

Universidad de **Cádiz**

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

Facultad: CIENCIAS

Titulación: INGENIERÍA QUÍMICA

Título: DISEÑO DE UNA UNIDAD DE  
TRATAMIENTO DE AGUAS ÁCIDAS  
EN REFINERÍA

Autor: Manuel MACÍAS PÉREZ

Fecha: Octubre 2007





# **ÍNDICE GENERAL DEL PROYECTO**

## **A. MEMORIA DESCRIPTIVA**

- 0. INDICE DE LA MEMORIA DESCRIPTIVA**
- 1. INTRODUCCIÓN**
- 2. ORIGEN DE LAS AGUAS ÁCIDAS**
- 3. VALORACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS**
- 4. OBJETIVO DEL PROYECTO**
- 5. FÍSICO – QUÍMICA DEL PROCESO**
- 6. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA**
- 7. OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO**
- 8. VARIABLES DE DISEÑO**
- 9. BALANCE DE MATERIA**
- 10. DISEÑO DEL STRIPPER**
- 11. DESCRIPCIÓN DEL PRECALENTADOR DE CARGA**
- 12. DESCRIPCIÓN DEL REBOILER**
- 13. DESCRIPCIÓN DEL AEROREFRIGERANTE**
- 14. BOMBAS**
- 15. PIPING DE LA UNIDAD**
- 16. INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL**
- 17. SEGURIDAD: VARIOS**
- 18. BIBLIOGRAFÍA**

## **B. MEMORIA DE CÁLCULO**

- 0. INDICE DE LA MEMORIA DE CÁLCULO**
- 1. BALANCE DE MATERIA Y CÁLCULO DEL N° DE PLATOS**
- 2. DISEÑO DEL STRIPPER**
  - DISEÑO DE LOS PLATOS**
  - CÁLCULO DEL ESPESOR Y EL PESO DE LA COLUMNA**
- 3. PRECALENTADOR DE CARGA**
- 4. REBOILER**

5. **AEROREFRIGERANTE**
6. **BOMBAS**
7. **TUBERÍAS Y ACCESORIOS**

### **C. PLANOS**

### **D. PLIEGO DE CONDICIONES**

0. **ÍNDICE DEL PLIEGO DE CONDICIONES**
1. **OBJETIVO**
2. **PLIEGO DE CONDICIONES GENERALES**
3. **CONDICIONES DE LOS MATERIALES Y EQUIPOS**
4. **SEGURIDAD E HIGIENE**
5. **PLIEGO DE CONDICIONES PARTICULARES**
6. **MEDICIÓN Y ABONO DE LAS OBRAS**
7. **EJECUCIÓN DE LAS OBRAS**

### **E. PRESUPUESTO**

0. **ÍNDICE DEL PRESUPUESTO**
1. **ALCANCE DEL PRESUPUESTO**
2. **METODO DE CÁLCULO DEL PRESUPUESTO**
3. **EQUIPOS PRINCIPALES**
4. **COSTE DE LOS EQUIPOS PRINCIPALES**
5. **CÁLCULO DEL COSTE DE ADQUISICIÓN DEL EQUIPO**
6. **COSTE DEL CAPITAL FIJO**
7. **CUADRO DE PRECIOS FINAL**

