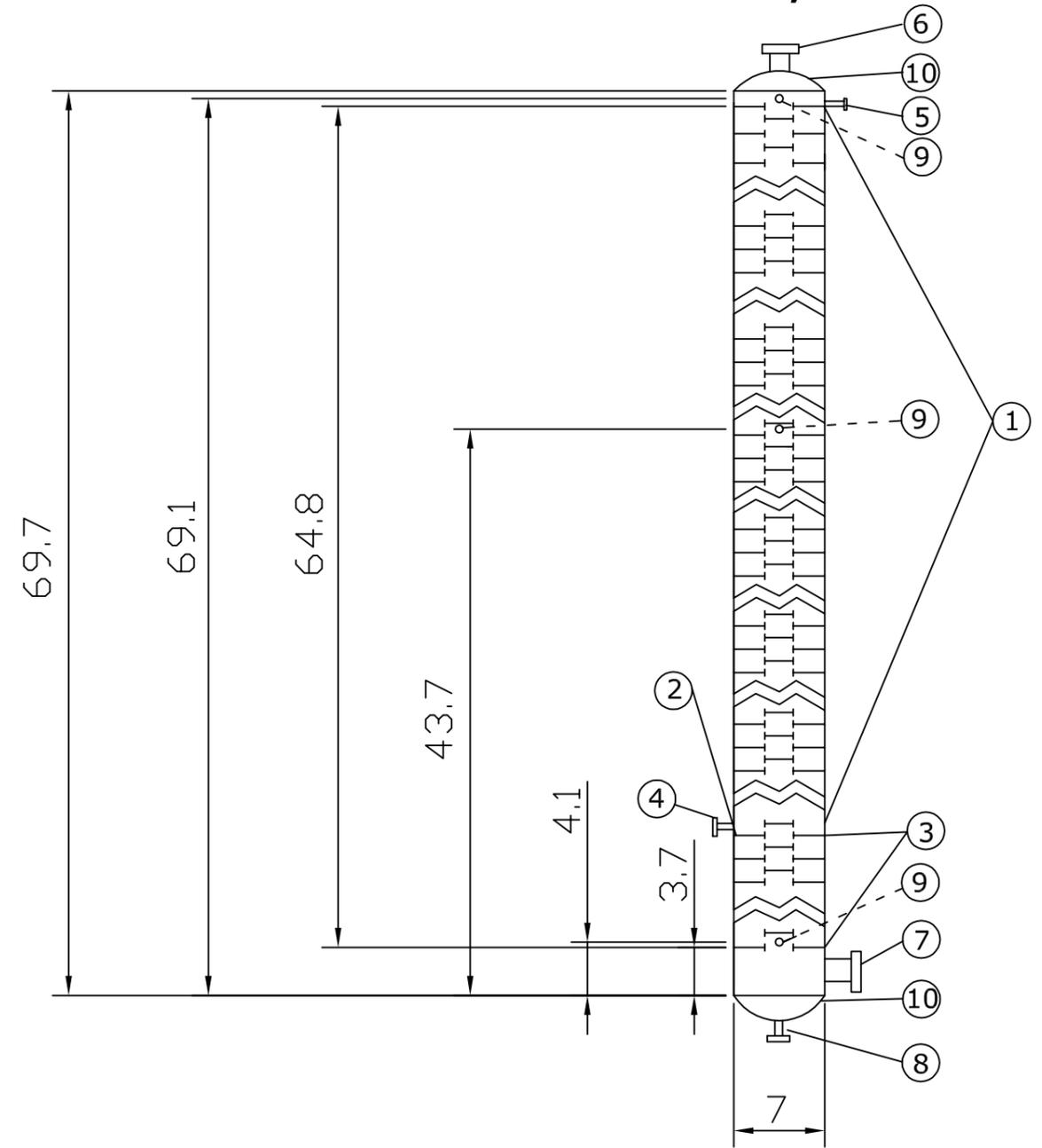
ESCALA: 1/500

**PLANO N° 8**

## COLUMNAS D12, D-15 Y D-18



## COLUMNAS D-13, D-16 Y D19



### LEYENDA

1	67 platos de rectificación (72-138). Espaciado 0,9 m
2	Plato de alimentación, nº 139
3	5 platos de agotamiento (139-143). Espaciado 0,9 m
4	Brida de alimentación. DN 2-1/2"
5	Brida de retorno de líquido. DN 5"
6	Brida de descarga de vapor. DN 30"
7	Brida de recirculación de vapor. DN 30"
8	Brida de descarga de líquido. DN 5"
9	Accesos de hombre. Ø 60 cm
10	Cabezales de columna, tipo Klopper

### NOTAS:

- 1.Las cotas vienen dadas en metros.
- 2.Las columnas D-14, D-17 y D-20 presentan el mismo diámetro que las D-13, D-16 y D-19 y la misma altura y bridas que las D-12, D-15 y D-18.



UNIVERSIDAD DE CÁDIZ  
FACULTAD DE CIENCIAS (PUERTO REAL)

"DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA PURIFICACIÓN DEL 1,3-BUTADIENO CONTENIDO EN UNA FRACCIÓN DE BUTANOS, PROCEDENTE DEL CRAQUEO TÉRMICO DE NAFTA"

El proyectista:

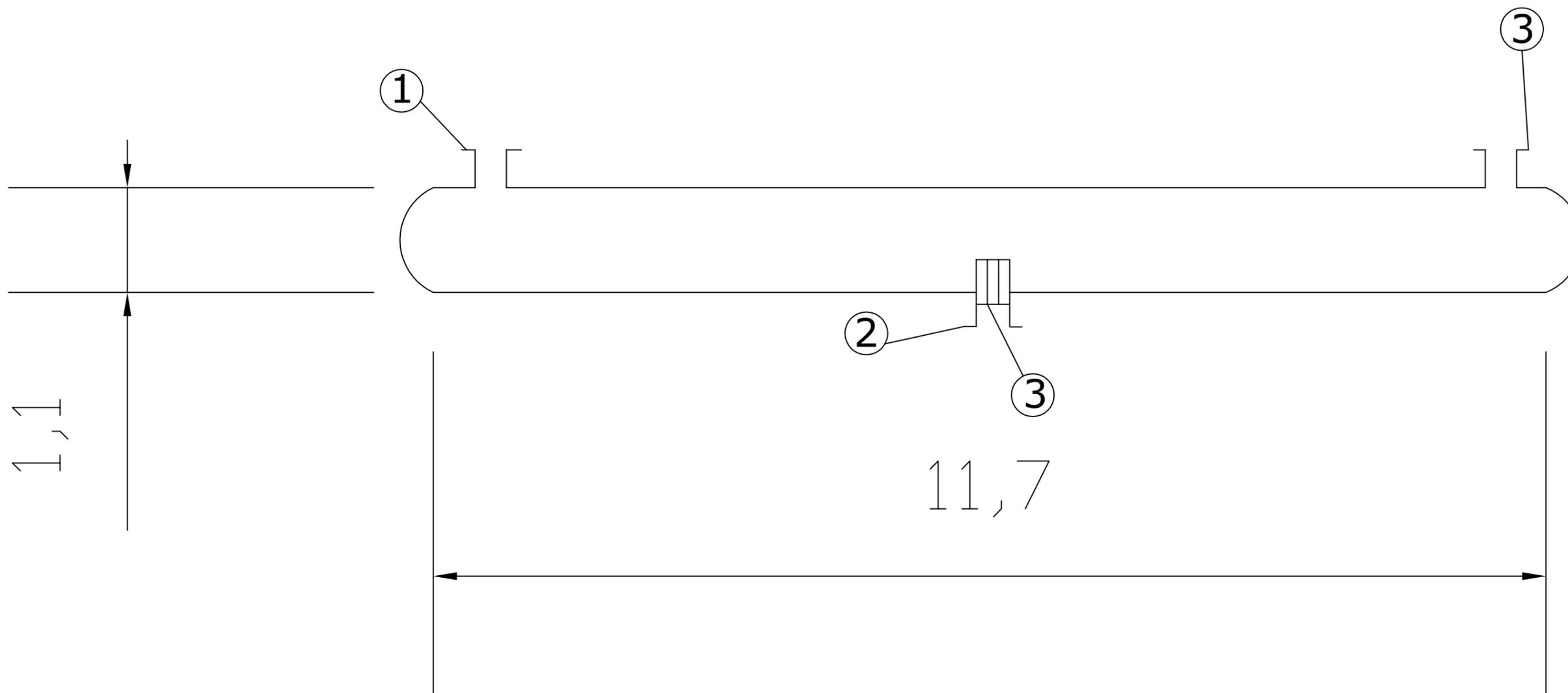
ALZADO DE LOS  
RECIPIENTES DE  
"BINARIA"

Puerto Real, (CÁDIZ),  
enero 2012

Escala:  
1/500

Fdo. José Javier Relinque Madroñal

Plano N° 9



LEYENDA	
1	Brida de alimentación. DN 3"
2	Brida de descarga de líquido. DN 2-1/2"
3	Brida de descarga de vapor. DN 5"
4	Rompedor de vórtices. Ø 5"

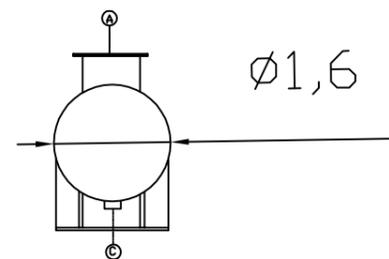
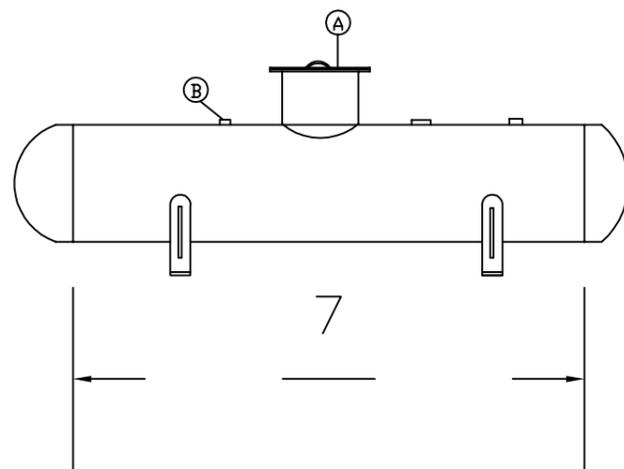
**NOTA:**  
1. Todas las cotas vienen dadas en metros.

		
<b>UNIVERSIDAD DE CÁDIZ</b> <b>FACULTAD DE CIENCIAS (PUERTO REAL)</b>		
"DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA PURIFICACIÓN DEL 1,3-BUTADIENO CONTENIDO EN UNA FRACCIÓN DE BUTANOS, PROCEDENTE DEL CRAQUEO TÉRMICO DE NAFTAS"		
<b>El proyectista:</b>  Fdo. José Javier Relinque Madroñal	<b>RECIPIENTE DE "RECUPERACIÓN"</b>	PUERTO REAL, (CÁDIZ), enero 2012  Escala: 1:50  <b>Plano N° 10</b>

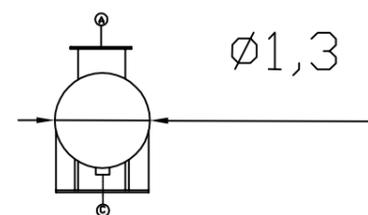
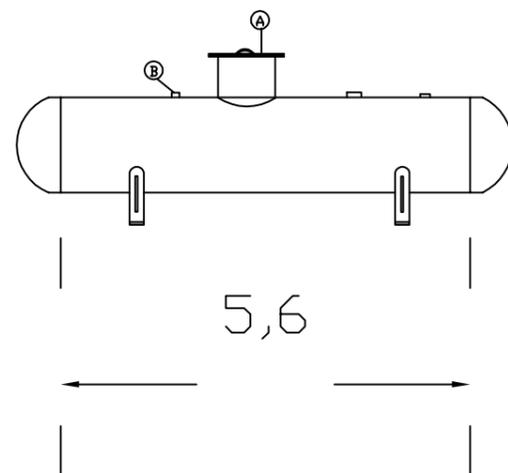
### ALZADO

### VISTA LATERAL

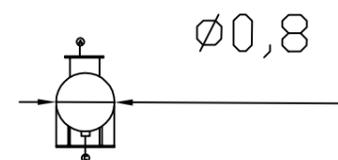
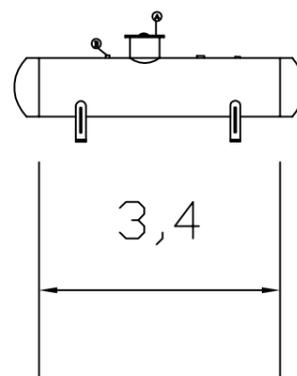
**A-1**



**A-2, A-3,  
A-4 Y A-5**



**A-6, A-7 Y  
A-8**



#### LEYENDA

- A: Acceso de hombre
- B: Conexión de entrada
- C: Conexión de salida

**NOTA:**  
1. Las cotas vienen dadas en metros.



**UNIVERSIDAD DE CÁDIZ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS (PUERTO REAL)**

"DISEÑO DE UN PROCESO DE PURIFICACIÓN DEL 1,3-BUTADIENO CONTENIDO EN UNA FRACCIÓN DE BUTANOS, PROCEDENTES DEL CRAQUEO TÉRMICO DE NAFTAS"

El proyectista:

**ACUMULADORES  
DE  
PROCESO**

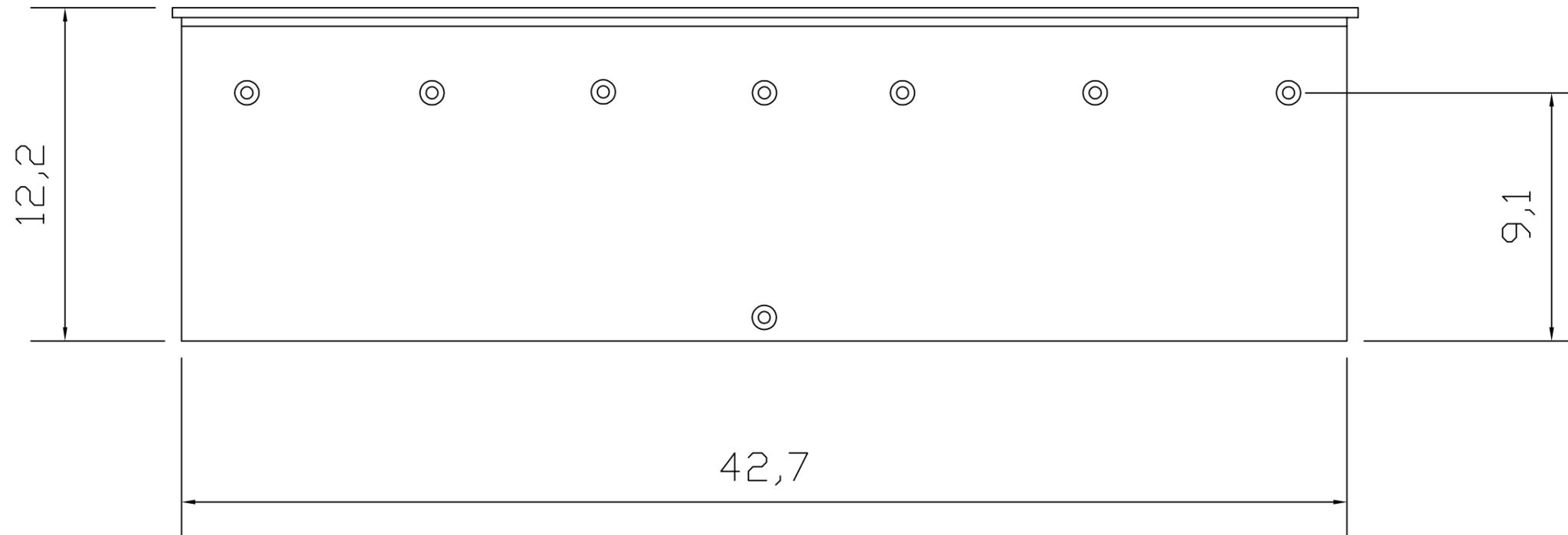
PUERTO REAL, (CÁDIZ),  
enero 2012

Escala  
1 / 100

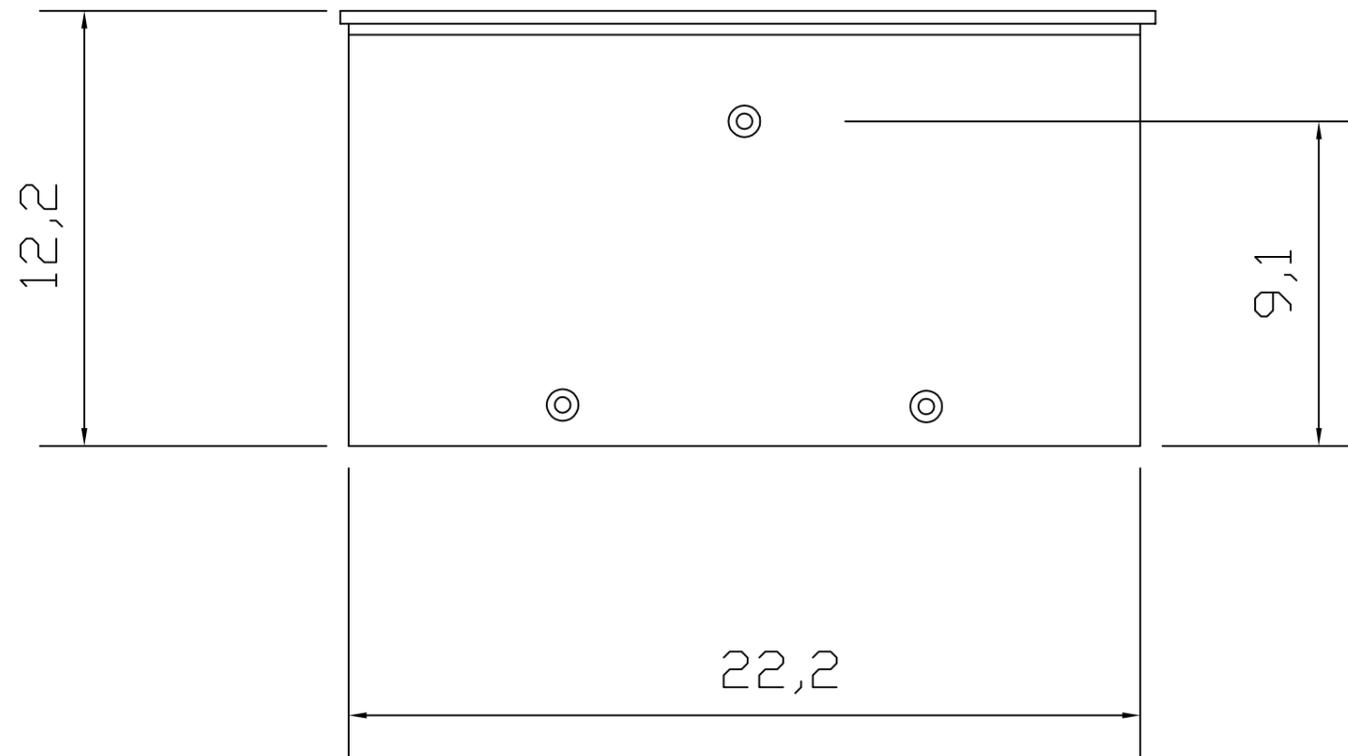
Fdo: José Javier Relinque Madroñal

**Plano N° 11**

Tanque T-1



Tanque T-2

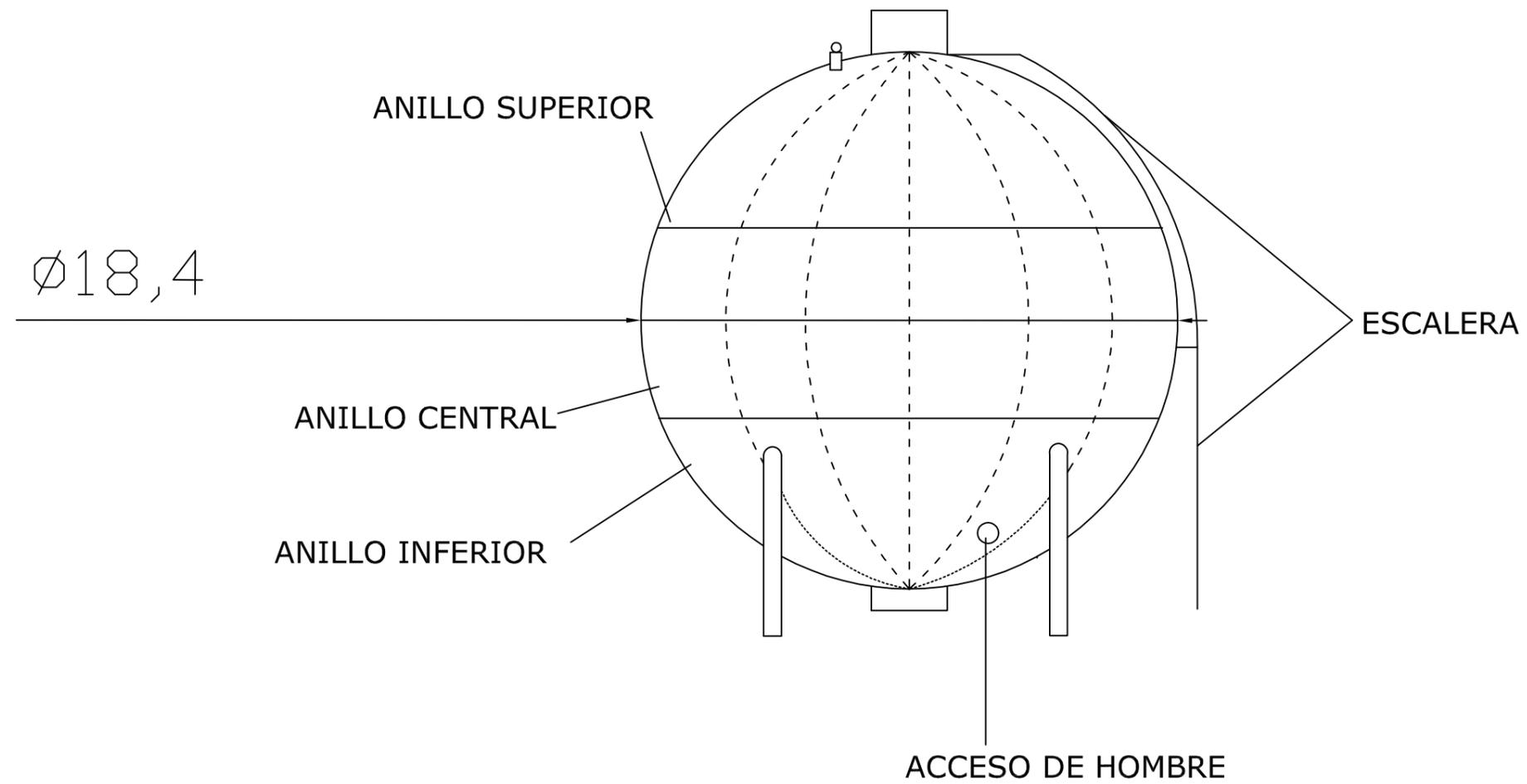


**NOTAS:**

1. Las cotas vienen dadas en metros.
2. Las bridas de carga de los tanques se sitúan a 9,1 respecto el nivel del terreno.
3. Las bridas de descarga del tanque se sitúan a nivel del terreno.

 <p style="text-align: center;"><b>UNIVERSIDAD DE CÁDIZ</b> FACULTAD DE CIENCIAS (PUERTO REAL)</p>		
<p>"DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA PURIFICACIÓN DEL 1,3-BUTADIENO CONTENIDO EN UNA FRACCIÓN DE BUTANOS, PROCEDENTE DEL CRAQUEO TÉRMICO DE NAFTAS"</p>		
<p><b>El proyectista:</b></p> <p>Fdo. José Javier Relinque Madroñal</p>	<p><b>TANQUES DE PROCESO</b></p>	<p>PUERTO REAL, (CÁDIZ), enero 2012</p>
		<p>Escala: 1/200</p>
		<p><b>Plano N° 12</b></p>

# ESFERA T-3



**NOTA:**  
1. Las cotas vienen dadas en metros.

		<b>UNIVERSIDAD DE CÁDIZ</b> FACULTAD DE CIENCIAS (PUERTO REAL)	
"DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA PURIFICACIÓN DEL 1,3-BUTADIENO CONTENIDO EN UNA FRACCIÓN DE BUTANOS, PROCEDENTE DEL CRAQUEO TÉRMICO DE NAFTAS"			
<b>El proyectista:</b>  Fdo. José Javier Relinque Madroñal	<b>ESFERA DE ALMACENAMIENTO DE BUTADIENO PURIFICADO</b>	PUERTO REAL, (CÁDIZ), enero 2012	
		Escala: 1/20	
		Plano N° 13	



# Documento 3. Pliego de condiciones

---

1. Generalidades
2. Condiciones generales de índole facultativa
3. Condiciones generales de índoles económica
4. Condiciones generales de índole legal
5. Condiciones generales técnicas de los materiales y equipos
6. Condiciones generales de los equipos a presión
7. Ejecución de las obras



# Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

## Índice general

---

### PLIEGO DE CONDICIONES

PC.C1. Generalidades	P.1169
PC.C1.1. Objeto	P.1169
PC.C1.2. Documentos que definen las obras	P.1169
PC.C1.3. Obras accesorias no especificadas en el proyecto	P.1170
PC.C1.4. Contradicciones, omisiones o errores	P.1170
PC.C2. Condiciones generales de índole facultativa	P.1171
PC.C2.1. Obligaciones y derechos del contratista	P.1171
PC.C2.2. Trabajo, materiales y medios auxiliares	P.1173
PC.C2.2.1. Libro de órdenes	P.1173
PC.C2.2.2. Comienzo de los trabajos y plazo de ejecución	P.1173
PC.C2.2.3. Condiciones generales de ejecución de los trabajos	P.1173
PC.C2.2.4. Personal técnico	P.1174
PC.C2.2.5. Trabajos nocturnos	P.1175
PC.C2.2.6. Accidentes de trabajo	P.1175
PC.C2.2.7. Trabajos defectuosos	P.1176
PC.C2.2.8. Equipos de maquinaria	P.1176
PC.C2.2.9. Materiales no utilizables o defectuosos	P.1176
PC.C2.2.10. Medios auxiliares	P.1177
PC.C2.2.11. Precauciones especiales	P.1177
PC.C2.2.12. Señalización de las obras	P.1178
PC.C2.3. Recepción y liquidación	P.1178

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Índice general

---

PC.C2.3.1. Recepción provisional de las obras	P.1178
PC.C2.3.2. Período de garantías	P.1179
PC.C2.3.3. Recepción definitiva	P.1180
PC.C2.3.4. Documentación final de la obra	P.1181
PC.C2.4. Facultades de la dirección de obra	P.1181
PC.C3. Condiciones generales de índole económica	P.1182
PC.C3.1. Percepción económica del contratista	P.1182
PC.C3.2. Precios unitarios	P.1182
PC.C3.4. Fijación de precios unitarios no contratados	P.1183
PC.C3.5. Variaciones en los precios unitarios	P.1184
PC.C3.6. Obras complementarias. Cambios de materiales	P.1184
PC.C3.7. Valoración y abono de los trabajos	P.1185
PC.C3.7.1. Forma de abono de las obras	P.1185
PC.C3.7.2. Abono de unidades de obra ejecutadas	P.1185
PC.C3.7.3. Relaciones valoradas y certificaciones	P.1185
PC.C3.7.4. Liquidaciones parciales	P.1185
PC.C3.7.5. Documentación final de la obra	P.1185
PC.C3.7.6. Pagos	P.1186
PC.C3.7.7. Suspensión o retraso en el ritmo de los trabajos	P.1186
PC.C4. Condiciones generales de índole legal	P.1186
PC.C4.1. El contrato	P.1187
PC.C4.2. Arbitraje obligatorio	P.1187

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

### Índice general

---

PC.C4.3. Jurisdicción competente	P.1187
PC.C4.4. Responsabilidad del contratista	P.1188
PC.C4.5. Causas de rescisión del contrato	P.1188
PC.C5. Condiciones generales técnicas de los materiales y equipos	P.1190
PC.C5.1. Referencias y normativas	P.1190
PC.C5.2. Condiciones para los materiales	P.1192
PC.C5.2.1. Condiciones generales para los materiales	P.1192
PC.C5.2.2. Acopios	P.1193
PC.C5.2.3. Condiciones para las tuberías	P.1194
PC.C5.2.4. Condiciones para las bridas	P.1195
PC.C5.2.5. Condiciones para los accesorios soldables	P.1195
PC.C5.2.6. Cond. de las placas de fabricación de los equipos	P.1195
PC.C5.3. Condiciones para los equipos	P.1196
PC.C5.3.1. Cond. para los cambiadores de calor y tanques	P.1196
PC.C5.3.2. Cond. para las bombas	P.1196
PC.C5.3.4. Condiciones para los equipos reutilizados	P.1197
PC.C5.4. Condiciones para los equipos	P.1197
PC.C5.4.1. Condiciones sobre pintura y preparación de superficies	P.1197
PC.C5.4.2. Condiciones para los aislamientos	P.1198
PC.C6. Condiciones generales de los equipos a presión	P.1198
PC.C6.1. Definiciones generales	P.1198

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Índice general

---

PC.C6.1.1. Aparatos sometidos a presión	P.1199
PC.C6.1.2. Tuberías	P.1199
PC.C6.1.3. Sistemas	P.1199
PC.C6.1.4. Diseño mecánico	P.1199
PC.C6.1.5. Ingeniería	P.1199
PC.C6.1.6. Fabricante	P.1200
PC.C6.1.7. Reparador	P.1200
PC.C6.1.8. Instalador	P.1200
PC.C6.1.9. Usuario	P.1201
PC.C6.1.10. Inspecciones y pruebas periódicas	P.1201
PC.C6.1.11. Inspector propio	P.1201
PC.C6.1.12. Inspecciones y pruebas previas	P.1201
PC.C6.1.13. Control de calidad	P.1201
PC.C6.2. Definiciones de ámbito técnico	P.1201
PC.C6.2.1. Presión de diseño ( $P_d$ )	P.1201
PC.C6.2.2. Presión máxima de servicio ( $P_{ms}$ )	P.1202
PC.C6.2.3. Presión de precinto	P.1202
PC.C6.2.4. Presión de servicio ( $P_s$ )	P.1202
PC.C6.2.5. Presión de prueba ( $P_p$ )	P.1202
PC.C6.2.6. Temperatura máxima de servicio ( $T_s$ )	P.1202
PC.C6.2.7. Temperatura de servicio ( $T_s$ )	P.1202
PC.C6.3. Condiciones generales para todos los aparatos	P.1203

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

### Índice general

---

PC.C6.3.1. Manual de diseño	P.1203
PC.C6.3.2. Certificados	P.1204
PC.C6.3.3. Proceso de fabricación	P.1204
PC.C6.3.4. Legalización de aparatos a presión	P.1204
PC.C6.3.5. Instalación	P.1205
PC.C6.3.6. Inspecciones y pruebas	P.1206
PC.C6.3.7. Placas	P.1209
PC.C6.3.8. Elementos de seguridad	P.1209
PC.C6.4. Prueba para las tuberías	P.1210
PC.C6.5. Prueba de los sistemas antes de la puesta en marcha	P.1210
PC.C6.5.1. Prueba hidrostática	P.1210
PC.C6.5.2. Lavado del equipo	P.1211
PC.C6.5.3. Comprobación de servicios auxiliares	P.1212
PC.C7. Ejecución de las obras	P.1213
PC.C7.1. Ejecución en general	P.1213
PC.C7.2. Replanteo	P.1213
PC.C7.3. Comprobación del replanteo	P.1213
PC.C7.4. Fijación de los puntos de replanteo	P.1214
PC.C7.5. Programación de los trabajos	P.1214
PC.C7.6. Ensayos	P.1215
PC.C7.7. Orden de los trabajos	P.1216
PC.C7.8. Ejecución en general	P.1216



---

## **PC.C1.Generalidades**

### **P1.C1.1. Objeto**

El pliego de condiciones constituye el documento más importante desde el punto de vista contractual pues recoge las exigencias de índole técnica y legal que han de regir en la ejecución del proyecto.

El objeto del presente pliego de condiciones es definir el conjunto de directrices, requisitos y normas aplicables al desarrollo de las obras a las que se refiere el PFC: **“Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas”**. Contiene las condiciones técnicas normalizadas referentes a los materiales y equipos, el modo de ejecución, medición de las unidades de obra y, en general, cuantos aspectos han de regir en las obras comprendidas en el presente proyecto.

El contratista está obligado a ejecutar el proyecto según se especifica en el pliego de condiciones. Del mismo modo, la administración podrá conocer de forma detallada las diferentes tareas que se desarrollarán durante la ejecución del proyecto.

### **PC.C1.2. Documentos que definen las obras**

Los documentos que definen las obras y que la propiedad entregará al contratista pueden tener carácter contractual o meramente informativo. Son documentos contractuales planos, pliego de condiciones y presupuestos, que se incluyen en el presente PFC. Los datos incluidos en la memoria y anexos tienen carácter meramente informativo.

Cualquier cambio en el planteamiento de las obras que implique un cambio sustancial respecto a lo proyectado, deberá ponerse en conocimiento de la dirección facultativa, para que lo apruebe si procede, y redacte el oportuno proyecto reformado.

### **PC.C1.3. Obras accesorias no especificadas en el proyecto**

Si en el transcurso de los trabajos se hiciese necesario ejecutar cualquier clase de obras o instalaciones que no se encuentren descritas en el pliego de condiciones, el adjudicatario estará obligado a realizarlas con estricta sujeción a las órdenes que, al efecto, reciba de la dirección facultativa y, en cualquier caso, con arreglo a las reglas del buen arte constructivo.

La dirección facultativa tendrá plenas atribuciones para sancionar la idoneidad de los sistemas empleados, los cuales estarán expuestos para su aprobación de forma que, a su juicio, las obras y/o instalaciones que resulten defectuosas total o parcialmente, deberán ser demolidas o desmontadas en su totalidad o en parte, sin que ello de derecho a ningún tipo de reclamación por parte del adjudicatario.

### **PC.C1.4. Contradicciones, omisiones o errores**

En el caso de contradicción entre los planos y el pliego de condiciones técnicas, prevalecerá lo indicado en este último. Lo mencionado en el pliego de prescripción técnica, habrá de ser aceptado como si estuviese expuesto en ambos documentos, siempre que, a juicio del director de obra, quede suficientemente definida la unidad de obra correspondiente y esta tenga precio en el contrato.

Si alguna parte de la obra no quedara suficientemente especificada en esta documentación, a juicio de la contrata o de la propiedad, no se realizará hasta que la dirección facultativa diera las indicaciones precisas y concretas para su ejecución. Este extremo se advertirá a la citada dirección por escrito, con la antelación suficiente para que se pueda estudiar el problema y aportar la solución más acertada sin que ello suponga retraso en la marcha de la obra. El tiempo de antelación variará con la importancia del estudio, siendo el mínimo de una semana.

Cuando se trate de aclarar, interpretar o modificar preceptos de los pliegos de condiciones o indicaciones de los planos o dibujos, las órdenes e instrucciones correspondientes se comunicarán por escrito al contratista, estando éste obligado a su vez a devolver, ya los originales, ya las copias, suscribiendo con su firma que queda enterado.

### **PC.C2. Condiciones generales de índole facultativa**

#### **PC.C2.1. Obligaciones y derechos del contratista**

La propiedad entregará al contratista, libre de todo gasto, tres copias de todos los planos necesarios para la ejecución del trabajo.

Se considerará que el contratista ha comprobado el lugar de construcción, los planos, especificaciones y listas antes de presentar su oferta, y que ha quedado conforme con las condiciones en que habrá que ejecutarse el trabajo.

Deberá conocer las disposiciones laborales, o de otra índole vigente, que pueden ser de aplicación en la realización del trabajo; la disponibilidad de mano de obra local, la disponibilidad de materiales, las condiciones locales de transporte y alojamiento del personal. No se admitirá ninguna reclamación del mismo por no haber hecho anteriormente dicha comprobación. El contratista proporcionará un número suficiente de operarios competentes y el personal supervisor y administrativo necesario a fin de cumplir con el programa de construcción.

Durante todo el período de ejecución del trabajo, el contratista destacará en la obra un jefe de obra competente y tantos ayudantes como sean necesarios para controlar o supervisar a todo su personal y administrar adecuadamente el contrato.

El jefe de obra será plenamente responsable de la dirección y organización del trabajo, como también del manejo y control del personal del contratista empleado para la ejecución de la obra, debiendo conocer detalladamente las condiciones y términos del contrato. El

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 3. Pliego de condiciones

---

contratista no podrá cambiar su jefe de obra si no es bajo previa autorización por escrito de la propiedad.

El contratista debe cumplir todas las reglamentaciones y órdenes, aplicables a las prácticas de salarios y empleos y en proceder de acuerdo con la política de la propiedad en los asuntos que afecten a las prácticas locales.

El contratista, mantendrá en condiciones adecuadas las facilidades temporales relativas a los servicios higiénicos y de resguardo de sus empleados y proporcionará de forma continuada, en el sitio de la obra durante la construcción, servicios apropiados de reconocimiento y primeros auxilios. También se tomarán las precauciones necesarias para una rápida asistencia médica en el lugar más cercano que proporcione dichos servicios.

El incumplimiento por parte de un empleado de la empresa contratista de las reglas y prácticas requeridas por la propiedad será justificada suficientemente para su despido.