### **F. ANEXOS**

0. **ANEXO DE LA MEMORIA DESCRIPTIVA**
- 1-7. **ANEXOS DE LA MEMORIA DE CÁLCULO**
- P. **ANEXO DEL PRESUPUESTO**

## **0. ÍNDICE DE LA MEMORIA DESCRIPTIVA**

### ***0. INDICE DEL DOCUMENTO***

### ***1. INTRODUCCIÓN***

### ***2. ORIGEN DE LAS AGUAS ÁCIDAS***

### ***3. VALORACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS***

### ***4. OBJETIVO DEL PROYECTO***

*4.1 Aspectos no contemplados en el cálculo*

### ***5. FÍSICO – QUÍMICA DEL PROCESO***

*5.1 Influencia de la temperatura y el pH*

*5.2 Presencia de CO<sub>2</sub>*

*5.3 Solubilidad de gases en los líquidos*

*5.4 Aspectos importantes del sistema*

*5.4.1 Corrosión*

*5.4.2 Espumas*

*5.4.3 Sulfuro amónico*

### ***6. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA***

*6.1 Zona de carga*

*6.2 Zona de stripping*

*6.2.1 Reboiler*

*6.2.2 Tanque e inyección de sosa*

*6.2.3 Stripper*

*6.2.4 Reflujo de cabeza*

*6.3 Circuito de fondo del stripper*

## **7. OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO**

### *7.1 Función objetivo*

### *7.2 Métodos de optimización*

#### *7.2.1 Métodos analíticos*

#### *7.2.2 Métodos numéricos*

##### *7.2.2.1 Métodos de eliminación de regiones*

##### *7.2.2.2 Métodos de optimización de funciones de varias variables*

### *7.3 Descripción del simulador*

### *7.4 Método de seccionamiento del proceso*

#### *7.4.1 Variables estudiadas*

#### *7.4.2 Primera iteración*

#### *7.4.3 Segunda iteración*

## **8. VARIABLES DE DISEÑO**

### *8.1 Caudal*

#### *8.1.1 Caudal de carga*

#### *8.1.2 Caudal de reflujo*

#### *8.1.3 Caudal de vapor al reboiler:*

### *8.2 Temperatura*

#### *8.2.1 Temperatura de la carga*

#### *8.2.2 Temperatura del reflujo*

#### *8.2.3 Temperatura de cabeza del stripper.*

### *8.3 Presión*

## **9. BALANCE DE MATERIA**

## **10. DISEÑO DEL STRIPPER**

### *10.1 Antecedentes*

### *10.2 Consideraciones generales*

### *10.3 Materiales*

*10.4 Descripción del stripper*

*10.4.1 Tubuladuras y conexiones*

*10.4.1.1 Boca de hombre*

*10.4.1.2 Conexiones de entrada y salida de fluido*

*10.4.1.3 Drenaje*

*10.4.1.4 Venteo*

*10.4.1.5 Adición de sosa*

*10.4.1.6 Tomas de nivel*

*10.4.2 Características de las conexiones*

*10.4.3 Espesor*

*10.4.4 Soporte*

*10.5 Diseño de los platos*

*10.5.1 Descripción de los platos*

*10.5.1.1 Diámetro de la torre*

*10.5.1.2 Espaciamiento entre platos*

*10.5.1.3 Vertederos*

*10.5.1.4 Derramaderos*

*10.5.2 Dimensionamiento de los platos*

*10.5.3 Caída de presión en el gas*

*10.5.4 Verificación del diseño del plato*

*10.5.4.1 Verificación de la inundación del plato*

*10.5.4.2 Verificación del arrastre del líquido*

*10.5.4.3 Verificación del lloriqueo*

*10.5.5 Tipos de platos*

*10.5.5.1 Selección del tipo de plato*

*10.5.6 Consideraciones de los orificios de platos*

**11. DESCRIPCIÓN DEL PRECALENTADOR DE CARGA**

*11.1 Tipo de cambiadores de calor*

*11.2 Elección del cambiador*

*11.3 Descripción general de un intercambiador de calor*

*11.3.1 Haz tubular*

*11.3.1.1 Placas tubulares:*

*11.3.1.2 Tubos*

*11.3.1.3 Deflectores*

*11.3.1.4 Unión tubo-placa tubular*

*11.3.2 Carcasa*

*11.3.3 Distribuidor*

*11.4 Diseño del cambiador*

*11.4.1 Tipo de distribuidor*

*11.4.2 Tipo de carcasa*

*11.5 Características del precalentador de carga*

## **12. DESCRIPCIÓN DEL REBOILER**

*12.1 Descripción de los tipos de reboilers*

*12.1.1 Kettle*

*12.1.2 Termosifón o circulación natural*

*12.1.2.1 Termosifón horizontal*

*12.1.2.2 Termosifón vertical*

*12.1.3 Reboilers de circulación forzada*

*12.2 Elección del tipo de reboiler*

*12.3 Descripción general de las partes de un reboiler*

*12.4 Características del reboiler*

## **13. DESCRIPCIÓN DEL AEROREFRIGERANTE**

*13.1 Tipos de equipos de condensación*

*13.2 Elección del tipo de equipo*

*13.3 Definición de aerorefrigerante*

*13.4 Descripción general de un aerorefrigerante*

*13.4.1 Haz tubular*

*13.4.1.1 Tipos de haces y cabezales*

*13.4.1.2 Sección*

*13.4.1.3 Tipo de unión tubo-aleta*

*13.4.1.4 Bastidor*

*13.4.2 Cámaras de aire*

*13.4.3 Ventiladores*

*13.5 Criterios de selección del tipo de aerorefrigerante*

*13.6 Datos del proceso del aéreo*

**14. BOMBAS**

*14.1 Características de las bombas*

*14.2 Bombas de la planta*

**15. PIPING DE LA UNIDAD**

*15.1 Tuberías de la planta*

*15.2 Aislamiento térmico de las tuberías*

*15.3 Selección de bridas y accesorios*

*15.3.1 Bridas*

*15.3.1.1 Selección de bridas*

*15.4 Accesorios*

**16. INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL**

*16.1 Consideraciones previas*

*16.2 Medidores de Temperatura*

*16.3 Medidores de Presión*

*16.4 Medidores de nivel*

*16.5 Medidores de caudal*

*16.6 Válvulas de control*

*16.6.1 Válvulas automáticas*

*16.6.2 Válvulas de seguridad*

*16.6.3 Válvulas auxiliares*

*16.6.3.1 Válvulas de compuerta*

*16.6.3.2 Válvulas de retención*

**17. SEGURIDAD: VARIOS**

*17.1 Generalidades*

*17.2 Ácido sulfhídrico*

*17.3 Amoníaco*

*17.4 Sosa cáustica*

*17.4.1 Efectos a una sobreexposición*

*17.4.2 Emergencia y procedimientos de primera ayuda*

**18. BIBLIOGRAFÍA**

## 1. INTRODUCCIÓN

El petróleo es una mezcla compleja de hidrocarburos que se encuentran en la naturaleza en estado líquido más o menos viscoso y de color oscuro y que es la materia prima en las refinerías de petróleo. Su composición química es muy variable y fundamentalmente depende de su edad que puede ser de millones de años y también de cual es su localización geográfica.

Millones de compuestos forman o se encuentran en el petróleo. Existen cinco principales que se resumen a continuación:

Carbono	84 – 87 %
Hidrogeno	11 – 14 %
Azufre	0,05 – 2 %
Oxígeno	0 – 1 %
Nitrógeno	0,1 – 1,6 %

El azufre es necesario eliminarlo por ser corrosivo y ataca a los catalizadores de procesos y máquinas y por la formación de SO<sub>2</sub>. El nitrógeno se encuentra habitualmente en las fracciones pesadas, no dedicadas a combustible.

También existen otros componentes en las composiciones que se muestran a continuación:

Agua y sedimentos	0,1 – 2 %
Sales	10 – 1000 ppm
Metales	1 – 100 ppm

A nivel de compuestos, la fracción predominante son los hidrocarburos. Los tres grandes grupos que se encuentran en el petróleo son:

### *1. Hidrocarburos*

Son el compuesto mayoritario y se clasifican en los saturados, los cicloalcanos (o naftenos) y los insaturados.

### *2. Compuestos orgánicos con heteroatomos*

Los más comunes son los átomos y compuestos de azufre, compuestos oxigenados, derivados del nitrógeno e hidrocarburos con metales.

### *3. Compuestos químicos inclasificables*

Son los elementos más pesados del petróleo formando cadenas y redes muy grandes que no destilan y quedan en el residuo o asfaltos.

El petróleo crudo carece de aplicación práctica, es por esto por lo que se hace necesario someterlo a procesos de separación de modo que se obtengan productos que si sean de utilidad. Este fraccionamiento se lleva a cabo en las refinerías.

Sin embargo, no todos los productos del crudo son deseables. De los componentes anteriormente citados, el azufre constituye, en la mayoría de los casos, un componente susceptible de ser eliminado.

La limitación que existe en el contenido de azufre en determinados productos como el Gasoil, actualmente en el de automoción, obliga a que este producto tenga que ser tratado antes de su empleo como combustible. Para ello, en las etapas de refinado del petróleo se suele separar el azufre de las distintas fracciones y se trata para evitar la corrosión y contaminación en las etapas posteriores y antes del consumo.

Durante el calentamiento del crudo en el horno y a su paso por la torre de destilación, los enlaces C – S más débiles se rompen, originándose H<sub>2</sub>S y mercaptanos. Por ello, todas las fracciones de salida de la destilación llevan compuestos de S y deben ser eliminados.

La totalidad del H<sub>2</sub>S sale por cabeza de la columna y en parte queda absorbido en el agua que condensa en el acumulador de cabeza. El resto, junto con los mercaptanos más volátiles pasa a la unidad de ligeros. Como los productos finales no pueden tener compuestos azufrados, se hace necesaria también su eliminación.

Puesto que la desulfuración se debe llevar a cabo en diferentes corrientes de la unidad de ligeros, así como en otras partes de la refinería, los procesos que llevan a cabo estas funciones son muy variados y crecen en complejidad con el peso molecular medio de las fracciones. Los de fracciones ligeras son de gran eficacia y relativamente poco costosos y los de los fueles o fracciones más pesadas suelen ser más costosos y menos eficaces.

Algunos de estos procesos se resumen a continuación:

### *1. Unidad de aminas*

Este proceso se utiliza exclusivamente para la eliminación de H<sub>2</sub>S. Son procesos de absorción (si la alimentación entra como gas) o de extracción (si entra líquida) en contracorriente y a presión.

### *2. Unidades Merox LPG*

Se produce primero una neutralización con sosa diluida en un prelavado y luego se lleva la corriente a una columna de extracción de platos perforados donde se cruza a contracorriente con una disolución concentrada de sosa. Después se lleva a una decantación para separar el agua de la sosa que pudiera arrastrarse.

### *3. Unidad de tamices moleculares*

Son cristales de zeolitas naturales o sintéticas en cuya superficie interna se adsorben H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub> y COS, junto con mercaptanos, sulfuros y disulfuros más ligeros. El proceso se lleva a cabo en fase líquida en varios separadores en serie.

#### *4. Unidades de Hidrodesulfuración (HDS)*

Son unidades de uso múltiple y lo normal es que funcionen por campañas conforme a programación previa. Nacieron con el propósito de eliminar compuestos sulfurados de las fracciones que se debían someter a craqueo catalítico (FCC), pues sus catalizadores ácidos son muy sensibles al S. Sin embargo, dada la cada vez mayor presión sobre el azufre, hoy en día se las utiliza también para eliminar el azufre de casi todos los productos finales.

La unidad consta de una primera parte que consiste en un reactor catalítico de lecho fijo y una segunda formada por una columna de destilación.

La legislación medioambiental sobre el contenido de azufre en los gasóleos en Europa, requiere una eficacia en el proceso de hidrodesulfuración para los que no existía tecnología hace apenas diez años, y cuyos costes de inversión son realmente elevados.

## **2. ORIGEN DE LAS AGUAS ÁCIDAS**

El efluente acuoso (agua ácida) procede del vapor usado en el proceso de hidrodesulfuración. La condensación del citado vapor se produce al mismo tiempo que la de hidrocarburos líquidos y en presencia de una fase vapor de hidrocarburos que contienen a menudo ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ), amoníaco ( $NH_3$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y cianuros volátiles. Después de separar los hidrocarburos líquidos, el vapor condensado que queda contiene ácido sulfhídrico y amoníaco disueltos. Estos componentes deben ser eliminados por su alto poder contaminante. Este efluente es el que conocemos como agua ácida. Pero existen otras fuentes donde también se producen este tipo de corrientes.

Las tres fuentes principales de aguas ácidas son:

- Fuentes primarias: constituidas por los drenajes de los botellones de reflujo de las columnas desetanizadora, desbutanizadora y despropanizadora de la planta de FCC, así como el botellón de descarga del compresor de la sección de recuperación de gases de la planta.
- Fuentes secundarias: constituida por los drenajes en la unidad de aminas (lavado de los gases con solución acuosa de monoetanolamina, MEA para eliminar compuestos de azufre), por la unidad Merox LPG.
- Fuentes terciarias: constituidas por los drenajes de los equipos auxiliares como intercambiadores de calor, bombas, etc.

En general, todo efluente acuoso generado en la planta, presenta un contenido importante en ácido sulfhídrico y amoníaco, siendo necesario su tratamiento en la unidad de aguas ácidas.

La unidad diseñada se encarga de eliminar estos contaminantes para mejorar las especificaciones de estas aguas ácidas antes de enviarlas a tratamientos posteriores

como la unidad de desalado de crudo o la planta de tratamiento. Tanto  $H_2S$  como  $NH_3$  pueden ser eliminados de forma efectiva por un stripper que elimina gases disueltos u otros componentes volátiles. La mayoría constan de una torre sencilla equipada de platos o relleno.

El agua ácida entra en la parte superior del stripper y el vapor de agua o gas de stripping se introduce por el fondo. El vapor ascendente elimina tanto el ácido sulfhídrico como el amoníaco libres de la corriente de agua que fluye hacia abajo.

Se considera que estamos obteniendo un proceso eficiente de stripping cuando podemos eliminar el 98-99,5% de  $H_2S$  y el 90-97% de  $NH_3$ . También eliminamos fenoles pero en cantidades pequeñas. Para eliminar el 90% de  $NH_3$  se requiere una temperatura de  $110^{\circ}C$ . Sin embargo para eliminar el 90% de  $H_2S$  podemos emplear una temperatura de  $37^{\circ}C$  si no existe amoníaco presente o si se fija en forma de sal (cloruro o sulfato). El problema en este caso es que el amoníaco que no se elimina produce serios problemas de corrosión. Así pues, se opta por emplear condiciones de operación que nos permita eliminar el amoníaco.

### **3. VALORACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS**

Algunas de las vías contempladas para llevar a cabo este proyecto son las siguientes:

#### Alternativa 1:

Una de las posibilidades para purificar el agua ácida de ácido sulfhídrico y amoníaco es, acidificar la corriente de agua ácida con ácido clorhídrico o sulfúrico. De esta forma se fija el amoníaco en disolución formando cloruro amónico o sulfato amónico. El resultado neto es que se libera muy bien el ácido sulfhídrico sin necesidad de calor. Sin embargo presenta como desventaja que no permite eliminar el amoníaco y conlleva inevitables problemas de corrosión.

#### Alternativa 2:

La segunda posibilidad es la de usar humos que contienen CO<sub>2</sub>. De este modo reacciona el amoníaco con el CO<sub>2</sub> formando carbonato amónico. El dióxido de carbono no retiene tan bien el amoníaco como los ácidos, pero presenta la ventaja de utilizar humos (material de deshecho) y se elimina bien el ácido sulfhídrico. De forma análoga a la alternativa uno, presenta la desventaja que no se elimina el amoníaco.

#### Alternativa 3:

Esta es la alternativa elegida. Elimina los dos componentes en una unidad con relativa sencillez. Es preciso emplear una torre de platos perforados y se realiza una desorción con vapor de baja presión. En otras ocasiones se ha empleado gas combustible, gas inerte o aire para el stripping de agua ácida.

A la hora de contemplar el diseño del stripper debemos tener en cuenta las dos configuraciones más comunes:

- Stripper convencional con un condensador en cabeza de columna y reflujo total, e inyección de vapor (ya sea directa o mediante el empleo de un reboiler externo).
- Stripper con pump-around en cabeza de columna y condensador interno de contacto directo, e inyección de vapor (ya sea directa o mediante el empleo de reboiler).

La diferencia principal entre estos dos tipos de stripper se basa en la forma de enfriar el vapor de cabeza. Cada uno acarrea ciertos problemas. La ventaja principal del stripper convencional es su menor coste. La ventaja del sistema pump-around es la reducción de la corrosión en cabeza de columna y una mejora en el balance energético (menos consumo).

Por todo ello, la opción escogida es el diseño de un stripper con recirculación tipo pump-around, considerando un condensador interno y con reboiler externo.

#### **4. OBJETIVO DEL PROYECTO**

El objetivo del proyecto es el diseño de una unidad de tratamiento de aguas ácidas donde se eliminen tanto  $\text{NH}_3$  como  $\text{H}_2\text{S}$  de una corriente de aguas ácidas procedente de otras unidades de la refinería, con el fin de cumplir con la normativa medioambiental vigente.

El caudal de alimentación a tratar en la planta es de 550 Tm/día, con una composición del 0,27 % en peso de  $\text{NH}_3$  y del 0,82 % en peso de  $\text{H}_2\text{S}$ . Para cumplir con la normativa, la corriente de salida de la unidad no debe contener más de 50 ppm de  $\text{NH}_3$  ni más de 10 ppm de  $\text{H}_2\text{S}$ .

Estos objetivos se reflejan en la Propuesta de Proyecto de Fin de Carrera aprobada por la Comisión de Proyectos de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Cádiz en Marzo de 2007.

#### 4.1 Aspectos no contemplados en el cálculo

Tanto el proceso de hidrosulfuración como el tratamiento del agua desorbida y la obtención de azufre a partir de vapor ácido no están contemplados en el presente proyecto.

Este proyecto no contempla los siguientes aspectos del cálculo:

- Sección de recepción en el botellón de carga.
- Cimentación de los equipos.
- Aspectos relacionados con el diseño mecánico de los mismos.
- Especificaciones del tipo de instrumentos a emplear en la instrumentación y control de la planta.
- Ingeniería de detalle.
- Cálculos eléctricos de las instalaciones.

## **5. FÍSICO – QUÍMICA DEL PROCESO**

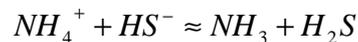
La alimentación de aguas ácidas al stripper puede venir de varias fuentes, por ejemplo: las unidades de crudo, las de hidrosulfuración, los cracking térmico y catalítico, etc.

Las aguas contienen diversas cantidades de sulfuro de hidrógeno, amoníaco, cloruros, cianuros, tiocianatos, polisulfuros, fenoles, mercaptanos y dióxido de carbono (estos últimos en pequeñas cantidades).

Las cantidades de los distintos constituyentes varían dependiendo del tipo de crudo de donde proceda la carga y de la fuente del agua.

Las aguas ácidas esencialmente son disoluciones acuosas que pueden contener como mucho hasta 10000 ppm de ácido sulfhídrico. La relación molar de amoníaco a sulfhídrico varía aproximadamente entre 1 y 2, con un valor medio de 1,5.

El ácido sulfhídrico y el amoníaco están presentes en disolución acuosa como  $\text{HSNH}_4$ , que es una sal de una base débil ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) y ácido débil ( $\text{H}_2\text{S}$ ). En disolución, esta sal sufre una hidrólisis fuerte que devuelve el amoníaco y el ácido libre. El equilibrio puede escribirse como:



El principio de stripping de agua ácida esta basado en la aplicación de calor para reducir las solubilidades del  $[\text{NH}_4]^+$  y  $\text{HS}^-$  en la fase acuosa, más la dilución y agotamiento de los gases de  $\text{NH}_3$  y  $\text{H}_2\text{S}$  con vapor de agua.

### 5.1 Influencia de la temperatura y el pH

En cada plato de la columna se establece un doble equilibrio, uno líquido-vapor y un equilibrio de disociación en fase acuosa. En el stripper pretendemos que el resultado neto sea el desplazamiento del equilibrio hacia la derecha.

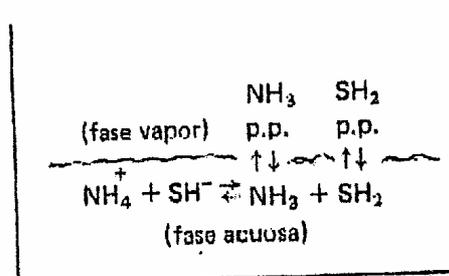


Figura 5.1: Equilibrio líquido - vapor

Podemos expresar el equilibrio tal que:

$$K_H = \frac{[H_2S] \cdot [NH_3]}{[HS^-] \cdot [NH_4^+]}$$

La constante de acidez será:

$$K_a = \frac{[SH^-] \cdot [H^+]}{[H_2S]}$$

La constante de basicidad será:

$$K_b = \frac{[NH_4^+] \cdot [OH^-]}{[NH_4OH]}$$

La constante de hidrólisis se puede escribir por tanto de la forma:

$$K_h = \frac{K_{H_2O}}{K_a \cdot K_b}$$

Si definimos “x” como la fracción de H<sub>2</sub>S libre respecto al H<sub>2</sub>S total y x’ como la fracción de NH<sub>3</sub> libre respecto al total:

$$x = \frac{[H_2S]}{[HS^- + H_2S]}$$

Por tanto:

$$\frac{[H_2S]}{[HS^-]} = \frac{x}{(1-x)}$$

Análogamente para el amoníaco:

$$\frac{[NH_3]}{[NH_4^+]} = \frac{x'}{(1-x')}$$

Asumiendo que todo el amoníaco y ácido sulfhídrico libre, permanecen en disolución entonces  $x$  será igual a  $x'$  y por estequiometría de equilibrio:

$$K_h = \frac{x^2}{(1-x)^2}$$

Un aumento de la temperatura, conlleva un aumento de la constante de hidrólisis y por tanto un aumento de las cantidades de  $H_2S$  y  $NN_3$  libres presentes en la disolución por lo que su eliminación será más fácil.

Como el  $H_2S$  libre es menos soluble que el  $NN_3$ , es eliminado más rápidamente, con lo cual el amoníaco se convierte en el componente de control del proceso. A medida que la corriente sufre stripping, la relación de  $NH_3$  y a  $H_2S$  aumenta y la disolución se hace más alcalina.