Los empleados del contratista deben estar sujetos a identificación y provistos de los documentos aceptados por la propiedad para este efecto. El contratista mantendrá en el sitio de la obra un expediente individual de cada persona que regularmente se emplee en la construcción de la obra. Todos los empleados que visiten la planta deben seguir las instrucciones relativas a seguridad e identificación, tal como si estuvieran regularmente empleados en el sitio de la obra. Cualquiera de los oficiales de seguridad puede, en cualquier momento, solicitar la identificación apropiada o el de empleo de cualquier persona.

La propiedad notificará al contratista la reglamentación que afecte a visitas, accesos, entrada de automóviles en el recinto de la obra, pases especiales y zonas prohibidas de la línea de proceso.

---

## **PC.C2.2. Trabajo, materiales y medios auxiliares**

### **PC.C2.2.1. Libro de órdenes**

Con objeto de que en todo momento se pueda tener un conocimiento exacto de la ejecución e incidencias de la obra, existirá en ella, en todo momento mientras dure su ejecución, el libro de órdenes, en el que se reflejarán las visitas realizadas por la dirección de la obra, las incidencias surgidas y en general todos aquellos datos que sirvan para determinar con certeza si el contratista ha cumplido los plazos y fases de ejecución previstas para la realización del proyecto. Las anotaciones en el libro de órdenes darán fe a efectos de determinar eventuales causas de resolución y demás incidencias del contrato. Cuando el contratista no estuviese conforme, podrá alegar en su defensa todas aquellas razones y circunstancias que avalen su postura, aportando las pruebas que estime pertinentes.

### **PC.C2.2.2. Comienzo de los trabajos y plazo de ejecución**

Obligatoriamente y por escrito, deberá el contratista dar cuenta al ingeniero director del comienzo de los trabajos, antes de transcurrir 24 horas de su iniciación: previamente se habrá suscrito el acta de replanteo.

El Adjudicatario comenzará las obras dentro del plazo de 15 días desde la fecha de adjudicación. Dará cuenta al ingeniero director, mediante oficio, del día en que se propone iniciar los trabajos, debiendo este dar acuse de recibo.

Las obras quedarán terminadas dentro del plazo establecido en el contrato. El contratista está obligado al cumplimiento de todo cuanto se dispone en la reglamentación oficial del trabajo.

### **PC.C2.2.3. Condiciones generales de ejecución de los trabajos**

El contratista, como es natural, debe emplear los materiales y mano de obra que cumplan las condiciones exigidas en las Condicio-

nes Generales de Índole Técnica y realizará todos y cada uno de los trabajos contratados de acuerdo con lo especificado también en dicho documento. Por ello, y hasta que tenga lugar la recepción definitiva de la obra, el contratista es el único responsable de la ejecución de los trabajos que ha contratado y de las faltas y defectos que en estos puedan existir, por su mala ejecución o por la deficiente calidad de los materiales empleados o aparatos colocados, sin que pueda servirle de cortapisa ni le otorgue derecho alguno, la circunstancia de que el ingeniero director o sus subalternos no le hayan llamado la atención sobre el particular, ni tampoco el hecho de que hayan sido valorados en las certificaciones parciales de la obra que siempre se supone que se extienden y abonan a buena cuenta.

#### PC.C2.2.4. Personal técnico

El contratista está obligado a dedicar a los trabajos (tanto de obra civil como de montaje e instalación de líneas y equipos) el personal técnico a que se comprometió en la licitación. A pie de obras, y al frente de las mismas, deberá haber un ingeniero.

El personal así designado no será asignado a otras obligaciones mientras duren los trabajos.

Por otra parte, el personal a cargo del contratista deberá estar lo suficientemente cualificado para la realización de los trabajos. Es responsabilidad del contratista, por lo tanto, cualquier retraso derivado de la incompetencia o ignorancia del personal a su cargo.

El director podrá prohibir la presencia en la zona de trabajos de determinado personal del contratista por motivo de falta de obediencia o respeto, o por causa de actos que comprometan o perturben, a su juicio, la seguridad o marcha de los trabajos.

El contratista podrá recurrir, si entendiéndose que no hay motivo fundado para dicha prohibición.

#### PC.C2.2.5. Trabajos nocturnos

Los trabajos nocturnos deberán ser previamente autorizados por el director, y solamente realizados en aquellas unidades de obra que así lo requieran. El contratista deberá instalar los equipos de iluminación y mantenerlos en perfecto estado mientras duren los trabajos nocturnos.

#### PC.C2.2.6. Accidentes de trabajo

El contratista está obligado a cumplir la legislación vigente en materia de seguro contra riesgo de accidentes para su personal.

El contratista y la dirección de obra fijaran de antemano las condiciones de seguridad en las que se llevaran a cabo los trabajos objeto del presente proyecto, así como las pruebas, ensayos, inspecciones y verificaciones necesarias, que en cualquier caso deberán ser como mínimo, las prescritas por los reglamentos actuales vigentes.

No obstante, en aquellos casos en que el contratista o la dirección consideren que se deben tomar disposiciones de seguridad, podrán tomarse éstas sin reserva alguna.

Por otra parte, el contratista será responsable de suministrar, al personal a su cargo, los equipos necesarios para que éste trabaje en condiciones de seguridad adecuadas, tales como cascos, pantallas faciales, botas reforzadas, gafas de protección, etc.

Asimismo, serán responsabilidad del contratista los posibles daños causados en las instalaciones, tanto terminadas o aún en construcción, ocasionados por personas ajenas a la obra dentro del horario establecido de trabajo, así como de los accidentes personales que puedan ocurrir.

En los trabajos concedidos a la contrata se cumplirá puntualmente el descanso en días festivos, del modo que se señale en las disposiciones vigentes.

En casos excepcionales, en los que fuera necesario trabajar en dichos días, se procederá como indican las citadas disposiciones.

#### PC.C2.2.7. Trabajos defectuosos

Como consecuencia de lo anteriormente expresado, cuando el ingeniero director o su representante en la obra adviertan vicios o defectos en los trabajos efectuados, o que los materiales empleados, o los aparatos colocados no reúnen las condiciones preceptuadas, ya sea en el curso de la ejecución de los trabajos, o finalizados éstos y antes de verificarse la recepción definitiva de la obra, podrán disponer que las partes defectuosas sean demolidas y reconstruidas de acuerdo con lo contratado, y todo ello a expensas de la contrata.

#### PC.C2.2.8. Equipos de maquinaria

El contratista quedará obligado a situar en las obras los equipos de la maquinaria que se comprometa a aportar en la licitación, y que el director de las obras considere necesario para el correcto desarrollo de las mismas. Dichos equipos de maquinaria deberán ser aprobados por el director.

La maquinaria y demás elementos de trabajo deberán estar en perfectas condiciones de funcionamiento y quedar adscritos a la obra durante el curso de la ejecución de las unidades en las que deban utilizarse. No podrán retirarse sin el consentimiento del director.

#### PC.C2.2.9. Materiales no utilizables o defectuosos

No se procederá al empleo y colocación de los materiales y de los aparatos sin que antes sean examinados y aceptados por el ingeniero director, en los términos que prescriben los pliegos de condiciones.

---

Quando los materiales o aparatos no fueran de la calidad requerida o no estuviesen perfectamente preparados, el ingeniero director dará orden al contratista para que los reemplace por otros que se ajusten a las condiciones requeridas en los pliegos o, a falta de éstos, a las órdenes del ingeniero director.

#### PC.C2.2.10. Medios auxiliares

Serán de cuenta y riesgo del contratista, los andamios, cimbras, máquinas y demás medios auxiliares que para la debida marcha y ejecución de los trabajos se necesiten, no cabiendo por tanto, al propietario responsabilidad alguna por cualquier avería o accidente personal que pueda ocurrir en las obras por insuficiencia de dichos medios auxiliares.

Serán asimismo de cuenta del contratista, los medios auxiliares de protección y señalización de la obra, tales como vallado, elementos de protección provisionales, señales de tráfico adecuadas, señales luminosas nocturnas, etc. Y todas las necesarias para evitar accidentes previsibles en función del estado de la obra y de acuerdo con la legislación vigente.

#### PC.C2.2.11. Precauciones especiales

*Lluvias:* Durante las fases de construcción, montaje e instalación de obras y equipos, estos se mantendrán en todo momento en perfectas condiciones de drenaje. Las cunetas y demás desagües se mantendrán de modo tal que no produzcan daños. El equipo que no necesite revisión o inspección previa a su instalación no será desembalado hasta el momento de la misma. Se protegerá el equipo desembalado de la lluvia mediante cubiertas y protectores adecuados.

*Incendios:* El contratista deberá atenerse a las disposiciones vigentes para la prevención y control de incendios, y a las recomendaciones u órdenes que reciba del director. En todo caso, adoptara las medidas necesarias para evitar la propagación de los que se requie-

ran para la ejecución de las obras, así como de los daños y perjuicios que se puedan producir. No obstante lo anterior, el contratista podrá exigir el asesoramiento de un técnico de seguridad competente, elegido por la dirección, en todos los casos en los que lo estime conveniente, y, particularmente, en aquellos en los que el riesgo de producción de incendio sea más elevado (soldadura, corte con sople, etc.).

#### **PC.C2.2.12. Señalización de las obras**

El contratista queda obligado a señalar a su costa la obra objeto del contrato, con arreglo a las instrucciones y uso de aparatos que prescriba el director.

### **PC.C2.3. Recepción y liquidación**

#### **PC.C2.3.1. Recepción provisional de las obras**

Terminado el periodo de la prueba de funcionamiento con resultado satisfactorio se procederá a la recepción provisional de la forma que dispone de la legislación vigente. Para ello deberán haberse cumplido las condiciones siguientes:

- Resultado satisfactorio de las pruebas realizadas.
- Cumplimiento de todas las obligaciones en el contrato o en acuerdos posteriores.
- En el acto de recepción estarán presentes: la persona en quien delegue la entidad promotora de las obras, la dirección de obra de las mismas y el contratista, levantándose acta del mismo.
- El acta de recepción contendrá necesariamente los siguientes documentos:
- Relación de problemas de funcionamiento pendientes de resolver si diera el caso.
- Relación de los puntos que deben ser estudiados o vigilados especialmente durante el periodo de garantía.

- Protocolo de las pruebas de rendimiento y funcionamiento a realizar durante el periodo de garantía.

En el caso de que las obras no se hallaran en estado de ser recibidas, se hará constar así en el acta, con medición de las circunstancias o defectos que lo impidan, dándose las instrucciones precisas y detalladas por la dirección de obra al contratista a efectos de subsanar los defectos observados, fijándose plazo para efectuarlo, a cuyo vencimiento se realizará una nueva inspección para la recepción provisional de las obras. Si el contratista no subsanase los defectos encontrados se producirá la rescisión del contrato, con pérdida de las retenciones practicadas a no ser que la propiedad juzgue oportuno conceder un nuevo e improrrogable plazo.

El plazo de garantía comenzará a contarse a partir de la fecha de la recepción provisional positiva de la obra.

En la recepción provisional, el contratista deberá presentar las autorizaciones de los organismos oficiales para el uso y puesta en servicio de las instalaciones que así lo requieran, no se realizará la recepción provisional ni, como es lógico la definitiva, si no se cumple este requisito.

#### PC.C2.3.2. Período de garantías

El contratista garantiza en general todas las obras que ejecute, así como los materiales empleados en ellas y su correcta manipulación.

El plazo de garantía será de doce meses, a no ser que se especifique otro periodo en el proyecto de detalle, durante el cual el contratista corregirá los defectos observados, eliminará y volverá a ejecutar las obras rechazadas y reparará los desperfectos que se produzcan, todo ello a su cargo y sin derecho de indemnización alguna.

En caso de que el contratista no cumpliera con esta obligación, las reparaciones serán ejecutadas por la propiedad con cargo a las retenciones.

Junto con la recepción final de los equipos se entregará una lista de repuestos, precio y lugares de adquisición recomendados de los mismos.

El contratista podrá contratar con la propiedad un contrato de mantenimiento preventivo o de asistencia en caso de avería, que cubra el periodo de garantía y el tiempo posterior a éste.

Para poder decidir sobre las cuentas pendientes de resolver o que surjan durante el periodo de garantía o en la ejecución de pruebas, incluyendo naturalmente las reparaciones, modificaciones o sustituciones que se presenten, el contratista queda obligado a mantener un representante con capacidad y obligación de firmar las actas que se vayan levantando.

El contratista garantiza a la propiedad contra toda reclamación de terceras personas que tuvieran su origen en el incumplimiento de sus obligaciones económicas o de las disposiciones legales relacionadas con la obra. Una vez aprobada la recepción y liquidación definitiva, la Propiedad devolverá, en su caso, las cantidades retenidas al contratista en las certificaciones.

#### PC.C2.3.3. Recepción definitiva

Dentro del mes siguiente al cumplimiento del plazo de garantía, se procederá a la recepción definitiva de las obras.

Si las obras se encontrasen en las condiciones debidas, se procederá a su recepción definitiva, de la que se levantará acta, en virtud de lo cual el contratista quedará relevado de toda responsabilidad.

El acta de recepción definitiva de las obras se efectuará después de terminado el periodo de garantía en la forma que dispone la legislación vigente. En dicho acta deberán quedar resueltas todas las cuestiones que en el acta de recepción provisional quedaron pendientes del funcionamiento durante el periodo de garantía.

#### **PC.C2.3.4. Documentación final de la obra**

El contratista entregará a la dirección de obra, antes de la recepción definitiva, tres ejemplares del documento elaborado como final de obra. Dicho documento deberá recoger todas las incidencias acaecidas en la obra desde su inicio hasta su finalización, así como aquellas modificaciones que durante el transcurso de la misma hayan tenido lugar. Del mismo modo, quedarán perfectamente reflejadas, mediante la documentación gráfica correspondiente, la ubicación final de todas las instalaciones para que, de este modo se facilite cualquier trabajo de reparación o modificación que resulte necesario llevar a cabo con posterioridad.

#### **PC.C2.4. Facultades de la dirección de obra**

Además de todas las facultades particulares, que corresponden al ingeniero director, expresadas en los artículos precedentes, es misión específica suya, la dirección y vigilancia de los trabajos que en las obras se realicen bien por sí mismos o por medio de sus representantes técnicos y ello con autoridad técnica legal, completa e indiscutible, incluso en todo lo no previsto específicamente en el Pliego General de Condiciones sobre las personas y cosas situadas en la obra y en relación con los trabajos que para la ejecución de los edificios y obras anejas se lleven a cabo, pudiendo incluso, recusar al contratista, si considera que el adoptar esta resolución es útil y necesaria para la debida marcha de la obra.

### **PC.C3. Condiciones generales de índole económica**

#### **PC.C3.1. Percepción económica del contratista**

Como base fundamental de estas condiciones generales de índole económica, se establece el principio de que el contratista debe percibir el importe de los trabajos realizados, siempre que éstos se hayan ejecutado con arreglo y sujeción al proyecto.

#### **PC.C3.2. Precios unitarios**

Todos los materiales que intervengan en la construcción de las obras objeto de este proyecto (aun en el caso de aumento de las unidades especificadas o unidades que puedan aparecer) serán de cuenta del contratista, no admitiéndose por tanto ningún aumento por este concepto.

A efectos de propuesta y plazo, el contratista no debe contar con los suministros de terceros, comprometiéndose a construir o instalar todos los materiales o equipos necesarios para la terminación de los trabajos en el plazo señalado.

#### **PC.C3.3. Precios descompuestos**

Una vez adjudicadas las obras el contratista ha de presentar dentro de los quince días siguientes los precios descompuestos de las unidades solicitadas. La no presentación indica que acepta en su día los precios descompuestos preparados por la Dirección.

La descomposición estará perfectamente detallada en cada unidad de obra, como a continuación se indica:

- Materiales, expresando las cantidades que en cada unidad de obra se precisen de cada uno de ellos y su precio unitario respectivo de origen.

- Mano de obra, por categorías dentro de cada oficio, expresando el número de horas invertidas por cada operario en la ejecución de cada unidad de obra.
- Transporte de materiales, desde el punto de origen al pie de la obra, expresando el precio del transporte por unidades, o número que la costumbre tenga establecido.
- Tanto por ciento de medios auxiliares y de seguridad, sobre la suma de los conceptos anteriores en las unidades de obra que se precisen.
- Tanto por ciento de seguros sociales y cargas vigentes sobre el costo de la mano de obra, especificando en documento aparte la cuantía de cada concepto del seguro o carga.
- Tanto por ciento de gastos generales, sobre la suma de los conceptos anteriores.
- Tanto por ciento de beneficio industrial del contratista, aplicado a la suma total de los conceptos anteriores.

La suma de todas las cantidades que importan los siete puntos anteriores se entiende que es precio unitario contratado.

El contratista deberá asimismo presentar una lista de precios de jornales, de los materiales de origen, del transporte, del tanto por ciento que importa cada uno de los seguros o cargas sociales vigentes y las partidas que se incluyen en el concepto de gastos generales, todo ello referido a la fecha de la suma del presupuesto.

El contratista deberá facilitar junto con el precio base del material la marca y fabricante, junto con la fecha de la lista de precios utilizada como base de estudio.

#### **PC.C3.4. Fijación de precios unitarios no contratados**

Los precios de unidades de obra, de los materiales, así como de la mano de obra que no figure entre los contratados, se fijaran contradictoriamente entre la dirección facultativa y el contratista.

El contratista los presentará descompuestos de acuerdo con lo establecido anteriormente siendo condición necesaria la presentación y aprobación de estos precios por la Dirección antes de proceder a ejecutar las unidades de obra correspondientes. En caso de que transcurrido el plazo señalado por la Dirección de su ejecución, sin presentación supone que el contratista acepta los que la Dirección posteriormente fije.

### **PC.C3.5. Variaciones en los precios unitarios**

En el caso de altas o bajas oficiales en el precio de los materiales, mano de obra o de cualquier otro concepto que modifique los precios unitarios de base, el contratista tiene la obligación de comunicar en la fecha de dicha variación, por duplicado, a la dirección facultativa y al propietario de dichas valoraciones, así como la valoración exacta hasta el día citado de la obra ejecutada con su importe.

El contratista sólo tendrá derecho a las alzas oficiales de mano de obra del personal que intervenga directamente en la obra o instalación, no afectando a la mano de obra de preparación de materia prima o detalles.

### **PC.C3.6. Obras complementarias. Cambios de materiales**

El Ingeniero Director, podrá si así lo considera necesario, ordenar obras complementarias no especificadas en los pliegos de condiciones ni en los presupuestos, pero que son necesarias para la buena terminación de las mismas.

Todos los trabajos se abonaran por medición. Cuando el contratista, incluso con la autorización del Ingeniero Director, utilizándose materiales de mayor precio que el señalado en el proyecto o introdujese alguna modificación que a juicio de la Dirección sea beneficiosa, o por no tener el material necesario ponga mayor cantidad, no tendrá derecho a percibir ninguna diferencia de precios, sino solamente lo estipulado en el presupuesto adjudicado.

---

### **PC.C3.7. Valoración y abono de los trabajos**

#### **PC.C3.7.1. Forma de abono de las obras**

La forma de pago será la que se acuerda en el documento privado que firmen la propiedad y el contratista.

#### **PC.C3.7.2. Abono de unidades de obra ejecutadas**

El contratista deberá percibir el importe de todas aquellas unidades de obra que haya ejecutado con arreglo y sujeción a los documentos del proyecto, a las condiciones de la contrata y a las órdenes e instrucciones que por escrito entregue la dirección facultativa, siempre dentro de las cifras a que ascienden los presupuestos aprobados.

#### **PC.C3.7.3. Relaciones valoradas y certificaciones**

En cada una de las épocas o fechas que estipule el documento privado o contrato entre propiedad y contratista, éste último presentará a la dirección facultativa una relación valorada de las obras ejecutadas durante los plazos previstos.

#### **PC.C3.7.4. Liquidaciones parciales**

Periódicamente el contratista tendrá derecho a percibir una cantidad proporcional a la obra ejecutada en aquel periodo. A la vista del calendario de obra, se fijará el alcance de cada uno de los periodos y las cantidades a percibir al final de ellos.

#### **PC.C3.7.5. Documentación final de la obra**

Terminadas las obras se procederá a hacer la liquidación general, que constará de las mediciones y valoraciones de todas las unidades que constituyan la obra.

#### PC.C3.7.6. Pagos

Los pagos se efectuarán por el propietario al contratista en los plazos previamente establecidos, y su importe corresponderá precisamente al de las certificaciones de obra expedida por la dirección facultativa, en virtud de las cuales se verificarán aquellos.

#### PC.C3.7.7. Suspensión o retraso en el ritmo de los trabajos

En ningún caso podrá el contratista, alegando retraso en los pagos, suspender trabajos ni ejecutarlos a menor ritmo que el que corresponda, con arreglo al plazo en que deban terminarse. Cuando el contratista proceda de dicha forma, podrá el propietario rescindir la contrata.

### **PC.C4. Condiciones generales de índole legal**

La normativa actualmente vigente y que deberá cumplirse en la realización del presente proyecto es la siguiente:

- Reglamento de Instalaciones Petrolíferas (Real Decreto 2085/1994, del 20 de octubre) y sus Instrucciones Técnicas Complementarias MI-IP 01 “*refinerías*” y MI-IP 02 “*Parques de almacenamiento de líquidos petrolíferos*”.
- Reglamento sobre Almacenamiento de Productos Químicos (Real Decreto 668/1980 del 8 de Febrero y 3485/1983 del 14 de Diciembre) y su Instrucción Técnica Complementaria MIE APQ - 001 “*Almacenamiento de líquidos inflamables y combustibles*”.
- Reglamento de Aparatos a Presión (Real Decreto 1244/1979 del 4 de Abril) y su Instrucción Técnica Complementaria ITC-MIE AP 6 “*Refinerías de Petróleo y Plantas Petroquímicas*”.
- Reglamento de Seguridad en Máquinas (Real Decreto 1495/1986).
- Reglamento de Instalaciones de Protección Contra Incendios (Real Decreto 1492/1993 del 5 de Noviembre).

- Ley de Prevención de Riesgos Laborales (Ley 31/1995) y sus respectivas modificaciones.
- REAL DECRETO 61/2006, de 31 de enero, por el que se fijan las especificaciones de gasolinas, gasóleos, fuelóleos y gases licuados del petróleo, y el uso de biocarburantes.

#### **PC.C4.1. El contrato**

El contrato se formalizara mediante documento privado o público según convengan las partes, promotor y contratista, y en él se especificaran las particularidades que convengan a ambos.

El contratista y el promotor previamente firmaran el presente pliego obligándose a su cumplimiento, siendo nulas las cláusulas que se opongan o anulen disposiciones del mismo.

La ejecución de las obras se contratará por unidades de obra, ejecutadas con arreglo a los documentos del proyecto. Se admitirán subcontratas con firmas especializadas, siempre que estén dentro de los precios que fije el presupuesto del proyecto.

#### **PC.C4.2. Arbitraje obligatorio**

Ambas partes se comprometen a someterse al arbitraje de amigables componedores, designados uno de ellos por el propietario, otro por el contratista y tres ingenieros del colegio oficial correspondiente, uno de los cuales será forzosamente el director de obra.

#### **PC.C4.3. Jurisdicción competente**

En caso de no haberse llegado a un acuerdo por el anterior procedimiento, ambas partes quedan obligadas a someter la discusión de todas las cuestiones que pueden surgir como derivadas de su contrato, a las autoridades y tribunales administrativos, con arreglo a competente la jurisdicción donde estuviese enclavada la obra.

#### **PC.C4.4. Responsabilidad del contratista**

El contratista es responsable de la ejecución de las obras en las condiciones establecidas en el contrato y en los documentos que componen el proyecto.

Son de exclusiva responsabilidad del contratista:

- Todos los accidentes que por inexperiencia o descuido sucedan a los operarios, tanto en la construcción como en los andamios, debiendo atenerse a lo dispuesto en la legislación vigente sobre accidentes de trabajo y demás preceptos, relacionados con la construcción, régimen laboral, seguros, subsidios, etc...
- El cumplimiento de las Ordenanzas y disposiciones Municipales en vigor. Y en general será responsable de la correcta ejecución de las obras que haya contratado, sin derecho a indemnización por el mayor precio que pudieran costarle los materiales o por erradas maniobras que cometiera, siendo de su cuenta y riesgo los perjuicios que pudieran ocasionarse.

#### **PC.C4.5. Causas de rescisión del contrato**

- Si por negligencia o por cualquier otra causa, no cumpliera el contratista con alguna de las condiciones fijadas en este pliego de condiciones.
- Cuando sea aprobado por la Dirección que el contratista hubiera procedido de mala fe o ignorancia con el suministro de materiales o en la ejecución de las obras.
- Cuando se llevara en el desarrollo de la obra una lentitud perjudicial para la buena marcha y terminación de las mismas.
- Cuando el contratista se negase a hacer por su cuenta los trabajos precisos para ultimar la obra en las condiciones contratadas. En este caso el ingeniero, en nombre y repre-

sentación del propietario, ordenara ejecutarlas a un tercero, con cargo a la fianza depositada, sin perjuicio de que el importe de la fianza no fuese suficiente para abonar los gastos efectuados en las unidades de obra que no fuesen de recibo.

- En caso de muerte o incapacidad del contratista.
- En caso de quiebra del contratista.
- Las modificaciones del proyecto en tal forma que represente alteraciones fundamentales del mismo a juicio del ingeniero y en cualquier caso siempre que la variación del presupuesto de ejecución como consecuencia de estas modificaciones representen en mas o en menos el 25% como mínimo del importe de aquél.
- Las suspensiones de obra comenzadas y en todo caso siempre que por causas ajenas a la contrata no se dé comienzo a la adjudicación, en este caso la devolución de la fianza, en caso de existir, será automática.
- La suspensión de obras comenzadas, siempre que el plazo de suspensión, haya excedido más de un año.
- El no dar comienzo la contrata a los trabajos dentro del plazo señalado en las condiciones particulares del proyecto. La terminación del plazo de ejecución de la obra sin haber llegado a ésta.
- El abandono de la obra sin causa justificada.

### **PC.C5. Condiciones generales técnicas de los materiales y equipos**

El presente apartado del pliego de condiciones tiene por objeto establecer las calidades y características de los equipos y dispositivos objeto de este PFC, así como de los materiales que los constituyen.

#### **PC.C5.1. Referencias y normativas**

Se tendrán como de obligado cumplimiento las siguientes normas y estándares:

- Código de construcción de recipientes a presión ASME, Sección VIII, División I.
- Se aplicarán las prescripciones de este código en los aspectos referentes a presiones y temperaturas de diseño, espesores de cuerpos y fondos, presiones de prueba, tests hidrostáticos y soldadura. Se aplicarán también las prescripciones de este código a la juntas.
- Standards of the Tubular Exchangers Manufactures Association (TEMA). Sixth Edition, 1986.
- Norma API 610 para bombas de proceso en servicios de refino y petroquímica.
- Normas ASME B.31.3 para diseño de sistemas de tuberías para el transporte del petróleo.
- Norma ANSI B.36.10 para dimensiones de tuberías de acero al carbono y aleada soldada y sin soldadura.
- Norma ANSI B.16.5 para clasificación presión- temperatura, bridas, espárragos para bridas, válvulas bridadas y accesorios bridados de acero.
- Norma ANSI B.18.2 para espárragos y tuercas.
- Norma ANSI B.16.9 para accesorios de acero para soldar a tope.

- 
- Norma ANSI B.16.11 para accesorios de acero para soldar a enchufe y roscados.
  - Norma ANSI B.16.10 para la definición de dimensiones de válvulas bridadas.
  - Norma ANSI B.16.34 para válvulas para soldara a tope.
  - Norma API 600 para válvulas de compuerta.
  - Norma API 602 para válvulas de compuerta de pequeña dimensión.
  - Norma API 598 para inspección y prueba de válvulas.
  - Norma API RP 520 para el dimensionamiento de válvulas de seguridad para recipientes a presión.
  - Normas ASTM A-106 gr. B para tuberías de acero al carbono sin soldaduras.
  - Norma ASTM A-234 WPB para accesorios de acero al carbono obtenidos de tubos para soldar a tope.
  - Norma ASTM A-216 WCB para válvulas y accesorios bridados de acero al carbono fundido.
  - Norma ASTM A-105 para bridas, válvulas y accesorios de acero al carbono forjado roscados y para soldar a enchufe.
  - Norma ASME SA-285 gr. C para cuerpos cilíndricos y fondos de recipientes.
  - Norma ASME SA-179 para tubos de intercambiador de calor.
  - Norma ASME SA-212 gr. B para placas tubulares de intercambiador de calor.

## **PC.C5.2. Condiciones para los materiales**

### **PC.C5.2.1. Condiciones generales para los materiales**

Todos los materiales tendrán las condiciones técnicas que dictan las normas citadas en el apartado “referencias y normativas” del presente apartado del pliego de condiciones.

Las características de los mismos serán las expresadas en los apartados que siguen, pudiendo la dirección técnica desechar aquellos que a su juicio no las reúnan.

No podrán ser en ningún caso distintos en sus características a los tipos proyectados. Si hubiese que variar la clase de algunos inicialmente aprobados, los nuevos no podrán ser instalados sin la previa autorización de la dirección de obra, la cual podrá someterlos a cuantas pruebas estime oportunas.

Cuando la procedencia de los materiales no esté fijada en el pliego de prescripciones técnicas, los materiales requeridos para la ejecución del contrato serán fijados por el contratista de las fuentes de suministro que este estime oportuno.

El contratista notificará al director, con la suficiente antelación, los materiales que se propone utilizar y su procedencia, aportando, cuando así lo solicite el director, las muestras y los datos necesarios para su posible aceptación, tanto en lo que se refiere a su cantidad como a su calidad.

El no rechazo de un material no implica su aceptación. El no rechazo o la aceptación de una procedencia no impide el posterior rechazo de cualquier partida de material de ella que no cumpla las prescripciones, ni incluso la eventual prohibición de dicha procedencia.

---

En ningún caso podrán ser acoplados y utilizados en los trabajos materiales cuya procedencia no haya sido aprobada por el director.

*Manipulación de materiales:* Todos los materiales se manipularán con cuidado, y de tal modo que se mantengan su calidad y aptitud para la obra.

*Inspección de la planta:* Si el volumen de la obra, la marcha de la construcción y otras consideraciones lo justifican, el ingeniero puede proceder a la inspección del material o de los artículos manufacturados en sus respectivas fuentes.

*Inspección de los materiales:* Con objeto de facilitar la inspección y prueba de los materiales, el contratista notificará al ingeniero con dos semanas como mínimo de antelación a la entrega.

*Materiales defectuosos:* Todos los materiales que no se ajusten a los requisitos del pliego de condiciones se consideran defectuosos y, por tanto, se retirarán inmediatamente del lugar de la obra, a menos que el ingeniero ordene lo contrario. Los materiales rechazados, cuyos defectos se hayan corregido substancialmente, no se utilizarán mientras no se les haya otorgado la aprobación.

#### PC.C5.2.2. Acopios

Quedará terminantemente prohibido, salvo autorización escrita del director, efectuar acopio de materiales, cualesquiera que sea su naturaleza, sobre la plataforma de obra y en aquellas zonas marginales que definan el director.

Se considera especialmente prohibido el depositar materiales, herramientas, maquinaria, escombros o cualquier otro elemento no deseable, en las siguientes zonas:

- Áreas de procesos adyacentes o limítrofes con la zona donde se realizan los trabajos.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 3. Pliego de condiciones

---

- Desagües y zonas de trabajo en general.
- Vías de acceso a casetas de operación, puntos de reunión para estados de emergencia y puntos de situación de extintores.
- Calles y vías de circulación interior, tanto de la zona de construcción como de áreas de proceso adyacentes a ésta.
- En general, cualquier lugar en el que la presencia de materiales, herramientas o utensilios pueda entorpecer las labores de mantenimiento y operación de las unidades de proceso, o pueda dificultar el proceso de emergencia de la planta.
- Los materiales se almacenaran en forma tal que se asegure la preservación de su calidad para su utilización en la obra, requisito que deberá de ser comprobado en el momento de su utilización.

Las superficies empleadas en la zona de acopios deberán acondicionarse de forma que, una vez terminada su utilización, recuperen su aspecto original. Todos los gastos que de ello se deriven correrán por cuenta del contratista.

### PC.C5.2.3. Condiciones para las tuberías

Las tuberías serán de los diámetros especificados en los correspondientes de anexos a la memoria. Serán de sección circular, de espesor uniforme y sin costura. Se montarán a partir de cañas con los extremos achaflanados para soldar a tope.

Estarán exentas de fisuras, grietas, poros, impurezas, deformaciones o faltas de homogeneidad, así como de otros defectos que pudieran disminuir su resistencia y apartar su comportamiento del esperado por sus características.

Las tuberías destinadas a las líneas serán de acero al carbono según SA-106 grado B.

---

**PC.C5.2.4. Condiciones para las bridas**

Las bridas serán de acero al carbono forjado según SA-105, del tipo de cuello soldado (*welding neck*), con cara elevada y de 150 libras de presión primaria en servicio.

Las bridas estarán libres de defectos, irregularidades, rebabas, etc., que puedan dificultar su instalación o montaje, o que puedan afectar negativamente a su comportamiento durante el proceso. Las bridas habrán de ser planas y paralelas, o presentar rigidez suficiente contra deformaciones debidas a la presión de los espárragos. Éstos habrán de apretarse en cruz con llave dinamométrica para controlar el par de apriete.

**PC.C5.2.5. Condiciones para los accesorios soldables**

Los accesorios para las tuberías (codos, térs, reducciones, etc.) serán de acero según SA-234 WPB para soldar a tope ó según SA-105 para roscar o soldar a enchufe, según corresponda, siendo su diámetro el correspondiente a las líneas en las que vayan instalados. Estarán libres de defectos, irregularidades, etc., que puedan afectar negativamente a su comportamiento durante el proceso.

**PC.C5.2.6. Condiciones de las placas de fabricación de los equipos**

Las placas a partir de las que se fabriquen los nuevos equipos previstos estarán fabricadas en acero al carbono según SA-285 grado C.

Estarán libres de fisuras, grietas, poros, etc., que puedan disminuir sus resistencias o afectar a su comportamiento durante su funcionamiento dentro del proceso.

### **PC.C5.3. Condiciones para los equipos**

#### **PC.C5.3.1. Condiciones para los intercambiadores de calor y tanques**

Tanto si son trasladados al lugar de emplazamiento montado, como si lo son por partes, el equipo o sus partes serán protegidos adecuadamente contra la lluvia, el polvo, los golpes o las deformaciones. Si desde que los equipos fueran recibidos desde el taller del fabricante hasta que fueran montados en el terreno hubiera de transcurrir un periodo de tiempo que la dirección técnica considerase razonablemente largo, serían almacenados bajo techado en lugar seco, y se tomarían precauciones para que no sufrieran contaminación, oxidación excesiva, acumulación de humedad o suciedad, así como golpes o deterioros.

El ingeniero director supervisará los equipos antes de su montaje, comprobará su buen estado y podrá rechazarlos si observa anomalías que a su juicio puedan provocar dicho rechazo.

En el lugar de emplazamiento se habrá previsto el espacio suficiente para permitir la extracción del haz y los desmontajes de bridas y cabezales durante las paradas. Durante la instalación de los haces se protegerán con láminas de madera o metal, sujetadas mediante cables a pares de tubos de dichos haces. El haz se apoyará sobre las placas tubulares o sobre los deflectores, y nunca sobre los propios tubos. El alzado se hará mediante bandas trenzadas, y se tendrá especial cuidado de que los haces no sufran deformaciones.

Previa la puesta en marcha, se efectuarán las comprobaciones y operaciones que aparecen en el apartado sobre equipos a presión del presente pliego de condiciones.

#### **PC.C5.3.2. Condiciones para las bombas**

Las bombas serán iguales a aquellas con las que formen pareja y junto a las cuales conformen un grupo de bombeo, estando diseñada-

---

das según las normas API 610 para bombas de proceso, y permaneciendo en reserva durante la operación normal de la unidad.

Las bombas se suministrarán con la correspondiente bancada, sobre la que se montará el conjunto bomba- motor. La bancada estará constituida por perfiles de acero, dimensionada de forma que soporte los esfuerzos de arranque, y garantizará la estabilidad del conjunto bomba- motor.

Cada bomba se instalará dejando una pendiente para la evacuación de posibles derrames. Esta pendiente se dirigirá hacia el lado opuesto del motor. El contratista presentará al ingeniero director los planos y memorias de las bombas a emplear, acompañados de los correspondientes certificados de pruebas de sobrecarga, rodaje, etc., efectuadas en el taller del fabricante.

#### PC.C5.3.4. Condiciones para los equipos reutilizados

Se aplicará a los equipos sometidos a una alteración en sus condiciones de servicio lo recogido en el apartado “equipos a presión” del presente pliego de condiciones, especialmente en lo que se refiere a inspecciones y pruebas en el lugar de emplazamiento del aparato antes de su puesta en servicio.

### **PC.C5.4. Condiciones para los equipos**

#### PC.C5.4.1. Condiciones sobre pintura y preparación de superficies

Todas las superficies exteriores de equipos y tuberías recibirán, antes del pintado, el tratamiento de preparación siguiente:

- Limpieza con disolventes de las zonas excesivamente cargadas de grasa o aceites, o que durante el proceso de instalación y manipulación hayan quedado impregnadas de estas sustancias o similares.
- Eliminación de depósitos de óxidos muy voluminosos mediante limpieza natural o mecánica. Esto puede hacer-

se mediante lijado de cordones y salpicaduras de soldadura.