Los valores teóricos de pH para disoluciones con una relación molar ( $NH_3/H_2S$ ) entre 1 y 2, teniendo en cuenta los valores de las constantes obtenidas a partir de bibliografía, están comprendidos entre 8,2 y 9,2 que responde bien a la realidad, ya que los valores típicos para aguas ácidas varían entre 7,8 y 9,3.

Los valores teóricos de las constantes son:

- Constante de disociación del  $NH_4OH$ :  $k_b=1,75 \cdot 10^{-5}$
- Constante de primera disociación del  $H_2S$ :  $k_{a1}=6,3 \cdot 10^{-8}$

La segunda constante de disociación del ácido se desprecia en las suposiciones de los cálculos teóricos.

## 5.2 Presencia de CO<sub>2</sub>

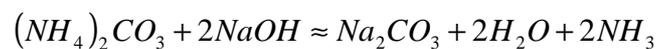
La presencia de pequeñas cantidades de CO<sub>2</sub> en la alimentación, dificulta la eliminación del NH<sub>3</sub>.

Cuando componentes ácidos, con constantes de ionización más elevadas que el H<sub>2</sub>S tales como el CO<sub>2</sub> o cianuros están presentes en la disolución, el componente ácido sustituye al HS<sup>-</sup> fijándose el amoníaco en disolución como una sal (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.

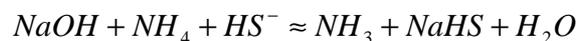
Por lo tanto el agua de stripper tendrá una cantidad residual de NH<sub>3</sub> en proporción con el CO<sub>2</sub> que entra en alimentación.

El NH<sub>3</sub> fijado en el agua ácida puede ser retirado por adición de una solución de sosa cáustica al agua ácida del stripper.

La reacción que se da es:



Por tanto una inyección de sosa ayuda a contrarrestar el problema de la fijación del amoníaco, pero si la cantidad inyectada es mayor que la requerida, se produce una reacción secundaria por el exceso:



En este punto la sosa provoca la liberación del NH<sub>3</sub>, pero al mismo tiempo impide la formación de H<sub>2</sub>S. Es por tanto una variable que necesitamos supervisar. Para ello se controla el pH del agua de entrada y en la columna a unos niveles fijos.

### 5.3 Solubilidad de gases en los líquidos

El stripping o desorción de gases es la operación inversa a la absorción de gases, y es empleada para transferir uno o más componentes de una mezcla de líquidos hacia un gas. Para el diseño del stripper es necesario conocer las relaciones de equilibrio líquido/vapor del sistema, para determinar la cantidad de gas o vapor de stripping necesario para eliminar los componentes volátiles del líquido.

La solubilidad de los gases en el disolvente será más alta cuanto mayor sea la similitud entre el disolvente y el soluto. Para definir la solubilidad, se necesitan datos de temperatura, concentración, presión del soluto gaseoso en la fase gas y presión total del sistema.

En el caso de presiones bajas, el dato de presión total del sistema no tiene mucha importancia a la hora de determinar la solubilidad del gas en el líquido. A medida que se incrementa la presión total puede haber efectos significativos en la solubilidad.

En general, puede comprobarse que la solubilidad del gas en el disolvente líquido disminuye al aumentar la temperatura del sistema y aumenta al aumentar la presión total del mismo.

### 5.4 Aspectos importantes del sistema

#### 5.4.1 Corrosión

El principal componente de la corriente de gas ácido procedente del stripper de aguas ácidas, es el ácido sulfhídrico. Este ácido es el principal agente corrosivo de la unidad.

El H<sub>2</sub>S, en presencia de agua, puede reaccionar con metales activos para formar sulfuros de hierro insolubles.

En los puntos donde las concentraciones de gas ácido ( $H_2S$ ) y las temperaturas son elevadas, es donde se da una corrosión más fuerte.

Las principales áreas de corrosión en la unidad de stripper de aguas ácidas son:

- Precalentador de alimentación – fondo de stripper de aguas ácidas.
- Sección superior del stripper de aguas ácidas
- Aerorefrigerante de la extracción lateral.

La expansión del gas ácido, causada por el calentamiento y pérdida de presión en los cambiadores y tuberías, es causante de condiciones corrosivas.

La unidad esta diseñada para minimizar la expansión de vapor dentro de las tuberías y equipos durante el proceso.

#### 5.4.2 Espumas

Las espumas reducen el paso a través de los platos e impiden un stripping adecuado.

Los problemas causados por las espumas se detectan, normalmente, por un fuerte aumento de la caída de presión a través del stripper. Los principales promotores de espumas son:

- Sólidos finos en suspensión
- Ácidos orgánicos, tales como ácido fórmico o nafténicos, en corrientes gaseosas.
- Hidrocarburos disueltos.
- Excesiva turbulencia.
- Alta velocidad de contacto líquido-vapor.

### 5.4.3 Sulfuro amónico

Además de los problemas de corrosión y formación de espumas, el stripper es susceptible de formar sólidos que pueden originar obstrucciones de las válvulas de los platos, cambiadores de calor, instrumentos, y sobre todo, líneas de procesos.

La formación de sólidos es el resultado de la precipitación de sulfuro amónico. A temperaturas reducidas, el  $\text{NH}_3$  y el  $\text{H}_2\text{S}$  se combinarán para formar la sal amónica  $\text{NH}_4\text{HS}$  que puede precipitar.

En una atmósfera de  $\text{NH}_3$  y  $\text{H}_2\text{O}$  (atmósfera básica), la sal puede reaccionar para formar sales de polisulfuro amónico ( $\text{NH}_4\text{S}_x$ ) que provoca una mayor formación de sólidos.

La experiencia indica que las líneas de procesos y equipos, que contienen gas ácido amoniacal, deberán mantenerse por encima de  $68\text{ }^\circ\text{C}$  para prevenir la formación de sólidos.

Las sales de polisulfuro amónico, aunque son resistentes a la temperatura, sin embargo son solubles en agua. Las líneas atascadas, cambiadores y otros equipos pueden limpiarse con agua de lavado.

## **6. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA**

### **6.1 Zona de carga**

Las aguas ácidas llegan a la unidad por una línea de 6", según datos proporcionados por la refinería. En primer lugar, estas aguas ácidas van a parar al botellón de carga WSC2. Existe un controlador de presión mínima en la tubería de forma que se puedan prevenir vaporizaciones. A la entrada del botellón existe un indicador de temperatura y una vez dentro, se le somete a destilación flash a la presión de 1,27 Kg/cm<sup>2</sup>.

Este botellón está provisto de un deflector interno para la separación de los aceites que acompañan a la corriente de entrada, principalmente hidrocarburos no deseados en la alimentación del stripper. El aceite decantado, es bombeado por las bombas de slops, hasta un botellón donde son almacenados. Existen indicadores de alto y bajo nivel que paran o arrancan las bombas de aceite. El botellón WSC2 es un recipiente horizontal, cuya configuración es elegida por permitir una mejor decantación de los hidrocarburos y una mejor distribución del espacio en la planta.

El caudal que llega al botellón de carga WSC2 es de 22,41 m<sup>3</sup>/h. La carga debe sufrir una estabilización para decantar los hidrocarburos de al menos 3 días. El diseño de la sección de carga, botellón, bombas de slops, tanques de almacenamiento, piping de corriente gaseosa, no está contemplado en el presente proyecto. Se puede deducir sin embargo, que el botellón debe tener un volumen mínimo de 1620 m<sup>3</sup>, para almacenar la carga durante este tiempo. Ese volumen será con seguridad mayor, debido a que se requiere un espacio para separar el gas ácido procedente de la destilación flash, del líquido de carga.

El gas de cabeza abandona el botellón por una línea de 2" y se envía a unidades de recuperación de azufre. Se controla la presión de la línea y en caso necesario se toma la acción de enviar el gas a antorcha, mediante la automática instalada.

El agua ácida del fondo del botellón se bombea a través de una línea de 3" mediante las bombas B1 A/B, que se hallan interconectadas por líneas de 2" en la impulsión.

La carga antes de entrar al stripper se calienta a 95°C a su paso por los tubos del precalentador WSE1.

## 6.2 Zona de stripping

### 6.2.1 Reboiler

Las aguas ácidas entran al stripper a una presión de 1,7 Kg/cm<sup>2</sup>, y al fluir hacia abajo a través de los platos del stripper entran en contacto con una corriente de vapor ascendente desde el fondo del stripper, lo cual proporciona la acción de stripping.

Los vapores se generan por el reboiler WSE2. Se trata de un termosifón horizontal de flujo dividido que utiliza vapor de 3,5 Kg/cm<sup>2</sup> como medio calefactor. Los vapores y el líquido entran en la columna por una línea de 10".

El caudal de vapor es controlado por una válvula automática y el condensado va a la red de condensado de baja a través de dos trampas de vapor.

### 6.2.2 Tanque e inyección de sosa

La alimentación de sosa al stripper proviene de un tanque de sosa de capacidad 4,5 m<sup>3</sup>, cuyo diseño queda también fuera del alcance del proyecto. Del fondo del tanque, la sosa es aspirada por una pequeña bomba volumétrica a través de una línea de 2". La impulsión se dirige a la torre de stripping donde tiene entrada por los platos 11 y 17.

El caudal de sosa inyectado se mide con un rotámetro y justo después se podrá actuar la válvula de seguridad instalada. El tanque de sosa, alimentado desde otras zonas de la refinería, tiene una alarma de alto nivel para evitar el rebose.

Normalmente, tal como se ha diseñado el stripper, la inyección de sosa no es necesaria. Solamente se inyectará cuando el contenido de amoníaco en el agua desorbida sea superior a la especificación (50 ppm).

En el caso de que hubiera que inyectar sosa, esta inyección debe ser la mínima necesaria para conseguir la especificación, por lo que se debe vigilar con relativa frecuencia.

Si se inyecta sosa sin ser necesario, además del coste adicional de sosa, puede disminuir el strippado de H<sub>2</sub>S y no es bueno para el equipo.

### 6.2.3 Stripper

El stripper de aguas ácidas WSC1 es una columna construida en acero al carbono con una corrosión permitida de 6 mm. Dispone de 30 platos, tiene una altura de 22,1 m y un diámetro interior de 1 m.

En el stripper se produce la separación del gas contenido en el agua ácida por la acción del vapor de stripping.

Las aguas ácidas impulsadas por las bombas B1 A/B, son precalentadas en el intercambiador de carga WSE1 y posteriormente tienen entrada en la torre por el plato 7. Toda esta corriente es conducida por una línea de 3" que se ensancha a una línea de 6" a su entrada al stripper.

El caudal de aguas ácidas que se alimenta a la torre se controla mediante un controlador de caudal en cascada con el indicador de nivel de agua del botellón de carga.

La sosa tiene su entrada al stripper por los platos 11 y 17 en líneas de 1".

El reboiler se encuentra por debajo del plato 30 del stripper, con líneas de 3" para la salida de producto hacia el cambiador y por debajo de esta, una línea de 10" que retorna a la torre.

Los vapores de cabeza abandonan la torre por una línea de 3". La presión de esta corriente se controla con dos válvulas automáticas. Una de ellas dirige a las plantas de azufre y otra a la red de antorchas en el caso de que sea necesario.

A la línea que va hacia las plantas de azufre se le adiciona otra corriente procedente del botellón de carga WSV1, a través de una línea de 2".

En el plato número 8, está la extracción lateral a través de una línea de 10". Esta lleva al aerorefrigerante WSE3, y posteriormente, el condensado llega a las bombas B3 A/B que recirculan hasta la cabeza del stripper en una línea de 1 ½".

Por el fondo de la torre se halla la salida del agua desorbida que se dirige por una línea de 2 ½" hacia la carcasa del intercambiador WSE1. La temperatura del agua es medida por un termopar. La temperatura de la corriente desciende desde 110°C hasta 60°C en el cambiador.

La salida del cambiador se dirige a la aspiración de las bombas B2 A/B, las cuales impulsan la corriente por líneas de 2 ½" hacia la planta de tratamiento de aguas. Ambas bombas presentan líneas de 2" de retorno a la torre de mínimo caudal.

El stripper de aguas ácidas posee una alarma de muy bajo nivel que da orden de parada de las bombas B2 A/B. Las bombas deberán ser arrancadas manualmente cuando se recupere el nivel mínimo.

El stripper dispone de un reflujo que tiene su entrada en la cabeza de la torre por una línea de 1 ½" y cuyo caudal es controlado también.

A lo largo de la columna hay distribuido distintos indicadores de temperatura y un controlador de esta de forma que nos ayuden a controlar la temperatura de la torre en todo momento.

#### 6.2.4 Reflujo de cabeza

Como se ha indicado, la extracción lateral o pump-around, se dirige al aéreo WSE3 por una línea de 10", donde se enfría y a la salida del cual se tiene un control de temperatura, así como un indicador.

Después de ser enfriada esta corriente, entra por una línea de 1 ½" hacia las bombas B3 A/B cuya misión es la impulsión de las aguas como reflujo al stripper. Cada una de estas bombas posee indicación en TDC de marcha/paro y situación de sello.

#### 6.3 Circuito de fondo del stripper

El agua desorbida es impulsada por las bombas B2 A/B, por línea de 2 ½", hacia su destino final. La corriente se bifurca, dirigiéndose a:

- Desalado de la columna de Crudo 1.
- Planta de tratamiento de aguas.

Este caudal se controla con un controlador de flujo, que está conectado a la automática que da paso a las salidas ya indicadas, y en cascada el controlador de nivel existente en el fondo del stripper. En la salida hacia la Planta de tratamiento se encuentran las conexiones de puesta en marcha y la de descarga de la válvula de seguridad.

Todos los ventiladores del aéreo tienen alarma de altas vibraciones. Todos los motores tanto de aéreo como de bombas tienen señal en panel de marcha/paro.

A continuación se muestra un diagrama de flujo de la unidad:

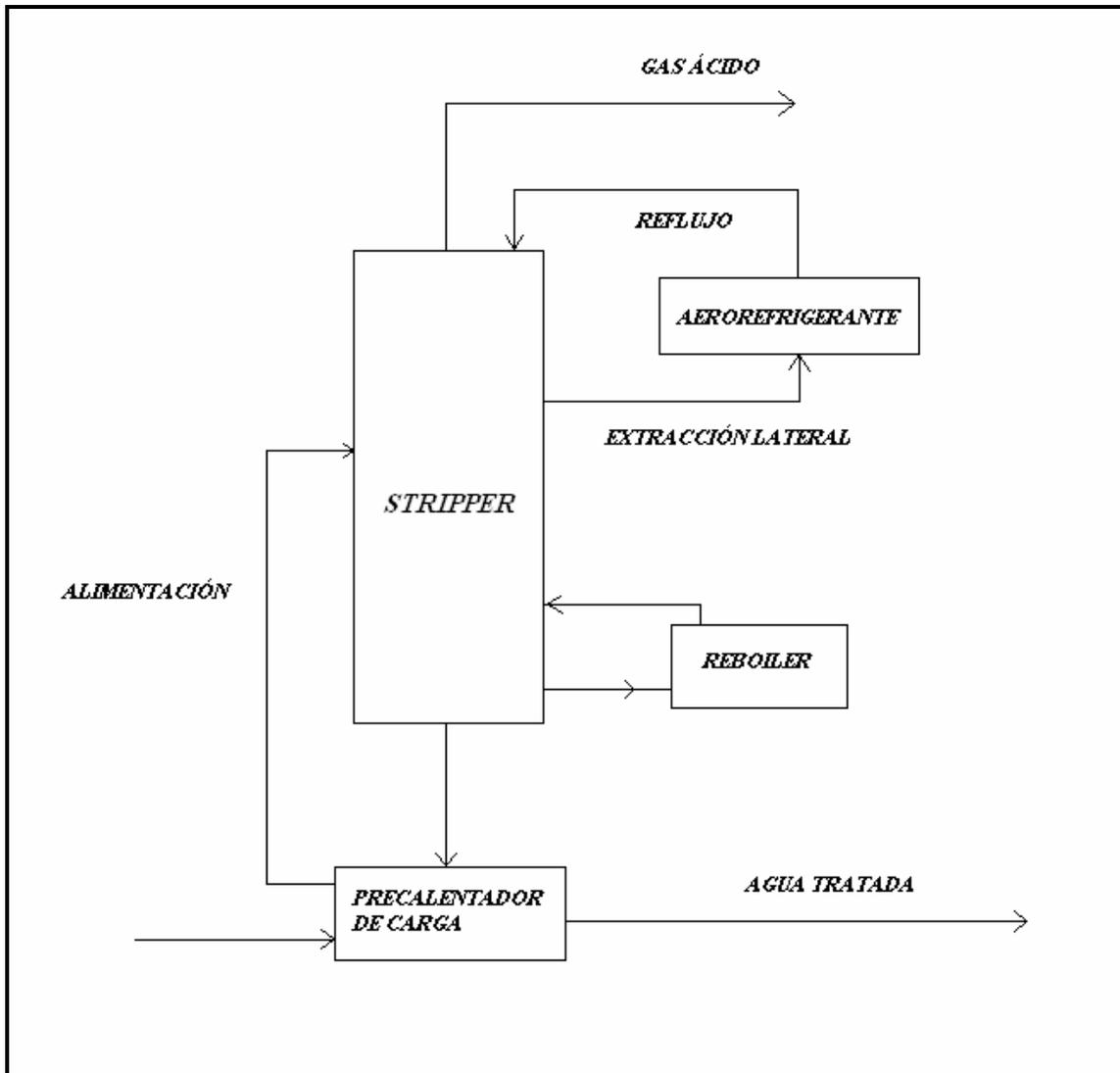


Figura 6.1: Diagrama de flujo de la planta

## **7. OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO**

El objetivo del stripper de aguas ácidas es eliminar el ácido sulfhídrico y el amoníaco de la corriente de aguas que se trata. Además, existen una serie de restricciones que nos ayudan a determinar si hemos cumplido con ese objetivo.