- Redondeado de aristas vivas y alisado mediante lijado de cordones y salpicaduras de soldadura.
- Protección de zonas y anexos que no vayan a ser recubiertos.
- Limpieza con aspirador o aire a presión de residuos abrasivos, polvo, y demás partículas extrañas y contaminantes.

#### **PC.C5.4.2. Condiciones para los aislamientos**

Los equipos de nueva instalación contemplados en el presente proyecto, así como las líneas cuyo aislamiento se prevé, con la excepción de las líneas de purga, irán calorifugados con manta de lana de vidrio. Las mantas a utilizar no habrán tenido usos anteriores. Asimismo, no presentarán cortes o deformaciones que, a juicio del ingeniero director, pudieran afectar a su capacidad aislante. La malla metálica galvanizada estará en buen estado.

Las superficies que se aislarán, habrán recibido su correspondiente pintado.

#### **PC.C6. Condiciones generales de los equipos a presión**

Dado que la totalidad de las líneas y equipos contemplados en el presente proyecto trabajan a presión superior a la atmosférica, se fijan las condiciones generales de fabricación, prueba, instalación, operación y funcionamiento de los mismos.

##### **PC.C6.1. Definiciones generales**

Con el fin de que la interpretación del presente pliego de condiciones sea clara e inequívoca, se proporcionarán, de acuerdo con el Reglamento de Aparatos a Presión del Ministerio de Industria y Energía, las siguientes definiciones.

#### PC.C6.1.1. Aparatos sometidos a presión

Aparato cuya presión máxima de servicio es superior a la atmosférica. Por lo que se refiere al presente proyecto, esta definición aplica a:

- Torres de destilación.
- Separadores gas-líquido.
- Acumuladores de reflujo.
- Intercambiadores de calor (calderines, condensadores, calentadores y refrigerantes),

#### PC.C6.1.2. Tuberías

Líneas de conducción de fluidos a presión o a vacío, no sometidas a fuego directo.

#### PC.C6.1.3. Sistemas

Conjunto de aparatos a presión, normalmente conectados en secuencia de proceso y susceptibles de ser probados a presión conjuntamente.

#### PC.C6.1.4. Diseño mecánico

Consiste en la definición completa e inequívoca de un aparato a presión en función de los datos básicos de proceso, código de diseño, características de los materiales a utilizar, proceso de fabricación y control de calidad.

#### PC.C6.1.5. Ingeniería

Persona jurídica o técnico titulado competente que, mediante el conocimiento y aplicación correcta de los códigos de diseño de aparatos a presión, y a partir de los datos básicos necesarios, realiza el diseño mecánico de dichos aparatos. Estas ingenierías deberán estar inscritas en el Registro de Sociedades de Ingeniería o en el colegio

oficial correspondiente, y cumplir los requisitos exigidos por la legislación vigente. Las ingenierías extranjeras que no dispongan de delegación en España debidamente legalizada deberán tener autorizado por la Dirección General de Innovación Industrial y Tecnológica el correspondiente contrato de asistencia técnica, suscrito con el fabricante o con alguna ingeniería.

#### PC.C6.1.6. Fabricante

Persona física o jurídica que, a partir de un diseño mecánico y mediante el conocimiento y aplicación correcta de los códigos de construcción de aparatos a presión y disponiendo de personal cualificado y medios apropiados, realiza el acopio de materiales, la fabricación y ensamblaje total o parcial de los componentes de los aparatos a presión, debiendo estar inscritos, los ubicados en territorio español, en el Libro de Registro de Fabricantes de la respectiva Delegación Provincial del Ministerio de Industria y Energía de la provincia donde se fabrica el aparato.

#### PC.C6.1.7. Reparador

Persona física o jurídica que, mediante el conocimiento e interpretación de los códigos, normas de construcción y de reparación de aparatos a presión, dispone de personal cualificado y medios apropiados para reparar los aparatos a presión, debiendo estar inscritos, los ubicados en territorio español, en el Libro de Registro de Reparadores de la respectiva Delegación Provincial del Ministerio de Industria y Energía de la provincia donde se encuentren sus talleres de reparación.

#### PC.C6.1.8. Instalador

Persona física o jurídica que, mediante el conocimiento e interpretación de las normas de instalación de aparatos a presión y disponiendo de personal cualificado y medios apropiados, instala los aparatos a presión, debiendo estar inscritos, los ubicados en territorio

español, en el Libro de Registro de Instaladores de la respectiva Delegación Provincial del Ministerio de Industria y Energía de la provincia donde se encuentre el domicilio social o sus talleres.

#### PC.C6.1.9. Usuario

Persona física o jurídica propietaria o explotadora de la refinería de petróleos o planta petroquímica donde se instalan los aparatos a presión.

#### PC.C6.1.10. Inspecciones y pruebas periódicas

Toda inspección y prueba posterior a la puesta en servicio de un aparato o sistema.

#### PC.C6.1.11. Inspector propio

Personal técnico competente designado por el usuario o contratado, con experiencia en la inspección de aparatos a presión de refinerías y plantas petroquímicas.

#### PC.C6.1.12. Inspecciones y pruebas previas

Toda inspección anterior a la puesta en servicio o durante la misma de un aparato o sistema.

#### PC.C6.1.13. Control de calidad

Se entiende como tal el de la ingeniería, fabricante o instalador, cuanto una inspección o prueba previa se realiza bajo su competencia y responsabilidad.

### **PC.C6.2. Definiciones de ámbito técnico**

#### PC.C6.2.1. Presión de diseño ( $P_d$ )

Se entiende como el valor de la presión que se toma para el cálculo del espesor del aparato, a la temperatura de diseño. La pre-

sión de diseño no podrá ser menor que la presión máxima de servicio.

PC.C6.2.2. Presión máxima de servicio ( $P_{ms}$ )

Se entiende como la presión más alta que se puede dar en el aparato o sistema, en condiciones extremas de funcionamiento del proceso.

PC.C6.2.3. Presión de precinto

Se entiende como la presión a la que están tarados los elementos de seguridad que protegen al aparato o al sistema.

PC.C6.2.4. Presión de servicio ( $P_s$ )

Se entiende como la presión normal de trabajo del aparato o sistema a la temperatura de servicio.

PC.C6.2.5. Presión de prueba ( $P_p$ )

Se entiende como aquella presión a la que se somete el aparato o sistema para comprobar su resistencia en las condiciones estáticas para las que fue diseñado. Corresponde a la mayor presión efectiva que se ejerce en el punto más alto del aparato o sistema durante la prueba de presión.

PC.C6.2.6. Temperatura máxima de servicio ( $T_{ms}$ )

Es el máximo valor de la temperatura que se estima, puede producirse en el interior del aparato o sistema, en condiciones extremas de funcionamiento.

PC.C6.2.7. Temperatura de servicio ( $T_s$ )

Es el valor de la temperatura alcanzada en el interior del aparato o sistema en condiciones normales de funcionamiento a la presión de servicio.

---

### **PC.C6.3. Condiciones generales para todos los aparatos**

Todas las prescripciones expresadas a continuación se aplicarán a los equipos de nueva instalación relacionados en el apartado aparatos sometidos a presión del presente apartado del pliego de condiciones, y, de entre ellas, las correspondientes a inspecciones y pruebas, al resto de los equipos disponibles.

#### **PC.C6.3.1. Manual de diseño**

De acuerdo con lo estipulado en el Reglamento de Aparatos a Presión del Ministerio de Industria y Energía, se entregará una copia al usuario del manual de diseño del aparato considerado, que comprenderá:

- Identificación de la ingeniería.
- Datos básicos de proceso necesarios para el diseño.
- Código de diseño o sistema de cálculo, ambos de reconocida solvencia técnica, y normas de construcción elegidas, cálculos justificativos, vida mínima estimada del equipo y demás especificaciones técnicas complementarias no contempladas por el código elegido y que la buena práctica requiera.
- Planos básicos normalizados según UNE, con indicación de los materiales a emplear y de los elementos que, por formar parte integrante del equipo a presión, puedan afectar a la seguridad del mismo.
- Especificación de prueba de presión.

La ingeniería que elabore el manual de diseño certificará que dicho manual cumple con el código de diseño elegido y que el aparato que se fabrique de acuerdo con él, será adecuado para el fin al que se destina.

### PC.C6.3.2. Certificados

Los materiales utilizados en la construcción de los elementos resistentes de los aparatos a presión deberán poseer los certificados de calidad correspondientes.

Los materiales de aportación que se utilicen en las soldaduras de los componentes de los aparatos a presión estarán clasificados bajo norma de reconocida solvencia técnica.

### PC.C6.3.3. Proceso de fabricación

Para el proceso de fabricación deberán utilizarse unas normas de construcción, control y pruebas acordes con el código de diseño.

### PC.C6.3.4. Legalización de aparatos a presión

Para cada aparato a presión construido, con la excepción de las tuberías, el fabricante deberá elaborar un manual de construcción acorde al manual de diseño, del cual entregará copia al usuario, que comprenderá:

- Número de inscripción en el Libro de Fabricantes de la respectiva Delegación Provincial del Ministerio de Industria y Energía de la provincia donde se fabrique el aparato.
- Nombre, razón social y domicilio de la ingeniería.
- Planos constructivos complementarios de los básicos que figuren en manual de diseño, comprobados por la ingeniería si fuese requerido contractualmente para ello por el fabricante o el usuario.
- Certificados de calidad de los materiales de base y materiales de aportación y de los componentes del aparato empleado en su construcción, aprobados por el control de calidad del fabricante, que puede ser propio o contratado a una ingeniería o entidad colaboradora.

- Procedimientos de conformado, soldadura, tratamientos térmicos y controles, calificación de procedimientos de soldaduras y soldadores, todo ello aprobado por el control de calidad del fabricante, que puede ser propio o contratado a una ingeniería o entidad colaboradora.
- Plano de situación de las zonas sometidas a control por ensayos no destructivos, ensayos requeridos, extensión de los mismos y resultados. Las placas radiográficas serán conservadas adecuadamente por el fabricante durante cinco años como mínimo, a partir de la fecha de fabricación del aparato.
- Certificado de ensayos y pruebas realizadas durante la construcción, aprobados por el control de calidad del fabricante o una entidad colaboradora, indistintamente, y comprobados por la ingeniería si fuera requerida contractualmente para ello por el usuario.
- Acta de la prueba a presión realizada por el fabricante y aprobada por el control de calidad del fabricante.
- Certificado del fabricante del aparato, en el que se hará constar que éste ha sido construido de acuerdo con el manual de diseño, el código y normas utilizadas en su fabricación.

El fabricante, al solicitar de la Delegación Provincial del Ministerio de Industria y Energía la placa de diseño, con su número de registro, presentará los documentos comprendidos en los tres puntos anteriores.

El fabricante de un aparato a presión es responsable de que dicho aparato ofrezca las garantías debidas para el fin a que se destina.

#### PC.C6.3.5. Instalación

Para cada instalación el instalador deberá elaborar un expediente de instalación acorde con los manuales de diseño y construc-

ción, el cuál entregará copia al usuario. Este expediente comprenderá:

- Número de inscripción en el Libro de Registro de Instaladores de la respectiva Delegación Provincial del Ministerio de Industria y Energía de la provincia donde se encuentre su domicilio social.
- Nombre, razón social y domicilio tanto del fabricante como del instalador.
- Relación de aparatos a instalar.
- Procedimientos de soldadura y calificación de la mano de obra, aprobados por el control de calidad del instalador.
- El instalador de todo sistema a presión es responsable de cualquier deficiencia que pudiera observarse o derivarse de las operaciones de instalación.

#### PC.C6.3.6. Inspecciones y pruebas

- Inspecciones y pruebas oficiales

Todos los aparatos a presión especificados en el apartado de aparatos sometido a presión deberán ser sometidos a las inspecciones y pruebas previas a la puesta en servicio correspondientes.

- Inspecciones y pruebas en el taller del fabricante

Se comprobará por el control de calidad del fabricante que cada equipo ha sido construido de acuerdo con los manuales de diseño y construcción, y quedará constancia de que se han cumplido cada uno de los requisitos previstos en los citados manuales, en cuyo caso se someterán a las siguientes inspecciones y pruebas:

- Examen visual y control dimensional del aparato. Al objeto de poder examinar debidamente el aparato, la placa se hallará desprovista de pintura o de cualquier recubrimiento que pueda disimular los posibles defectos.

- Prueba de presión con el aparato completamente lleno de fluido de prueba.

Si existiesen razones por las que dicha prueba no sea factible de realizar en el taller del fabricante, se realizará en el lugar de emplazamiento.

- Inspecciones y pruebas en el lugar de emplazamiento del equipo

Cada equipo se someterá a las siguientes inspecciones y pruebas en el lugar de emplazamiento:

- Examen visual y control dimensional del aparato, si no se ha realizado anteriormente en el taller del fabricante.
- Prueba de presión de valor igual a la primera en el caso de que evidentemente el aparato haya sufrido alguna anomalía durante el transporte o la manipulación, que la inspección detecte algún fallo real o aparente que así lo aconseje, que el ingeniero director tenga dudas sobre la capacidad de un equipo para resistir las condiciones de servicio previstas, que confluayan circunstancias inesperadas que las hagan recomendables, o siempre que la prueba no se haya efectuado en el taller del fabricante.

En caso de tener que realizarse la prueba de presión en el lugar de emplazamiento, se seguirán las siguientes condiciones:

a) Observación del procedimiento de prueba descrito por el fabricante en el manual de construcción. Este deberá ser lo suficientemente detallado, incluyendo las condiciones de prueba, los equipos necesarios para su ejecución, los aparatos de medidas de control (debidamente contrastados y con la sensibilidad adecuada, procurándose que la lectura se sitúe en el tercio central de la escala del aparato), sistema de llenado y vaciado y tiempo de mantenimiento de la presión de prueba, que en ningún caso será inferior a 30 minutos.

b) Observación de las condiciones de seguridad durante las pruebas de presión, comprobándose que el equipo para pruebas es correcto y que las conexiones son las adecuadas a las presiones máximas que se van a alcanzar, así como la disposición de las medidas de seguridad suficientes para evitar no sobrepasar la presión de prueba, ni en ningún momento estar por debajo de la temperatura señalada en el manual de diseño, ni dañar los elementos internos del aparato.

Se comprobará antes de la prueba que las estructuras y fundaciones que sustenten el aparato o sistema a probar estén en condiciones de resistir la carga a que van a ser sometidas.

Se cuidará que el personal se mantenga alejado durante el desarrollo de las pruebas de los fondos, tapas y piezas roscadas, y se evitará la presencia de personas ajenas a la prueba.

Los manómetros se instalarán fuera de la proyección vertical y se preferirá situarlos lateralmente o en posición superior.

Durante el llenado con fluido de prueba se cuidará de ventear bien el circuito para evitar que queden cámaras de aire o vapor.

c) El fluido de prueba será agua a la temperatura ambiente, siempre que dicha temperatura no sea inferior a 10 °C. El valor de la presión de prueba será el correspondiente a la siguiente expresión:  $P_p > 1,25 \cdot P_d \cdot S_p/S_d$

Donde “ $P_p$ ” representa la presión de prueba, “ $P_d$ ” la presión de diseño, “ $S_p$ ” la tensión máxima admisible del material a la temperatura de prueba y “ $S_d$ ” la tensión máxima admisible a la temperatura de diseño.

En el lugar de emplazamiento se realizará, antes de cualquier otra operación, una inspección visual tanto interior como exterior del aparato.

---

### PC.C6.3.7. Placas

Todos los aparatos a presión comprendidos en el presente proyecto, con excepción de las tuberías, deberán ir provistos de placas de diseño e identificación, conforme a lo estipulado en el artículo 19 del Reglamento de Aparatos a Presión del Ministerio de Industria y Energía. En dichas placas se grabará:

- Placa de diseño: presión de diseño, y en su caso, la presión máxima de servicio, número de registro del aparato y fecha de la primera prueba y sucesivas.
- Placa de identificación: nombre o razón social del fabricante, contraseña y fecha de registro del tipo, número de fabricación y características principales.

Las placas de diseño e identificación se fijarán mediante remaches, soldadura o cualquier otro medio que asegure su inamovilidad, en un sitio visible del aparato, y en ningún caso podrán retirarse del mismo.

### PC.C6.3.8. Elementos de seguridad

Todos los aparatos y sistemas comprendidos en el presente PFC deben ir provistos de los elementos de seguridad que prescriban los códigos de diseños empleados y los adicionales especificados en el manual de diseño. Todas las válvulas de seguridad deben ser de apertura total y sistema de resorte, debiéndose cumplir la condición de que la apertura total de la válvula deberá ser ayudada por la presión del fluido evacuado, de tal manera que la apertura asegure una sección de paso a través de la válvula igual al 80% de la sección neta de paso en el asiento después de la deducción de la sección transversal de los obstáculos en el orificio, debido a las guías y a la forma del cuerpo de la válvula en la posición de apertura máxima. No se permitirá el uso de válvulas de seguridad de peso ni de palanca de contrapeso.

La descarga de las válvulas de seguridad deberá realizarse de tal forma que impida eficazmente que el fluido evacuado pueda producir daños a personas o cosas.

Durante las inspecciones interiores periódicas de los aparatos o sistemas a presión la válvula o válvulas de seguridad que protejan dichos aparatos o sistemas se desmontarán ya ajustarán para, a continuación, probarlas y precintarlas.

#### **PC.C6.4. Prueba para las tuberías**

Para todas las tuberías contempladas en este proyecto se realizarán las siguientes pruebas y comprobaciones en el lugar de emplazamiento:

- Examen visual, control de espesores e identificación de los materiales.
- Primera prueba de presión, en el caso de no haber sido probadas en el taller.

#### **PC.C6.5. Prueba de los sistemas antes de la puesta en marcha**

##### **PC.C6.5.1. Prueba hidrostática**

Se deberá comprobar hidrostáticamente todas las líneas y equipos después de terminar la construcción del circuito, con los equipos interconectados entre sí (comprobación del sistema). El sistema se llenará con agua y se comprobará al menos a 1,25 veces la presión de diseño.

Las válvulas de control y placas de orificio deberán quitarse de servicio, así como los instrumentos. Las válvulas de seguridad estarán aisladas. Las secciones cuyas presiones de prueba sean diferentes serán separadas mediante juntas ciegas temporales.

Durante la prueba, se comprobará que no existen fugas, especialmente por las bridas atornilladas y por los asientos de las válvulas.

#### PC.C6.5.2. Lavado del equipo

Esta operación tiene por objeto eliminar cuerpos extraños que, durante el montaje, hayan podido quedar en las líneas o en los equipos, tales como virutas de metal o de madera. Estos restos pueden provocar durante la operación atascos en las líneas, bloqueos en válvulas o destrozarse partes móviles de las bombas.

El lavado se llevará a cabo mediante circulación de agua, a la que previamente se habrá añadido la cantidad adecuada de inhibidor de corrosión. Las bombas habrán sido alineadas, comprobadas y rodadas de acuerdo con las instrucciones del fabricante. Se instalarán en ellas filtros de aspiración, que deberán limpiarse tan a menudo como sea necesario. Mientras dure el rodaje de las máquinas se vigilarán estrechamente todos los aspectos relacionados con sobrecalentamientos, vibraciones, posibles fugas y consumo eléctrico de motores.

Durante el lavado en los puntos bajos, líneas desconectadas, etc., se debe purgar para eliminar materiales sólidos. Los cambiadores de calor serán incluidos en el circuito al final de la operación. Así como las conexiones a los instrumentos, teniendo sus purgas abiertas.

Cuando se observe que los filtros instalados en las bombas han dejado de ensuciarse y el agua que se purga aparece limpia, puede darse por concluida la operación de lavado. Se parará entonces la circulación y se drenará completamente de agua el sistema.

Por último, se instalarán las válvulas automáticas y las placas de orificio, verificándose su posición.

### PC.C6.5.3. Comprobación de servicios auxiliares

#### 1. - Equipo eléctrico

Se comprobará la tensión de los equipos. Los motores eléctricos deberán ser rodados de acuerdo con las instrucciones del fabricante, desconectados del equipo impulsor.

#### 2. - Agua de refrigeración

El sistema debe ser comprobado antes de la puesta en marcha, atendiendo a la disponibilidad, presión y libre circulación.

#### 3. - Aire de instrumentos

Los colectores deben ser soplados para la eliminación de la posible suciedad. Toda red debe ser comprobada bajo presión.

#### 4. - Red contra incendios

Se comprobará la llegada de agua a los hidrantes, así como el libre y rápido acceso a los mismos.

#### 5. - Sistema de drenaje

Se comprobará que todos los drenajes y arquetas desalojan adecuadamente.

#### 6. - Seguridad

Se comprobará que todas las válvulas de seguridad estén instaladas sin discos ciegos ni cerrojos.

---

## **PC.C7. Ejecución de las obras**

### **PC.C7.1. Ejecución en general**

El contratista tiene obligación de ejecutar esmeradamente las obras, cumplir estrictamente todas las condiciones estipuladas y cuantas órdenes le sean dadas por el director de obra, entendiéndose que deben entregarse completamente terminadas cuantas obras afecten a este compromiso.

Si a juicio del citado director, hubiese alguna parte de la obra mal ejecutada, tendrá el contratista obligación de volverla a ejecutar cuantas veces sean necesarias, hasta quedar a satisfacción de aquel, no siendo motivos estos aumentos de trabajo para pedir indemnización alguna.

### **PC.C7.2. Replanteo**

Antes de comenzar los trabajos se realizará el replanteo general del trazado de cables y tuberías por el contratista o su representante bajo las órdenes del director de obra, marcando las alineaciones con los puntos necesarios para que, con el auxilio de los planos, pueda el contratista ejecutar debidamente las obras.

Será obligación del contratista la custodia y reposición de las señales que se establezcan en el replanteo. Para la realización del replanteo el contratista deberá aportar todo el material y personal necesario para la ejecución de esta operación.

### **PC.C7.3. Comprobación del replanteo**

En el plazo de quince días a partir de la adjudicación definitiva se comprobarán, en presencia del adjudicatario o de su representante, en replanteo de las obras efectuadas antes de la licitación, extendiéndose la correspondiente acta de comprobación del replanteo.

El acta de comprobación del replanteo reflejará la conformidad o la disconformidad del replanteo respecto a los documentos contractuales del proyecto, refiriéndose expresamente a las características geométricas de los trabajos, así como cualquier punto que en caso de disconformidad pueda afectar al cumplimiento del contrato.

Cuando el acta de comprobación del replanteo refleje alguna variación respecto a los documentos contractuales del proyecto, deberá ser acompañada de un nuevo presupuesto, valorado a los precios del contrato.

#### **PC.C7.4. Fijación de los puntos de replanteo**

La comprobación del replanteo deberá incluir como mínimo los datos y referencias previstos para poder materializar las obras, así como los puntos fijos o auxiliares necesarios para los sucesivos replanteos de detalles y de otros elementos que puedan estimarse precisos.

Los puntos de referencia para los sucesivos replanteos se marcarán con los medios adecuados para evitar su desaparición.

Los datos, cotas y puntos fijados se anotarán en un anexo al acta de comprobación del replanteo, el cual se unirá al expediente de las obras, entregándose una copia al contratista.

El contratista se responsabilizará de la conservación de las señales de los puntos que hayan sido entregados.

#### **PC.C7.5. Programación de los trabajos**

En el plazo que se determine en días hábiles a partir de la aprobación del acta de comprobación del replanteo, el adjudicatario presentará el programa de trabajos de las obras. Dicho programa de trabajo incluirá los siguientes datos:

- Fijación de las clases de obras y trabajos que integran el proyecto e indicación de las mismas.
- Determinación de los medios necesarios (instalaciones, equipos y materiales).
- Valoración mensual y acumulada de la obra, programada sobre la base de los precios unitarios de adjudicación.
- Representación gráfica de las diversas actividades, en un gráfico de barras o en un diagrama espacio/tiempo.

Cuando del programa de trabajos se deduzca la necesidad de modificar cualquier condición contractual, dicho programa deberá ser redactado por el adjudicatario y por la dirección técnica de las obras, acompañándose de la correspondiente propuesta de modificación para su tramitación reglamentaria.

#### **PC.C7.6. Ensayos**

El número de ensayo y frecuencia, tanto sobre materiales como unidades de obras terminadas, será fijado por el ingeniero director, y se efectuarán con arreglo a las normas que afecten a cada unidad de obra, o, en su defecto, con arreglo a las instrucciones que dicte el director.

El adjudicatario abonará el costo de los ensayos que se realicen, que no podrán superar el 1% del presupuesto de adjudicación.

El contratista está obligado a realizar su autocontrol de cotas, tolerancias y geométrico en general, así como el de calidad, mediante ensayos materiales, densidades de compactación, etc. se entiende que no se comunicará al dirección de obra que una unidad de obra está terminada a juicio del contratista para su comprobación hasta que el mismo contratista, mediante su personal facultativo para el caso, haya hecho sus propias comprobaciones y ensayos y se haya asegurado cumplir las especificaciones.

Así, el contratista está obligado a disponer de los equipos necesarios para dichas mediciones y ensayos.

**PC.C7.7. Orden de los trabajos**

El técnico director encargado de las obras fijará el orden en que deben llevarse a cabo estos trabajos, y la contrata está obligada a cumplir exactamente cuánto se disponga sobre el particular.

**PC.C7.8. Ejecución en general**

Una vez iniciadas las obras deberán continuarse sin interrupción y terminarse en el plazo estipulado. Los retrasos, cuando sean justificados, podrán ser aceptados por la dirección de la obra.

En Puerto Real, (Cádiz) a martes 29 de noviembre de AD 2011

Fdo. José Javier Relinque Madroñal

# Documento 4.

# Presupuesto

---

1. **Introducción**
2. **Estado de mediciones y presupuestos**
3. **Estudio de costes e ingresos**
4. **Presupuesto general**



## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

### Índice general

---

#### **PRESUPUESTO**

Capítulo C.C1. Introducción	P.1219
Capítulo C.C2. Estado de mediciones y presupuestos	P.1220
C.C2.1. Cálculo de precio de recipientes a presión	P.1221
C.C2.2. Cálculo de precio de tanques	P.1225
C.C2.3. Cálculo del precio de cambiadores de calor	P.1226
C.C2.4. Cálculo del precio de bombas	P.1228
C.C2.5. Presupuesto de ejecución material	P.1230
C.C2.6. Presupuesto de ejecución por contrata	P.1231
Capítulo C.C3. Estudio de costes e ingresos	P.1231
Capítulo C.C4. Presupuesto general	P.1236



---

### **Capítulo C.C1. Introducción**

El último documento del PFC se plantea satisfacer el objeto central del mismo: demostrar la viabilidad económica de una futura planta, de modo que, la pre-ingeniería básica desarrollada, justifique nuevos proyectos de desarrollo y optimización de la estrategia propuesta.

El objetivo del presente documento es, por tanto, estimar el presupuesto general de ejecución de una planta para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo de naftas; como la que ha sido objeto de estudio básico en el presente PFC. Se considerarán costes de compra, instalación y operación de las unidades principales del mismo.

En primera instancia, se determinará el Presupuesto de Ejecución Material, (P.E.M.), esto es, el coste de adquisición de la planta. Se aplicarán los gravámenes correspondientes para la obtención del Presupuesto de Ejecución por Contrata, (P.E.C.). Estos son:

- Beneficio industrial, (6% P.E.M.).
- Gastos Generales (13% P.E.M.).
- IVA (18% P.E.M.)

Adicionalmente, el presupuesto general cargará, sobre el P.E.M. los honorarios de ingeniería, IVA incluido.

Seguidamente, se dedicará un capítulo al análisis básico de costes de producción, considerando materias primas y bombeo. El mismo capítulo mostrará también las fuentes de ingresos por la disposición comercial tanto de la corriente de butadieno purísimo, como de las corrientes de co-productos.

Se cierra el documento efectuando un breve análisis sobre la amortización y rentabilidad de la planta proyectada.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 4. Presupuesto

### **Capítulo C.C2. Estado de mediciones y presupuestos**

El estado de mediciones es el recuento de equipos que componen la planta en cuestión. Se presentan en la siguiente tabla:

<b>Descripción</b>	<b>Partida</b>	<b>Número</b>
Separadores verticales gas-líquido: <b>S-1, S-2, S-3 y S-4</b>	1	4
Separador horizontal gas-líquido: <b>S-5</b>	2	1
Torre de destilación con reducción de diámetro y platos de doble y triple paso: <b>D-1</b>	3	1
Torres de destilación con platos de doble paso: <b>D-2 y D-3</b>	4	2
Torres de destilación con platos de doble paso: <b>D-4, D-5, D-6 y D-7</b>	5	4
Torres de destilación con platos de paso sencillo: <b>D-8, D-9, D-10 y D-11</b>	6	4
Torres de destilación con platos de paso doble: <b>D-12 a D-20</b>	7	9
Acumulador de reflujo asociado a la torre D-3: <b>A-1</b>	8	1
Acumuladores de reflujo asociados a las torres D-5 y D-7: <b>A-2 y A-3</b>	9	2
Acumuladores de reflujo asociados a las torres D-9 y D-11: <b>A-4 y A-5</b>	10	2
Acumuladores de reflujo asociados a las torres D-14, D-17 y D-20: <b>A-6, A-7 y A-8</b>	11	3
Tanque cilíndrico de techo flotante cubierto para mezcla de corrientes: <b>T-1</b>	12	1
Tanque cilíndrico de techo flotante para reserva de agente extractante: <b>T-2</b>	13	1
Tanque esférico para almacenamiento del producto principal: <b>T-3</b>	14	1
Condensadores asociados a los recipientes S-1 a S-4: <b>E-1, E-2, E-3 y E-4</b>	15	4
Calentador asociado al tanque T-1 y la torre D-1: <b>E-5</b>	16	1
Calderín asociado a la torre D-1: <b>E-6</b>	17	1
Condensador asociado a la torre D-3: <b>E-7</b>	18	1
Calderines asociados a las torres D-4 y D-6: <b>E-8 y E-10</b>	19	2
Condensadores asociados a las torres D-5 y D-7: <b>E-9 y E-11</b>	20	2
Calderines asociados a las torres D-8 y D-10: <b>E-12 y E-14</b>	21	2
Condensadores asociados a las torres D-9 y D-11: <b>E-13 y E-15</b>	22	2
Calderines asociados a las torres D-12, D-15 y D-18: <b>E-16, E-18 y E-20</b>	23	3
Condensadores asociados a las torres D-14, D-17 y D-20: <b>E-17, E-19 y E-21</b>	24	3
Refrigerante asociado a las torres D-3 y D-4 y D-6: <b>E-24</b>	25	1
Calentador asociado a las torres D-9 y D-11 y D-12, D-15 y D-18: <b>E-25</b>	26	1
Bombas centrífugas de 5 HP: <b>B-1, B-2, B-3 y B-4</b>	27	4
Bombas centrífugas de 10 HP: <b>B-5, B-6, B-7 y B-8</b>	28	4
Bomba centrífuga de 15 HP: <b>B-9</b>	29	1
Bomba centrífuga de 3 HP: <b>B-10</b>	30	1

Tabla. C.I. Estado de mediciones. (Continúa en página siguiente)

<b>Descripción</b>	<b>Partida</b>	<b>Número</b>
Bomba centrífuga de 100 HP: <b>B-11</b>	31	1
Bomba centrífuga de 125 HP: <b>B-12</b>	32	1
Bomba centrífuga de 100 HP: <b>B-13</b>	33	1
Bomba centrífuga de 100 HP: <b>B-14</b>	34	1
Bomba centrífuga de 100 HP: <b>B-15</b>	35	1
Bombas centrífugas de 100 HP: <b>B-16 y B-19</b>	36	2
Bombas centrífugas de 125 HP: <b>B-17 y B-20</b>	37	2
Bombas centrífugas de 20 HP: <b>B-18 y B-21</b>	38	2
Bombas centrífugas de 50 HP: <b>B-22 y B-25</b>	39	2
Bomba centrífuga de 150 HP: <b>B-23</b>	40	1
Bomba centrífuga de 200 HP: <b>B-26</b>	41	1
Bombas centrífugas de 2 HP: <b>B-24 y B-27</b>	42	2
Bombas centrífugas de 200 HP: <b>B-28, B-32 y B-36</b>	43	3
Bombas centrífugas de 200 HP: <b>B-29, B-33 y B-37</b>	44	3
Agrupamientos de bombas centrífugas de 200 HP: <b>B-30, B-34 y B-38</b>	45	18
Bombas centrífugas de 20 HP: <b>B-31, B-35 y B-39</b>	46	3
Bomba centrífuga de 10 HP: <b>B-40</b>	47	1
Bomba centrífuga de 20 HP: <b>B-41</b>	48	1
Bomba centrífuga de 125 HP: <b>B-42</b>	49	1
Bombas centrífugas de 75 HP: <b>B-43 y B-44</b>	50	2

Tabla. C.I. Estado de mediciones. (Viene de página anterior)

Se ha proporcionado una lista con todos los equipos proyectados, en la que se ha ahorrado una exhaustiva descripción para la que se remite a la memoria descriptiva. Se procede a discutir el método de cálculo del presupuesto de cada una de las unidades.

### **C.C2.1. Cálculo de precio de recipientes a presión**

Se considerarán recipientes a presión todos los separadores, cuerpos de las torres de destilación, los acumuladores y la esfera de almacenamiento, (partida 14). Su cálculo se efectuará a partir de la gráfica "Coste de recipientes" adjunta al final del presupuesto.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 4. Presupuesto

A partir del peso conocido del recipiente, (determinado en los anexos correspondientes), se estima el coste por unidad de peso que, multiplicado nuevamente por el peso, proporciona el coste en pesetas en base al año 2000.

Considerando un aumento del IPC, según el Instituto Nacional de Estadística, (INE), del 2,2% desde enero de 2000 hasta septiembre de 2011, se corregirán los precios considerando el cambio de: 1 peseta equivale a 166,386 euros, última cotización antes de la sustitución de la divisa nacional. Esta consideración será válida para todas las correcciones de año base 2000, como resultado de la aplicación del procedimiento de estimación *CEPSA*: STD-1000-10, STD-1000-11 y STD-1000-12.

El precio deberá corregirse multiplicando lo obtenido por los factores según proceda. A la sazón no procederá corrección de ningún recipiente a presión, puesto que todos se fabrican en acero al carbono.

El estándar STD-1000-01, adicionalmente grava los costes de equipos en previsión al montaje de red de tuberías, provisión de instrumentación, coste de electricidad, obra civil, montaje mecánico, calorifugado y pintura. Los porcentajes que se presentan en la tabla "Estimación de costes factores", (también disponible al final del presupuesto), se aplican al precio base, (corregido por inflación y por los factores que prescriban los estándares) y se suman a éste. Las siguientes tablas muestran el desglose de los considerados aparatos a presión.

Recipientes "SIMPLE" (S-1, S-2, S-3 y S-4)					
<b>m<sub>sep,op</sub> (lb)</b>	6394,37	<b>m<sub>sep,op</sub> (kg)</b>	2900,44	<b>Precio (pta/kg)</b>	550
<b>Precio (€)</b>	9798,52	<b>Precio unitario (€)</b>	31796,19	<b>Precio recipientes (€)</b>	<b>127.184,78</b>

Tabla. C.II. Partida 1

Como puede observarse, se incluyen el peso, (originalmente en libras y convertido a kg), la lectura del estándar correspondiente en

**Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas**

Documento 4. Presupuesto

pta/kg, el precio en euros obtenido por multiplicación de los anteriores y corregido al año 2000 y el precio unitario, considerados los factores que prescribe el estándar STD-1000-10, (se recuerda que no se introdujo corrección por material al ser éste acero al carbono) y los costes auxiliares previstos en el estándar STD-1000-01. El precio de los recipientes multiplica el unitario por los cuatro separadores. Siguiendo la misma dinámica se calculan el presupuesto de los aparatos a presión.