Para cumplir estas condiciones existen una serie de variables de diseño del proceso que permiten ser impuestas según los requerimientos. El problema principal que se plantea es la elección de los valores de estas variables para, en primer lugar, cumplir con los objetivos estimados, y en segundo lugar, hacerlo de la forma más eficiente y económica posible.

Es por ello, que antes de entrar en el diseño de los elementos de la planta, se requiera los valores de estas variables de diseño. La introducción de características novedosas a este stripper respecto a los que están situados en la refinería, como el reflujo pump-around, hace que los valores de estas variables de diseño sean completamente desconocidos. Para obtenerlos se recurre a un proceso de optimización.

Se puede definir la optimización como el proceso mediante el cuál encontramos el conjunto de condiciones requeridas para conseguir el mejor resultado posible. En aplicaciones industriales, los objetivos de la optimización pueden ser varios:

- Objetivos económicos: maximizar beneficios, minimizar costes, maximizar rentabilidad...
- Objetivos técnicos: mayor rendimiento de un producto en un reactor, menor volumen, menor área de intercambio de calor, etc.

En nuestro caso, los objetivos fijados serán principalmente de carácter técnico.

### 7.1 Función objetivo

Para realizar el proceso de optimización es necesario por tanto fijar la función objetivo que se define como aquella que debemos resolver para obtener la resolución óptima de nuestro problema. Esta función objetivo vendrá dada en función de las variables de diseño del proceso y en la mayoría de los casos, estará limitada por una serie de restricciones propias del proceso que se esté tratando. En nuestro caso, la función objetivo está marcada por obtener las condiciones necesarias en la corriente de colas y que a su vez permitan obtener una corriente de gas ácido adecuada:

*Corriente de colas:*

< 50 ppm de  $\text{NH}_3$   
< 10 ppm de  $\text{H}_2\text{S}$

*Corriente de cabeza:*

20 % de  $\text{NH}_3$   
60 % de  $\text{H}_2\text{S}$   
20 % de  $\text{H}_2\text{O}$

Respecto a las restricciones, las propias del proceso que ya se han comentado anteriormente:

- El pH debe quedar fijado en un intervalo entre 8 – 9.
- La temperatura de la corriente de reflujo no debe ser menor de 67 °C.
- La temperatura de la alimentación está limitada por el máximo intercambio que pueda realizar la corriente de colas.

## 7.2 Métodos de optimización

A la hora de llevar a cabo el proceso de optimización, hay que analizar que método es el más adecuado para hacerlo. Existen varios métodos de optimización, resumidos a continuación:

### 7.2.1 Métodos analíticos:

Se dispone de una expresión analítica de la función objetivo, la cuál es continua en el intervalo de estudio.

### 7.2.2 Métodos numéricos:

En general se basan en seleccionar un punto base, calcular el valor de la función objetivo en él y a partir de este resultado seleccionar un nuevo punto de búsqueda.

Dentro de estos métodos numéricos, se pueden distinguir entre los métodos de optimización de una variable o de varias:

#### 7.2.2.1 Métodos de eliminación de regiones: Optimización de una variable

Se aplican a funciones continuas y unimodales. Existen muchos métodos en los cuales se selecciona el óptimo para una sola variable. Se citan a continuación algunos de ellos:

- Método de los cinco puntos
- Método de la sección áurea
- Método de Coggins

Algunos de ellos son requeridos en los métodos para funciones con varias variables.

### 7.2.2.2 Métodos de optimización de funciones de varias variables

Los principios generales de la búsqueda numérica son los siguientes:

1. Seleccionar un conjunto de valores factibles de las variables de diseño que satisfagan las restricciones si las hay. Será el punto base.
2. Evaluar la función objetivo en dicho punto.
3. Elegir un segundo punto factible (la elección dependerá del método).
4. Evaluar la función en el nuevo punto.
5. Comparar el valor de la función objetivo en el nuevo punto base.
6. Si el nuevo punto es mejor, nos movemos hacia él y lo tomamos como punto base. Si el valor de la función en el punto base es mejor que el valor en el nuevo punto, la búsqueda puede continuar cambiando la dirección del movimiento o disminuyendo la longitud del movimiento (tamaño de la etapa).

La clasificación de estos métodos puede extenderse mucho más a partir de este punto, detallando en métodos directos o de gradientes, o métodos con o sin restricciones, etc. No es el objetivo del proyecto entrar en esta serie de consideraciones.

Para llevar a cabo la optimización, se debe conocer, que estamos ante un proceso de estas características, con una función objetivo modulada por varias variables de diseño. El método empleado en los siguientes apartados para obtener el óptimo en estas variables, es el conocido como **método de seccionamiento**.

El método de seccionamiento es quizá, el más sencillo de todos y de más fácil comprensión. Es por tanto el método empleado en este proyecto.

Se conoce como el método más sencillo de búsqueda directa a aquél que va cambiando el valor de una sola variable a la vez, que es lo que ocurre en este caso.

En primer lugar, se fijan todas las variables de diseño en valores razonables. Para ello, se emplean datos facilitados por la empresa. Una de las variables se fija de forma que maximice la función objetivo.

Cuando se ha alcanzado el óptimo local, se fija esta variable en el mejor valor obtenido y se selecciona otra variable y se repite la misma operación.

Cuando la búsqueda se ha realizado en todas direcciones (han sido ajustadas todas las variables) acaba la primera etapa o iteración y comienza de nuevo el proceso de optimización. En cada etapa, la optimización es siempre unidimensional. Es por ello, que se pueden emplear métodos de una sola variable para llegar al óptimo en cada una de ellas. Para ello se emplean los métodos que ya se han nombrado con anterioridad.

### 7.3 Descripción del simulador

Para llevar a cabo el método de seccionamiento, se debe de tener acceso a datos de funcionamiento de la columna en cuestión. Es por ello que se decide el empleo de una simulación de la planta que se va a diseñar, para obtener estos datos.

La simulación de la unidad de stripper de aguas ácidas en este proyecto, se ha realizado mediante el simulador HYSYS. La elección de este simulador no tiene otra razón que ser el empleado en CEPSA y por tanto, el de más fácil acceso.

Para realizar la simulación, se emplearon estudios previos de viabilidad de la planta de stripper de aguas ácidas en la configuración que se lleva a cabo en este proyecto. Se admite que se mantienen los 30 platos en el stripper y se emplea para la caracterización de las propiedades físico-químicas del fluido tratado, un paquete basado en la ecuación de estado de Soave-Readlich-Kwong (RKS). De nuevo la elección de esta característica se basa en recomendaciones de CEPSA. Empleada en otras simulaciones para los strippers implantados ya en la planta, obtiene muy buenos resultados y que se asemejan con los datos obtenidos después en la sala de control y análisis de laboratorio.

En el Anexo de la memoria descriptiva, se adjuntan capturas de la construcción del simulador y sus características.

## 7.4 Método de seccionamiento del proceso

### 7.4.1 Variables estudiadas

Antes de llevar a cabo el método de seccionamiento de la unidad de aguas ácidas, se deben definir las variables que tienen influencia en la resolución de la función objetivo y decidir cuales se van a estudiar. Se irá comprobando a lo largo del proceso, el comportamiento de cada una de estas variables en los resultados obtenidos en las corrientes del stripper.

Las variables de diseño que se estudiarán en el proceso de optimización serán las siguientes:

- Caudal de vapor: se alimenta desde el fondo de la columna procedente del reboiler. Vendrá dado por la razón de recirculación entre el caudal de vapor que asciende y la cantidad de líquido que sale de la columna también denominado “boilup”. Del valor de este caudal va a depender el duty asignado al reboiler, y que en la práctica será el parámetro de control del caudal de vapor.
- Caudal de recirculación: corresponde al caudal de la corriente lateral extraída que se lleva como reflujo hasta cabeza. Vendrá limitado por la cantidad de vapor de stripping asignada. Tendrá que ser siempre menor a este vapor, de forma que siga ascendiendo vapor por la columna y no se lleve todo a reflujo.
- Temperatura de recirculación: o temperatura de la corriente de reflujo que sale del aéreo. De ella dependerá en gran parte, la temperatura en el condensador – cabeza de columna. Interesa que sea la menor posible para que el vapor que escape sea el menor, pero el límite lo marca la formación de sulfuro amonio a 67 °C.
- Temperatura de alimentación: o temperatura optima para que se obtenga el intercambio entre el líquido y el vapor.

- Caída de presión en la columna: Debe ser la menor posible y a las menores presiones posibles para favorecer la separación.

Las variables que se mantienen fijas son las presiones de las corrientes de entrada de la carga de aguas ácidas y de la corriente de reflujo durante todas las iteraciones.

El orden de iteración será el siguiente:

- Caudal de vapor
- Caudal de recirculación
- Temperatura de recirculación
- Temperatura de alimentación
- Caída de presión

Los objetivos que se deben de alcanzar son:

1. Corriente de fondo:

- 10 ppm de H<sub>2</sub>S
- 50 ppm de NH<sub>3</sub>

2. Corriente de cabeza:

- 20 % de H<sub>2</sub>O
- 60 % de H<sub>2</sub>S
- 20 % de NH<sub>3</sub>

#### 7.4.2 Primera iteración

Los valores fijos para toda la iteración serán los siguientes:

Presión de recirculación = 1,39 ATA

Presión a la entrada de la carga = 1,7 ATA

Temperatura del vapor de stripping = 105 °C

Para toda la primera iteración, el valor de la presión en la cabeza es de 1,1 ATA y en el fondo se mantiene en 1,3 ATA. Estos valores se estudiarán en la última variable de la iteración.

➤ Caudal de vapor

Los valores del resto de variables se fijan para esta primera iteración en los siguientes valores:

<b>Caudal de Recirculación</b>	15	Kmol/h
<b>Temperatura de Recirculación</b>	90	°C
<b>Temperatura de Alimentación</b>	95	°C

Los resultados se muestran en la siguiente tabla y en las gráficas del anexo.

<b>Caudal de vapor: 1º iteración</b>					
<b>Variable de diseño</b>	<b>Fondo</b>		<b>Cabeza</b>		
<b>Boilup</b>	<b>X NH3</b>	<b>X SH2</b>	<b>X NH3</b>	<b>X SH2</b>	<b>X Agua</b>
0,025	0,0022	0,00136	2,8%	47,0%	49,0%
0,03	0,002	0,0012	3,0%	39,0%	57,0%
0,035	0,0019	0,00101	3,3%	33,7%	62,9%
0,04	0,0017	0,0009	3,4%	29,2%	67,4%
0,045	0,0015	0,00078	3,5%	25,7%	70,8%
0,05	0,0014	0,00058	3,6%	22,9%	73,5%
0,06	0,001	0,00045	3,7%	18,8%	77,5%
0,07	0,0007	0,00029	3,7%	16,0%	80,3%
0,08	0,0003	0,00023	3,7%	13,8%	82,4%

Se pueden sacar dos conclusiones claras de esta primera iteración:

El amoníaco eliminado en la corriente de fondo aumenta a medida que el caudal de vapor es mayor.

Y por otro lado, en la corriente de cabeza, se comprueba que el % de agua en esta corriente aumenta como era de esperar, con el aumento del caudal de vapor, en

detrimento del % de sulfhídrico. Todavía el % de amoníaco esta alejado de nuestros objetivos.

Se debe alcanzar un compromiso a la hora de fijar la variable caudal de vapor para el resto del método. A la hora de elegir, se tiene en cuenta que el verdadero objetivo de toda la unidad es la eliminación de amoníaco y sulfhídrico, y no tanto, la composición de la corriente de gas, que se puede considerar un objetivo secundario. Así pues, se elige un boilup de 0,08 que es el máximo que el simulador a permitido aumentar el caudal de vapor sin que la simulación sea correcta. Con el resto de parámetros fijados en los valores actuales, no se puede llegar más allá. Por tanto se pasa a la siguiente variable.

➤ Caudal de recirculación

Los valores del resto de variables se fijan en los siguientes valores:

<b>Caudal de vapor</b>	0,08	Boilup
<b>Temperatura de Recirculación</b>	90	°C
<b>Temperatura de Alimentación</b>	95	°C

Los resultados se muestran en la siguiente tabla y en las gráficas del anexo.

<b>Caudal de recirculación: 1º iteración</b>					
<b>Variable de diseño</b>	<b>Fondo</b>		<b>Cabeza</b>		
	<b>X NH3</b>	<b>X SH2</b>	<b>X NH3</b>	<b>X SH2</b>	<b>X Agua</b>
<b>Kmol / h</b>					
5	0,0003	0,00023	3,4%	12,6%	84,0%
15	0,0003	0,00023	3,7%	13,9%	82,4%
25	0,0003	0,00023	4,1%	15,4%	80,5%
35	0,0003	0,00023	4,6%	17,3%	78,1%
45	0,0003	0,00023	5,3%	19,8%	74,9%
55	0,0003	0,00023	6,1%	23,1%	70,8%
65	0,0003	0,00023	7,4%	27,7%	65,0%
75	0,0003	0,00023	9,2%	34,6%	56,3%

Como se muestra en los resultados, el caudal de recirculación no tiene efectos inmediatos en la corriente de fondos. Se estudia por tanto su influencia en los % de la

corriente de gas ácido de cabeza. Se comprueba un aumento de los componentes amoníaco y sulfhídrico en detrimento del agua a medida que este caudal de reflujo aumenta. De nuevo el límite lo marca el correcto funcionamiento del simulador en el que 75 Kmol/h es el caudal máximo que se permite en estas condiciones y será por tanto el valor en el que se fija la variable.

➤ Temperatura de recirculación

Los valores del resto de variables se fijan en los siguientes valores:

<b>Caudal de vapor</b>	0,08	Boilup
<b>Caudal de Recirculación</b>	75	Kmol / h
<b>Temperatura de Alimentación</b>	95	°C

Los resultados se muestran en la siguiente tabla y en las gráficas del anexo.

<b>Temperatura de recirculación: 1º iteración</b>					
<b>Variable de diseño</b>	<b>Fondo</b>		<b>Cabeza</b>		
	<b>°C</b>	<b>X NH3</b>	<b>X SH2</b>	<b>X NH3</b>	<b>X SH2</b>
90	0,0003	0,00023	9,2%	34,6%	56,3%
85	0,0003	0,00023	10,0%	37,9%	52,1%
80	0,0003	0,00023	10,7%	40,7%	48,6%
75	0,0003	0,00023	11,4%	43,1%	45,4%
70	0,0003	0,00023	12,1%	45,4%	42,5%
65	0,0003	0,00023	12,7%	47,6%	39,7%
60	0,0003	0,00023	13,2%	49,9%	36,9%
55	0,0003	0,00023	13,8%	52,0%	34,2%

Se puede comprobar que esta variable tampoco tiene efectos inmediatos en la separación de la corriente de fondo. Si se puede observar que a medida que disminuye la temperatura, en la corriente de cabeza, van aumentando levemente las composiciones de amoníaco y sulfhídrico y desciende el % de agua. El límite a la hora de fijar esta variable, estaba en la temperatura a la que se formaban los sulfuros (67°C). Por tanto se fijará en 70 °C.

➤ Temperatura de la alimentación

Los valores del resto de variables se fijan en los siguientes valores:

<b>Caudal de vapor</b>	0,08	Boilup
<b>Caudal de Recirculación</b>	75	Kmol / h
<b>Temperatura de Recirculación</b>	70	°C

Los resultados se muestran en la siguiente tabla y en las gráficas del anexo.

<b>Temperatura de alimentación: 1º iteración</b>					
<b>Variable de diseño</b>	<b>Fondo</b>		<b>Cabeza</b>		
	<b>°C</b>	<b>X NH3</b>	<b>X SH2</b>	<b>X NH3</b>	<b>X SH2</b>
95	0,0003	0,00023	12,1%	45,4%	42,5%
100	0,0003	0,00023	6,9%	25,3%	67,8%
105	0,0003	0,00023	2,9%	10,0%	87,2%

Según datos de configuraciones de stripper ya conocidas, se sabe que esta temperatura rondará los 90°C. Aún así, también se ha incluido su iteración para fijar un valor que nos permita realizar los cálculos necesarios de la columna.