<b>Recipiente "RECUPERACIÓN" (S-5)</b>					
<b>m<sub>sep,op</sub> (lb)</b>	8612,34	<b>m<sub>sep,op</sub> (kg)</b>	3906,49	<b>Precio (pta/kg)</b>	500
<b>Precio (€)</b>	11997,51	<b>Precio unitario (€)</b>	29681,85	<b>Precio recipiente (€)</b>	<b>29.681,85</b>

Tabla. C.III. Partida 2

<b>Acumulador "EXTRACTIVA 1" (A-1)</b>					
<b>m<sub>sep,op</sub> (lb)</b>	5934,531	<b>m<sub>sep,op</sub> (kg)</b>	2691,858	<b>Precio (pta/kg)</b>	570
<b>Precio (€)</b>	9424,56	<b>Precio unitario (€)</b>	23316,36	<b>Precio recipiente (€)</b>	<b>23.316,36</b>
<b>Acumuladores "EXTRACTIVA 2" (A-2 y A-3)</b>					
<b>m<sub>sep,op</sub> (lb)</b>	3167,172	<b>m<sub>sep,op</sub> (kg)</b>	1436,605	<b>Precio (pta/kg)</b>	680
<b>Precio (€)</b>	6000,40	<b>Precio unitario (€)</b>	14845,00	<b>Precio recipientes (€)</b>	<b>29.690,00</b>
<b>Acumuladores "MÚLTIPLE" (A-4 y A-5)</b>					
<b>m<sub>sep,op</sub> (lb)</b>	3151,958	<b>m<sub>sep,op</sub> (kg)</b>	1429,704	<b>Precio (pta/kg)</b>	680
<b>Precio (€)</b>	5971,579	<b>Precio unitario (€)</b>	14773,69	<b>Precio recipientes (€)</b>	<b>29.547,37</b>
<b>Acumuladores "BINARIA" (A-6, A-7 y A-8)</b>					
<b>m<sub>sep,op</sub> (lb)</b>	1157,249	<b>m<sub>sep,op</sub> (kg)</b>	524,920	<b>Precio (pta/kg)</b>	1100
<b>Precio (€)</b>	3546,66	<b>Precio unitario (€)</b>	8774,43	<b>Precio recipientes (€)</b>	<b>26.323,31</b>
		<b>Acumuladores (€)</b>	<b>108.877,04</b>		

Tabla. C.IV. Partidas 8 a 11

<b>Recipientes "EXTRACTIVA 1" (D-1, D-2 y D-3)</b>					
<b>m<sub>sep,op</sub> (lb)</b>	829410,360	<b>m<sub>sep,op</sub> (kg)</b>	376214,230	<b>Precio (pta/kg)</b>	350
<b>Precio (€)</b>	808793,00	<b>Precio unitario (€)</b>	2624533,28	<b>Precio recip D-1 (€)</b>	<b>2.624.533,28</b>

Tabla. C.V. Partidas 3 y 4. (Continúa en página siguiente)

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 4. Presupuesto

Recipientes "EXTRACTIVA 1" (D-1, D-2 y D-3)					
<b>NPR</b>	50	<b>T (m)</b>	6,5	<b>Coste base unitario (kpta)</b>	5000
<b>F<sub>tp</sub></b>	0,7	<b>F<sub>esp</sub></b>	1,3	<b>F<sub>np</sub></b>	1,12
<b>F<sub>n</sub></b>	0,92	<b>Coste unitario (€)</b>	28797,27	<b>Precio platos agot (€)</b>	<b>1.439.863,64</b>
<b>NPR</b>	176	<b>T (m)</b>	5	<b>Coste base unitario (kpta)</b>	3700
<b>F<sub>tp</sub></b>	0,7	<b>F<sub>esp</sub></b>	1,3	<b>F<sub>np</sub></b>	1,12
<b>F<sub>n</sub></b>	0,9	<b>Coste unitario (€)</b>	20846,72143	<b>Precio platos rect (€)</b>	<b>3.669.022,97</b>
<b>m<sub>sep,op</sub> (lb)</b>	1018140,770	<b>m<sub>sep,op</sub> (kg)</b>	461820,92	<b>Precio (pta/kg)</b>	350
<b>Precio (€)</b>	992831,98	<b>Precio unitario (€)</b>	3221739,78	<b>Precio recip. D-2 y D-3 (€)</b>	<b>6.443.479,56</b>
<b>"EXTRACTIVA 1" (€)</b>			<b>14.176.899,45</b>		

Tabla. C.V. Partidas 3 y 4. (Viene de página anterior)

En este caso se ha incluido el procedimiento de presupuesto de coste de platos, tal como se practicará para el resto de operaciones que involucran torres que requieren estos dispositivos. El coste de los platos requiere la evaluación de la gráfica "Coste de platos" del estándar STD-1000-10, corrección por IPC, factores de tipo de platos, (perforados), espesor de los mismos, (4,5 mm), número de pasos (máximo disponible para 3 pasos), influencia del número de platos de igual diámetro, (según los platos de que dispone la torre y se indican en C.V) y por material, (acero al carbono). Finalmente se multiplican por el número y se totaliza junto al coste del recipiente. Así se realiza para las siguientes unidades.

Recipientes "EXTRACTIVA 2" (D-4, D-5, D-6 y D-7)					
<b>m<sub>sep,op</sub> (lb)</b>	547759,260	<b>m<sub>sep,op</sub> (kg)</b>	248459,440	<b>Precio (pta/kg)</b>	350
<b>Precio (€)</b>	534143,14	<b>Precio unitario (€)</b>	1733294,49	<b>Precio recipientes (€)</b>	<b>6.933.177,94</b>
<b>NPR</b>	222	<b>T (m)</b>	7	<b>Coste base unitario (kpta)</b>	7000
<b>F<sub>tp</sub></b>	0,7	<b>F<sub>esp</sub></b>	1,3	<b>F<sub>np</sub></b>	1,12
<b>F<sub>n</sub></b>	0,9	<b>Coste unitario (€)</b>	39439,74	<b>Precio platos (€)</b>	<b>8.755.623,00</b>
<b>"EXTRACTIVA 2" (€)</b>			<b>15.688.800,95</b>		

Tabla. C.VI. Partida 5

**Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas**

Documento 4. Presupuesto

<b>Recipientes "MÚLTIPLE" (D-8, D-9, D-10 y D-11)</b>					
<b>m<sub>sep,op</sub> (lb)</b>	470541,850	<b>m<sub>sep,op</sub> (kg)</b>	213434,200	<b>Precio (pta/kg)</b>	350
<b>Precio (€)</b>	458845,19	<b>Precio unitario (€)</b>	1488952,63	<b>Precio recipientes (€)</b>	<b>5.955.810,51</b>
<b>NPR</b>	244	<b>T (m)</b>	6	<b>Coste base unitario (kpta)</b>	4000
<b>F<sub>tp</sub></b>	0,7	<b>F<sub>esp</sub></b>	1,3	<b>F<sub>np</sub></b>	1
<b>F<sub>n</sub></b>	0,9	<b>Coste unitario (€)</b>	20122,32	<b>Precio platos (€)</b>	<b>4.909.845,59</b>
			<b>"MÚLTIPLE" (€)</b>	<b>10.865.656,10</b>	

Tabla. C.VII. Partida 6

<b>Recipientes "BINARIA" (D-12, D-13, D-14, D-15, D-16, D-17, D-18, D-19 y D-20)</b>					
<b>m<sub>sep,op</sub> (lb)</b>	907189,690	<b>m<sub>sep,op</sub> (kg)</b>	411494,350	<b>Precio (pta/kg)</b>	350
<b>Precio (€)</b>	884638,91	<b>Precio unitario (€)</b>	2870653,25	<b>Precio recipientes (€)</b>	<b>25.835.879,24</b>
<b>NPR</b>	213	<b>T (m)</b>	6,5	<b>Coste base unitario (kpta)</b>	5000
<b>F<sub>tp</sub></b>	0,7	<b>F<sub>esp</sub></b>	1,3	<b>F<sub>np</sub></b>	1,12
<b>F<sub>n</sub></b>	0,9	<b>Coste unitario (€)</b>	28171,25	<b>Precio platos (€)</b>	<b>6.000.475,22</b>
<b>NPR</b>	429	<b>T (m)</b>	7	<b>Coste base unitario (kpta)</b>	7000
<b>F<sub>tp</sub></b>	0,7	<b>F<sub>esp</sub></b>	1,3	<b>F<sub>np</sub></b>	1,12
<b>F<sub>n</sub></b>	0,9	<b>Coste unitario (€)</b>	39439,74	<b>Precio platos (€)</b>	<b>16.919.649,85</b>
			<b>"BINARIA" (€)</b>	<b>48.756.004,32</b>	

Tabla. C.VIII. Partida 7

Las partidas a 5 a 7 suponen el grueso de la inversión de la planta, ya que presupuestan los equipos más gravosos.

### **C.C2.2. Cálculo de precio de tanques**

Los tanques se calculan mediante la gráfica "Coste de tanques off-site", (STD-1000-10). En base a la capacidad del tanque, se estiman peso en toneladas y precio por tonelada. Multiplicando ambos conceptos se obtiene el precio base que habrá de corregirse por IPC, y aplicarse los factores por techo flotante pontón y acero al carbono, (la ecuación está indicada en la gráfica). La página siguiente indica el gravamen del precio anterior por costes auxiliares. Así se calculan los tanques T-1 y T-2. El T-3 es una excepción y se calcula como si fuera un recipiente del caso anterior, (para ello se ha hallado el peso

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 4. Presupuesto

del tanque conocidas sus dimensiones, espesor y densidad teórica del acero).

Tanque "BLENDING de EXTRACTIVA 1" (T-1)					
$V_M$ (m <sup>3</sup> )	17412,895	$m_T$ (tm)	400	Precio (kpta/tm)	300
Precio (€)	781306,12	Precio unit. (€)	823731,04	Precio recip. (€)	<b>823.731,04</b>
Tanque "FURFURAL FRESCO" (T-2)					
$V_M$ (m <sup>3</sup> )	4731,765	$m_T$ (tm)	110	Precio (kpta/tm)	400
Precio (€)	286478,91	Precio unit. (€)	333461,45	Precio recip. (€)	<b>333.461,45</b>
Tanque "BUTADIENO PURIFICADO" (T-3)					
R (m)	9,2	$t_{esfera}$ (in)	2	$V_{acero}$ (in <sup>3</sup> )	3315461,087
$m_{esfera}$ (kg)	426090,907	Precio (pta/kg)	350	Precio (€)	916018,88
	Precio unit. (€)	1066245,98	Precio recip. (€)	<b>1.066.245,98</b>	
		<b>Tanques (€)</b>	<b>2.223.438,47</b>		

Tabla. C.IX. Partidas 12 a 14

### C.C2.3. Cálculo del precio de cambiadores de calor

El cálculo en cambiadores de calor se efectúa mediante la gráfica "Coste cambiadores de calor carcasa-tubos", (STD-1000-12). En base al área de intercambio, se estima el coste por metro cuadrado. Multiplicando los dos términos se halla el coste base, que deberá corregirse por IPC, los factores tipo de cambiador, (los calderines serán considerados como BKT, el más similar a AKT y los condensadores, calentadores y refrigerantes serán considerados como AES), longitud de tubo, (la típica es 16 pies), número de pasos (se tomará 2 típicamente), temperatura, (menor que 350 °C), la presión, (menor que 10 kg/cm<sup>2</sup>) e influencia de materiales, (se tomará la unidad puesto que el cambiador será completamente fabricado en acero al carbono). Finalmente se aplican los factores de coste auxiliar, (STD-1000-01) y se multiplica el precio unitario según convenga a lo dispuesto en la Tabla C.I.

**Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas**

Documento 4. Presupuesto

<b>Condensadores de "SIMPLE" (E-1, E-2, E-3 y E-4)</b>					
<b>A (m<sup>2</sup>)</b>	210,923	<b>Precio (pta/m<sup>2</sup>)</b>	20000	<b>Precio (pta)</b>	4218460
<b>Precio (€)</b>	25911,23	<b>Precio unitario (€)</b>	66617,78	<b>Precio cambiadores (€)</b>	<b>266.471,10</b>
<b>Calentador de "BLENDING/EXTRACTIVA 1" (E-5)</b>					
<b>A (m<sup>2</sup>)</b>	11,482	<b>Precio (pta/m<sup>2</sup>)</b>	100000	<b>Precio (pta)</b>	1148200
<b>Precio (€)</b>	7052,64	<b>Precio unitario (€)</b>	18132,33	<b>Precio cambiador (€)</b>	<b>18.132,33</b>
<b>Calderín de "EXTRACTIVA 1" (E-6)</b>					
<b>A (m<sup>2</sup>)</b>	140,982	<b>Precio (pta/m<sup>2</sup>)</b>	40000	<b>Precio (pta)</b>	5639280
<b>Precio (€)</b>	34638,40	<b>Precio unitario (€)</b>	106866,38	<b>Precio cambiador (€)</b>	<b>106.866,38</b>
<b>Condensador de "EXTRACTIVA 1" (E-7)</b>					
<b>A (m<sup>2</sup>)</b>	350,008	<b>Precio (pta/m<sup>2</sup>)</b>	18000	<b>Precio (pta)</b>	6300144
<b>Precio (€)</b>	38697,65	<b>Precio unitario (€)</b>	99491,66	<b>Precio cambiador (€)</b>	<b>198.983,32</b>
<b>Calderines de "EXTRACTIVA 2" (E-8 y E-10)</b>					
<b>A (m<sup>2</sup>)</b>	154,059	<b>Precio (pta/m<sup>2</sup>)</b>	40000	<b>Precio (pta)</b>	6162360
<b>Precio (€)</b>	37851,33	<b>Precio unitario (€)</b>	116778,93	<b>Precio cambiadores (€)</b>	<b>233.557,87</b>
<b>Condensadores de "EXTRACTIVA 2" (E-9 y E-11)</b>					
<b>A (m<sup>2</sup>)</b>	370,369	<b>Precio (pta/m<sup>2</sup>)</b>	18000	<b>Precio (pta)</b>	6666642
<b>Precio (€)</b>	40948,81	<b>Precio unitario (€)</b>	105279,38	<b>Precio cambiadores (€)</b>	<b>210.558,76</b>
<b>Calderines de "MÚLTIPLE" (E-12 y E-14)</b>					
<b>A (m<sup>2</sup>)</b>	105,275	<b>Precio (pta/m<sup>2</sup>)</b>	46000	<b>Precio (pta)</b>	4842650
<b>Precio (€)</b>	29745,22	<b>Precio unitario (€)</b>	91769,96	<b>Precio cambiadores (€)</b>	<b>183.539,91</b>
<b>Condensadores de "MÚLTIPLE" (E-13 y E-15)</b>					
<b>A (m<sup>2</sup>)</b>	272,155	<b>Precio (pta/m<sup>2</sup>)</b>	30000	<b>Precio (pta)</b>	8164650
<b>Precio (€)</b>	50150,09	<b>Precio unitario (€)</b>	128935,87	<b>Precio cambiadores (€)</b>	<b>257.871,75</b>
<b>Calderines de "BINARIA" (E-16, E-18 y E-20)</b>					
<b>A (m<sup>2</sup>)</b>	139,56	<b>Precio (pta/m<sup>2</sup>)</b>	40000	<b>Precio (pta)</b>	5582400
<b>Precio (€)</b>	34289,02	<b>Precio unitario (€)</b>	105788,48	<b>Precio cambiadores (€)</b>	<b>317.365,45</b>
<b>Condensadores de "BINARIA" (E-17, E-19 y E-21)</b>					
<b>A (m<sup>2</sup>)</b>	365,183	<b>Precio (pta/m<sup>2</sup>)</b>	18000	<b>Precio (pta)</b>	6573294
<b>Precio (€)</b>	40375,43	<b>Precio unitario (€)</b>	103805,23	<b>Precio cambiadores (€)</b>	<b>311.415,70</b>
<b>Refrigerante de "EXTRACTIVA 1/EXTRACTIVA 2" (E-24)</b>					
<b>A (m<sup>2</sup>)</b>	62,548	<b>Precio (pta/m<sup>2</sup>)</b>	50000	<b>Precio (pta)</b>	3127400
<b>Precio (€)</b>	19209,57	<b>Precio unitario (€)</b>	49387,79	<b>Precio cambiador (€)</b>	<b>49.387,79</b>
<b>Calentador de "MÚLTIPLE/BINARIA" (E-25)</b>					
<b>A (m<sup>2</sup>)</b>	2,725	<b>Precio (pta/m<sup>2</sup>)</b>	100000	<b>Precio (pta)</b>	272500
<b>Precio (€)</b>	1673,79	<b>Precio unitario (€)</b>	4303,31	<b>Precio cambiador (€)</b>	<b>4.303,31</b>
		<b>Camb. de calor (€)</b>	<b>2.158.453,67</b>		

Tabla. C.X. Partidas 15 a 26

### **C.C2.4. Cálculo del precio de bombas**

Las bombas se calculan mediante la gráfica “Coste bombas centrífugas”, que requiere datos de caudal y altura de las mismas. El producto de las anteriores está ligado al coste base directamente en pesetas. Tras aplicar corrección por IPC, procede aplicar los factores de bomba, que, junto con la gráfica figuran en el estándar adjunto, STD-1000-11: material, (acero al carbono), temperatura, (menor de 150 °C y presión, (menor de 20 kg/cm<sup>2</sup>).

Finalmente se corrige el precio por costes auxiliares del estándar STD-1000-01. Se obtiene:

<b>Bombas (B-1, B-2, B-3 y B-4)</b>					
<b>Q-H (m<sup>2</sup>/h)</b>	472	<b>Precio (pta)</b>	1000000	<b>Precio (€)</b>	6142,343707
	<b>Precio unit. (€)</b>	10968,38316	<b>Precio bombas (€)</b>	<b>43.873,53</b>	
<b>Bombas (B-5, B-6, B-7 y B-8)</b>					
<b>Q-H (m<sup>2</sup>/h)</b>	1970	<b>Precio (pta)</b>	1300000	<b>Precio (€)</b>	7985,046819
	<b>Precio unit. (€)</b>	14258,8981	<b>Precio bombas (€)</b>	<b>57.035,59</b>	
<b>Bomba (B-9)</b>					
<b>Q-H (m<sup>2</sup>/h)</b>	2086	<b>Precio (pta)</b>	1300000	<b>Precio (€)</b>	7985,046819
	<b>Precio unit. (€)</b>	14258,8981	<b>Precio bomba (€)</b>	<b>14.258,90</b>	
<b>Bomba (B-10)</b>					
<b>Q-H (m<sup>2</sup>/h)</b>	34	<b>Precio (pta)</b>	250000	<b>Precio (€)</b>	1535,585927
	<b>Precio unit. (€)</b>	2742,095789	<b>Precio bomba (€)</b>	<b>2.742,10</b>	
<b>Bomba (B-11)</b>					
<b>Q-H (m<sup>2</sup>/h)</b>	13900	<b>Precio (pta)</b>	2000000	<b>Precio (€)</b>	12284,68741
	<b>Precio unit. (€)</b>	21936,76631	<b>Precio bomba (€)</b>	<b>21.936,77</b>	
<b>Bomba (B-12)</b>					
<b>Q-H (m<sup>2</sup>/h)</b>	21812	<b>Precio (pta)</b>	2700000	<b>Precio (€)</b>	16584,32801
	<b>Precio unit. (€)</b>	29614,63452	<b>Precio bomba (€)</b>	<b>29.614,63</b>	
<b>Bomba (B-13)</b>					
<b>Q-H (m<sup>2</sup>/h)</b>	26347	<b>Precio (pta)</b>	2800000	<b>Precio (€)</b>	17198,56238
	<b>Precio unit. (€)</b>	30711,47284	<b>Precio bomba (€)</b>	<b>30.711,47</b>	

Tabla. C.XI. Partidas 27 a 50. (Continúa en página siguiente)

**Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas**

Documento 4. Presupuesto

<b>Bomba (B-14)</b>					
<b>Q-H (m<sup>2</sup>/h)</b>	20834	<b>Precio (pta)</b>	2500000	<b>Precio (€)</b>	15355,85927
	<b>Precio unit. (€)</b>	27420,95789	<b>Precio bomba (€)</b>	<b>27.420,96</b>	
<b>Bomba (B-15)</b>					
<b>Q-H (m<sup>2</sup>/h)</b>	15294	<b>Precio (pta)</b>	2000000	<b>Precio (€)</b>	12284,68741
	<b>Precio unit. (€)</b>	21936,76631	<b>Precio bomba (€)</b>	<b>21.936,77</b>	
<b>Bombas (B-16 y B-19)</b>					
<b>Q-H (m<sup>2</sup>/h)</b>	15084	<b>Precio (pta)</b>	2000000	<b>Precio (€)</b>	12284,68741
	<b>Precio unit. (€)</b>	21936,76631	<b>Precio bombas (€)</b>	<b>43.873,53</b>	
<b>Bombas (B-17 y B-20)</b>					
<b>Q-H (m<sup>2</sup>/h)</b>	22329	<b>Precio (pta)</b>	2700000	<b>Precio (€)</b>	16584,32801
	<b>Precio unit. (€)</b>	29614,63452	<b>Precio bombas (€)</b>	<b>59.229,27</b>	
<b>Bombas (B-18 y B-21)</b>					
<b>Q-H (m<sup>2</sup>/h)</b>	2409	<b>Precio (pta)</b>	1500000	<b>Precio (€)</b>	9213,51556
	<b>Precio unit. (€)</b>	16452,57474	<b>Precio bombas (€)</b>	<b>32.905,15</b>	
<b>Bombas (B-22 y B-25)</b>					
<b>Q-H (m<sup>2</sup>/h)</b>	2409	<b>Precio (pta)</b>	1500000	<b>Precio (€)</b>	9213,51556
	<b>Precio unit. (€)</b>	16452,57474	<b>Precio bombas (€)</b>	<b>32.905,15</b>	
<b>Bombas (B-23 y B-26)</b>					
<b>Q-H (m<sup>2</sup>/h)</b>	29404	<b>Precio (pta)</b>	3000000	<b>Precio (€)</b>	18427,03112
	<b>Precio unit. (€)</b>	32905,14947	<b>Precio bombas (€)</b>	<b>65.810,30</b>	
<b>Bombas (B-24 y B-27)</b>					
<b>Q-H (m<sup>2</sup>/h)</b>	50	<b>Precio (pta)</b>	250000	<b>Precio (€)</b>	1535,585927
	<b>Precio unit. (€)</b>	2742,095789	<b>Precio bombas (€)</b>	<b>5.484,19</b>	
<b>Bombas (B-28, B-32 y B-36)</b>					
<b>Q-H (m<sup>2</sup>/h)</b>	31905	<b>Precio (pta)</b>	3000000	<b>Precio (€)</b>	18427,03112
	<b>Precio unit. (€)</b>	32905,14947	<b>Precio bombas (€)</b>	<b>98.715,45</b>	
<b>Bombas (B-29, B-33 y B-37)</b>					
<b>Q-H (m<sup>2</sup>/h)</b>	30286	<b>Precio (pta)</b>	3000000	<b>Precio (€)</b>	18427,03112
	<b>Precio unit. (€)</b>	32905,14947	<b>Precio bombas (€)</b>	<b>98.715,45</b>	
<b>Bombas (B-30, B-34 y B-38)</b>					
<b>Q-H (m<sup>2</sup>/h)</b>	32464	<b>Precio (pta)</b>	3000000	<b>Precio (€)</b>	18427,03112
	<b>Precio unit. (€)</b>	32905,14947	<b>Precio bombas (€)</b>	<b>592.292,69</b>	

Tabla. C.XI. Partidas 27 a 50. (Continúa en página siguiente)

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 4. Presupuesto

<b>Bombas (B-31, B-35 y B-39)</b>					
Q-H (m <sup>2</sup> /h)	2406	Precio (pta)	1500000	Precio (€)	9213,51556
	Precio unit. (€)	16452,57474	Precio bombas (€)	49.357,72	
<b>Bomba (B-40)</b>					
Q-H (m <sup>2</sup> /h)	986	Precio (pta)	1300000	Precio (€)	7985,046819
	Precio unit. (€)	14258,8981	Precio bomba (€)	14.258,90	
<b>Bomba (B-41)</b>					
Q-H (m <sup>2</sup> /h)	2542	Precio (pta)	1500000	Precio (€)	9213,51556
	Precio unit. (€)	16452,57474	Precio bomba (€)	16.452,57	
<b>Bomba (B-42)</b>					
Q-H (m <sup>2</sup> /h)	23055	Precio (pta)	2700000	Precio (€)	16584,32801
	Precio unit. (€)	29614,63452	Precio bomba (€)	29.614,63	
<b>Bombas (B-43 y B-44)</b>					
Q-H (m <sup>2</sup> /h)	13139	Precio (pta)	2000000	Precio (€)	12284,68741
	Precio unit. (€)	21936,76631	Precio bombas (€)	43.873,53	
		<b>Bombas (€)</b>	<b>1.433.019,26</b>		

Tabla. C.XI. Partidas 27 a 50. (Viene de página anterior)

### **C.C2.5. Presupuesto de ejecución material**

Puesto que los costes auxiliares van incluidos en las partidas citadas en los cuatro apartados previos, la suma de los subtotales de cada desglose proporciona el P.E.M., cuyo resumen se muestra en la siguiente tabla:

Partidas	Tabla C.	Equipo/Unidad	Subtotal (€)
1	II	Recipientes de "SIMPLE"	124.184,78
2	III	Recipiente de "RECUPERACIÓN"	29.681,85
3 y 4	V	"EXTRACTIVA 1"	14.176.899,45
5	VI	"EXTRACTIVA 2"	15.688.800,95
6	VII	"MÚLTIPLE"	10.865.656,10
7	VIII	"BINARIA"	48.756.004,32
8 a 11	IV	Acumuladores de reflujo	108.877,04
12 a 14	IX	Tanques	2.223.438,47
15 a 26	X	Cambiadores de calor	2.158.453,67
27 a 50	XI	Bombas	1.433.019,26
	<b>P.E.M. (M€)</b>	<b>95.568.015,89</b>	

Tabla. C.XII. Presupuesto de ejecución material

El presupuesto de ejecución material del PFC intitulado “**Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butano, procedente del craqueo térmico de naftas**”, asciende al montante de **Noventa y cinco millones quinientos sesenta y ocho mil quince euros con ochenta y nueve céntimos**.

### **C.C2.6. Presupuesto de ejecución por contrata**

Aplicando al P.E.M. el beneficio industrial, (6%), los gastos generales, (13%) y el IVA (18%) se obtiene el montante del P.E.C., tal como sigue:

<b>Partidas</b>	<b>Subtotal (M€)</b>
P.E.M.	95.568.015,89
Beneficio industrial	5.734.080,95
Gastos generales	12.423.842,07
IVA	17.202.242,86
<b>P.E.C. (M€)</b>	<b>130.928.181,77</b>

Tabla. C.XIII. Presupuesto de ejecución por contrata

El presupuesto de ejecución por contrata del PFC intitulado “**Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butano, procedente del craqueo térmico de naftas**”, asciende al montante de **Ciento treinta millones novecientos veintiocho mil ciento ochenta y un euros con setenta y siete céntimos**.

El presupuesto general se presenta en la última página a fuer de documento contractual del presente presupuesto.

### **Capítulo C.C3. Estudio de costes e ingresos**

Los costes considerados del funcionamiento de la planta, (a expensas de una ingeniería básica que optimice la red de intercambio de calor), serán los derivados de adquirir materias primas, (butadieno crudo y extractante) y la potencia de bombeo.

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

Documento 4. Presupuesto

La planta requerirá una corriente de alimentación de butadieno crudo de 1170 kt/año, en caudal molar anual, 21150,663 Mmol/año. En contraste, la suma de corrientes obtenidas, (una vez derivadas parcialmente a la operación de "BLENDING"), y, excluyendo la corriente de producto principal, supone un caudal total, de similar composición a la alimentación original, de 17424,590 Mmol/año, es decir, se obtiene un reintegro del 82,38%.

Se supone que las corrientes pueden disponerse en Refinería para distintos procesos, si bien, dada la imposibilidad de obtener datos concretos acerca de los precios a que cada unidad adquiriría tales corrientes, se supondrá el escenario más negativo: devolución de toda la corriente a la planta de butadieno crudo, de modo que se reduzca la carga de la misma.

Así, el balance de alimentación neto requerido, se obtendrá como:

$$\text{Alimentación neta} = (1 - 0,82) \cdot 1170 \frac{\text{kt}}{\text{año}} = 206,117 \frac{\text{kt}}{\text{año}}$$

Un estudio de mercado, debidamente referenciado en la bibliografía, a que se ha podido acceder indica el precio de mercado de las corrientes de butadieno crudo:

$$\text{Precio del butadieno crudo} = 1494,95 \frac{\$}{\text{t}} \cdot \frac{1 \text{ €}}{1,3316 \$} \cong 1122,67 \frac{\text{€}}{\text{t}}$$

La cotización del crudo se tomó el día 29 de noviembre de 2011 a las 3 horas y 30 minutos. Por tanto el consumo neto de alimentación será:

$$\text{Coste neto del butadieno crudo} = 1122,67 \frac{\text{€}}{\text{t}} \cdot 206,117 \cdot 10^3 \frac{\text{t}}{\text{año}} \cong 231,401 \text{ M€}$$

Por su parte, el consumo de furfural será el de *make-up* más el consumo a tres días tal como queda estipulado en el proyecto, supo-

niendo la necesidad de una parada que obligue a introducir la totalidad o gran parte del extractante, en tanto se estabiliza la operación “RECUPERACIÓN”. Se trata por tanto de una cantidad de furfural de 15,154 kt/año. El precio del furfural se tomó de la misma referencia que el anterior:

$$\text{Precio del furfural} = 1600 \frac{\$}{t} \cdot \frac{1 \text{ €}}{1,3316 \$} \cong 1201,56 \frac{\text{€}}{t}$$

Lo que produce un consumo de:

$$\text{Coste neto del furfural} = 1201,56 \frac{\text{€}}{t} \cdot 15,154 \cdot 10^3 \frac{t}{\text{año}} \cong 18,208 \text{ M€}$$

Finalmente, para el coste del bombeo debe considerarse el precio del kWh eléctrico: 0,1252 €/kWh, tomado de datos de *CEPSA*. Se obtiene:

Bomba	Potencia (HP)	Potencia (kW)	Consumo (kWh/año)	Coste (€/año)
B-1	5	3,73	32674,8	4090,9
B-2	5	3,73	32674,8	4090,9
B-3	5	3,73	32674,8	4090,9
B-4	5	3,73	32674,8	4090,9
B-5	10	7,46	65349,6	8181,8
B-6	10	7,46	65349,6	8181,8
B-7	10	7,46	65349,6	8181,8
B-8	10	7,46	65349,6	8181,8
B-9	15	11,19	98024,4	12272,7
B-10	3	2,238	19604,88	2454,5
B-11	100	74,6	653496	81817,7
B-12	125	93,25	816870	102272,1
B-13	100	74,6	653496	81817,7
B-14	100	74,6	653496	81817,7
B-15	100	74,6	653496	81817,7
B-16	100	74,6	653496	81817,7
B-17	125	93,25	816870	102272,1

Tabla. C.XIV. Coste de bombeo. (Continúa en página siguiente)

## Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butanos, procedente del craqueo térmico de naftas

### Documento 4. Presupuesto

Bomba	Potencia (HP)	Potencia (kW)	Consumo (kWh/año)	Coste (€/año)
B-18	20	14,92	130699,2	16363,5
B-19	100	74,6	653496	81817,7
B-20	125	93,25	816870	102272,1
B-21	20	14,92	130699,2	16363,5
B-22	50	37,3	326748	40908,8
B-23	150	111,9	980244	122726,5
B-24	2	1,492	13069,92	1636,4
B-25	50	37,3	326748	40908,8
B-26	200	149,2	1306992	163635,4
B-27	2	1,492	13069,92	1636,4
B-28	200	149,2	1306992	163635,4
B-29	200	149,2	1306992	163635,4
B-30	200	149,2	1306992	981812,4
B-31	20	14,92	130699,2	16363,5
B-32	200	149,2	1306992	163635,4
B-33	200	149,2	1306992	163635,4
B-34	200	149,2	1306992	981812,4
B-35	20	14,92	130699,2	16363,5
B-36	200	149,2	1306992	163635,4
B-37	200	149,2	1306992	163635,4
B-38	200	149,2	1306992	981812,4
B-39	20	14,92	130699,2	16363,5
B-40	10	7,46	65349,6	8181,8
B-41	20	14,92	130699,2	16363,5
B-42	125	93,25	816870	102272,1
B-43	75	55,95	490122	61363,3
B-44	75	55,95	490122	61363,3
<b>Coste total (M€/año)</b>			<b>5,492</b>	

Tabla. C.XIV. Coste de bombeo. (Viene de página anterior)

Donde el consumo anual se calcula multiplicando la potencia de la bomba en kW, (el cambio es 1 HP = 0,746 kW), por las 24 horas de un día y los 365 días del año, (suponiendo funcionamiento anual ininterrumpido de las bombas). Cada consumo se multiplica por el precio de la energía y el coste total es la suma de los parciales de cada bomba.

Así, se totalizan los costes según:

$$\text{Costes de funcionamiento} = 231,401 + 18,208 + 5,492 \cong 254,801 \frac{\text{M€}}{\text{año}}$$

Habiéndose sumado los costes por alimentación, extractante y bombeo.

De otro lado, el estudio de mercado sobre el butadieno crudo indica un precio de venta del butadieno purísimo de 2550 €/t, en el mercado europeo. Para el funcionamiento nominal de la planta se espera una producción de 200,8 kt/año de butadieno, por lo que los ingresos ascenderán a la siguiente cantidad:

$$\text{Ingresos por producción} = 2550 \frac{\text{€}}{\text{t}} \cdot 200,8 \cdot 10^3 \frac{\text{t}}{\text{año}} \cong 512,04 \frac{\text{M€}}{\text{año}}$$

Se obtiene un margen de ganancia de:

$$\text{Beneficio bruto (R)} = 512 - 254,801 \cong 257,239 \frac{\text{M€}}{\text{año}}$$

Considérese seguidamente la expresión:

$$P(\text{€}) = R(\text{€}) - e \cdot I_f - (R(\text{€}) - d \cdot I_f) \cdot t \quad (\text{C.1})$$

Siendo P el beneficio neto, obtenido a partir del bruto cuando se le eliminan las partidas de amortización, e, del inmovilizado,  $I_f$ , (que coincide con el P.E.C) y la depreciación del inmovilizado, d, teniendo en cuenta la carga fiscal, t.

El libro de Jiménez Gutiérrez\* indica tomar 0,1 para los factores de amortización y depreciación y 0,5 para la carga fiscal. Así, la aplicación de la ecuación (C.1) produce una ganancia neta de:

$$P(\text{M€}) = 257,239 - 0,1 \cdot 130,928 - (257,239 - 0,1 \cdot 130,928) \cdot 0,5 \cong 122,073 \text{M€}$$

\* Diseño de procesos en Ingeniería Química. A. J. Gutiérrez. Editorial Reverté, 2003.

De donde la tasa de retorno, esto es, la razón entre el beneficio neto y la inversión produce:

$$ROI = \frac{122,073 \text{ M€}}{130,928 \text{ M€}} \cdot 100 \cong 93\%$$

El recíproco de esta fracción, utilizando unidades de ganancia anual y coste de inversión proporciona el tiempo de amortización:

$$\text{Tiempo de amortización} = \frac{130,928 \text{ M€}}{122,073 \text{ M€/año}} \cong 1,07 \text{ años}$$

Debe indicarse que el estudio no es riguroso, puesto que restaría por conocer el coste de fluidos para el intercambio de calor. Si bien, debe quedar claro el potencial que una planta como la proyectada supone. La producción de butadieno purísimo en el teatro europeo es deficitaria, por lo que se espera que el precio de mercado suba y con él, el margen de ganancias.

En todo caso, no se han considerado estrategias comerciales para los productos colaterales del proceso, lo que también podría ser una posible fuente de ingresos, subestimados en este estudio que justifica, a todas luces la viabilidad económica del proceso. Concluye el presupuesto con el planteamiento del Presupuesto general que quedó pendiente.

### **Capítulo C.C4. Presupuesto general**

Debe gravarse el P.E.M. con el 8% de su cuantía, en concepto de honorarios de ingeniería, así como el 18% de IVA. Se tiene:

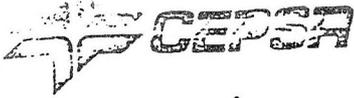
<b>Partidas</b>	<b>Subtotal (M€)</b>
P.E.M.	95.568.015,89
Honorarios de ingeniería (8% P.E.M.)	7.645.441,27
IVA (18%)	1.376.179,43
<b>P.E.C. (M€)</b>	<b>139.949.802,47</b>

Tabla. C.XV. Presupuesto de ejecución por contrata

Los presupuestos generales del PFC intitulado “**Diseño de un proceso para la purificación del 1,3-butadieno contenido en una fracción de butano, procedente del craqueo térmico de naftas**”, asciende al montante de **Ciento treinta y nueve millones novecientos cuarenta y ocho mil ochocientos dos euros con cuarenta y siete céntimos**.

En Puerto Real, (Cádiz) a martes 29 de noviembre de AD 2011

Fdo. José Javier Relinque Madroñal



FECHA	FIRMA	<b>ESTIMACION DE COSTES</b>	STD-1000-01
REALIZADO		<b>FACTORES</b>	HOJA 5 DE 8
APROBADO			

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55

TABLA I

EQUIPOS	TUBERIAS	INSTRUMENTOS	ELECTRICIDAD	OBRA CIVIL	MONTAJE MECANICO	CALORIFUGADO	PINTURA	FACTOR EQUIPO	(L/M)
HORNOS	17.7	5.1	4.2	26.9	23.0	-	-	1.77	1.30
CAMBIADORES	44.7	10.4	4.2	19.7	64.0	11.5	2.6	2.57	1.31
AERORREFRIGERANTES	13.9	4.8	19.5	4.2	22.9	-	3.1	1.68	1.37
COLUMNAS	59,5	14.8	10.3	26.8	91.4	15.1	6.6	3,25	1.37
RECIPIENTES HORIZ.	39,7	7.8	10.5	18.0	59.3	9.5	2.6	2.47	1.41
BOMBAS	29,6	3.8	54.0	11.4	47.4	4.8	4.1	2.55	1.38
COMPRESORES	20,1	10.4	10.5	19	36.8	4.9	2.6	2.04	1.50
AGITADORES	-	-	52.5	-	5.0	-	-	1.58	1.30
CRISTALIZADORES	18	7.8	52.5	50	28.4	-	-	2.57	1.22
CENTRIFUGAS	12	11.7	46.0	23	22.6	-	-	2.15	1.26
SECADORES	18	-	23.0	31	30.04	7.6	-	2.10	1.49
RELACION (L/M)	0	0.3	1.1	1.9	0	1.45	4.0		

100% 20% 10% 10% 10% 10% 10% 10% 35

BASE: EQUIPO MAYOR = 100%

- FACTORES EN % SOBRE EL COSTE DE LA PARTIDA DE EQUIPO MAYOR; CON EXCEPCION DEL FACTOR EQUIPO, EN TANTO POR UNO.

L+L = 2  
L = 0.3 M = 0.3

REVISION	a	b	c	d	e	f	g	h	i
----------	---	---	---	---	---	---	---	---	---

