A una mayor temperatura de la carga de aguas ácidas al stripper, mayor es el porcentaje de agua en la cabeza siguiendo una tendencia lógica si tenemos en cuenta que la alimentación es prácticamente agua. El mínimo que marca el simulador para estas condiciones es de 95°C y es por tanto el valor fijado.

➤ Caída de presión

Los valores del resto de variables se fijan en los siguientes valores:

<b>Caudal de vapor</b>	0,08	Boilup
<b>Caudal de Recirculación</b>	75	Kmol / h
<b>Temperatura de Recirculación</b>	70	°C
<b>Temperatura de Alimentación</b>	95	°C

Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

<b>Caída de presión: 1º iteración</b>					
<b>Variable de diseño</b>	<b>Fondo</b>		<b>Cabeza</b>		
<b>Presión</b>	<b>X NH3</b>	<b>X SH2</b>	<b>X NH3</b>	<b>X SH2</b>	<b>X Agua</b>
1,1 - 1,2	0,0002	0,00019	12,1%	45,4%	42,5%
1,1 - 1,3	0,0003	0,00023	14,2%	56,6%	29,2%
1,1 - 1,4	0,0006	0,00041	15,7%	67,1%	17,2%
1,2 - 1,3	0,0004	0,00026	14,6%	57,0%	28,5%
1,2 - 1,4	0,0006	0,00045	16,0%	67,3%	16,7%
1,3 - 1,4	0,0005	0,00042	16,4%	67,6%	16,0%

Es difícil sacar conclusiones de estos resultados pero a primera vista se puede apreciar que a mayores caídas de presión, menor es la separación. También, utilizando una caída de presión para presiones pequeñas y un poco más elevadas, se ve que para estas últimas la separación es más difícil. Por tanto se elegirá un intervalo 1,1 – 1,4 ATA para las presiones en la columna.

➤ Resultado final de la primera iteración

Caudal de vapor = 0,08 (boilup o razón de recirculación)

Caudal de recirculación = 75 Kmol / h

Temperatura de recirculación = 70 °C

Temperatura de alimentación = 95 °C

Caída de presión = 1,1 – 1,4 ATA

### 7.4.3 Segunda iteración

De nuevo, las presiones en la columna se mantienen en los valores estimados de 1,1 ATA para cabeza y 1,4 para fondos.

➤ Caudal de vapor

Los valores del resto de variables se fijan en los siguientes valores:

<b>Caudal de Recirculación</b>	75	Kmol/h
<b>Temperatura de Recirculación</b>	70	°C
<b>Temperatura de Alimentación</b>	95	°C

Los resultados se muestran en la siguiente tabla y en las gráficas del anexo.

<b>Caudal de vapor: 2º iteración</b>					
<b>Variable de diseño</b>	<b>Fondo</b>		<b>Cabeza</b>		
	<b>X NH3</b>	<b>X SH2</b>	<b>X NH3</b>	<b>X SH2</b>	<b>X Agua</b>
0,08	0,000600	0,00015	16,1%	67,2%	16,7%
0,085	0,000400	0,0001	14,5%	55,7%	29,8%
0,09	0,000240	0,000072	12,4%	44,5%	43,1%
0,095	0,000115	0,000059	10,7%	37,0%	52,3%
0,1	0,000064	0,000011	9,4%	31,6%	59,0%
0,105	0,000026	0,000007	8,3%	27,6%	64,1%
0,11	0,000011	0,000007	7,4%	24,5%	68,1%

De nuevo la tendencia comprobada en la primera iteración se mantiene. En la corriente de fondo, con un mayor caudal de vapor, se obtiene más separación de amoníaco y sulfhídrico. Por el contrario, sigue dando un porcentaje de agua en cabeza excesivo. Se toma por tanto como valor fijo, el primer valor de boilup que nos permite cumplir con las especificaciones de la corriente de fondo, es decir, un valor de 0,105. La composición de agua en la cabeza se variará con el resto de variables.

➤ Caudal de recirculación

Los valores del resto de variables se fijan en los siguientes valores:

<b>Caudal de vapor</b>	0,105	Boilup
<b>Temperatura de Recirculación</b>	70	°C
<b>Temperatura de Alimentación</b>	95	°C

Los resultados se muestran en la siguiente tabla y en las gráficas del anexo.

<b>Caudal de recirculación: 2º iteración</b>					
<b>Variable de diseño</b>	<b>Fondo</b>		<b>Cabeza</b>		
	<b>Kmol / h</b>	<b>X NH3</b>	<b>X SH2</b>	<b>X NH3</b>	<b>X SH2</b>
60	0,000026	0,000007	6,2%	20,7%	73,1%
75	0,000026	0,000007	8,3%	27,6%	64,1%
80	0,000026	0,000007	9,4%	31,1%	59,5%
85	0,000026	0,000007	10,7%	35,7%	53,6%
90	0,000026	0,000007	12,5%	41,7%	45,7%
95	0,000026	0,000007	15,0%	50,2%	34,8%
100	0,000026	0,000007	18,1%	60,1%	21,8%
105	-	-	-	-	-

La tendencia es la misma que antes y el descenso en las composiciones de agua en cabeza es mucho más acusado. Se toma el primer valor que cumple las especificaciones: 100 Kmol / h.

➤ Temperatura de recirculación

Los valores del resto de variables se fijan en los siguientes valores:

<b>Caudal de vapor</b>	0,105	Boilup
<b>Caudal de Recirculación</b>	100	Kmol / h
<b>Temperatura de Alimentación</b>	95	°C

Los resultados se muestran en la siguiente tabla y en las gráficas del anexo.

<b>Temperatura de recirculación: 2º iteración</b>					
<b>Variable de diseño</b>	<b>Fondo</b>		<b>Cabeza</b>		
	<b>°C</b>	<b>X NH3</b>	<b>X SH2</b>	<b>X NH3</b>	<b>X SH2</b>
90	0,000026	0,000007	12,4%	41,2%	46,4%
85	0,000026	0,000007	14,0%	46,7%	39,3%
80	0,000026	0,000007	15,5%	51,6%	32,9%
75	0,000026	0,000007	16,9%	56,1%	27,1%
70	0,000026	0,000007	18,1%	60,1%	21,8%
65	0,000026	0,000007	19,2%	63,7%	17,1%
60	0,000026	0,000007	20,1%	66,7%	13,2%
55	0,000026	0,000007	20,9%	69,2%	9,9%

La iteración se lleva a cabo con los mismos valores obteniéndose resultados similares. Como la limitación de esta variable también sigue vigente, el valor fijado se mantiene en los 70°C.

➤ Temperatura de la alimentación

Los valores del resto de variables se fijan en los siguientes valores:

<b>Caudal de vapor</b>	0,105	Boilup
<b>Caudal de Recirculación</b>	100	Kmol / h
<b>Temperatura de Recirculación</b>	70	°C

Los resultados se muestran en la siguiente tabla y en las gráficas del anexo.

<b>Temperatura de alimentación: 2º iteración</b>					
<b>Variable de diseño</b>	<b>Fondo</b>		<b>Cabeza</b>		
	<b>X NH3</b>	<b>X SH2</b>	<b>X NH3</b>	<b>X SH2</b>	<b>X Agua</b>
<b>°C</b>					
95	0,000026	0,000007	18,1%	60,1%	21,8%
100	0,000026	0,000007	9,1%	30,1%	60,8%
105	0,000026	0,000007	3,2%	10,7%	86,0%

De nuevo, con los mismos valores, la temperatura óptima de la alimentación vuelve a ser 95 °C.

➤ Caída de presión

Los valores del resto de variables se fijan en los siguientes valores:

<b>Caudal de vapor</b>	0,105	Boilup
<b>Caudal de Recirculación</b>	100	Kmol / h
<b>Temperatura de Recirculación</b>	70	°C
<b>Temperatura de Alimentación</b>	95	°C

Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

<b>Caída de presión: 2º iteración</b>					
<b>Variable de diseño</b>	<b>Fondo</b>		<b>Cabeza</b>		
<b>Presión</b>	<b>X NH3</b>	<b>X SH2</b>	<b>X NH3</b>	<b>X SH2</b>	<b>X Agua</b>
1,1 - 1,2	0,000009	0,0000008	12,3%	40,5%	47,2%
1,1 - 1,3	0,000017	0,000004	14,9%	49,4%	35,7%
1,1 - 1,4	0,000026	0,000007	17,9%	59,7%	22,4%
1,2 - 1,3	0,000014	0,000005	15,0%	49,8%	35,2%
1,2 - 1,4	0,000026	0,000008	17,9%	60,3%	21,8%
1,3 - 1,4	0,000023	0,00001	18,3%	60,9%	20,8%

De nuevo, se mantiene el valor de la variable en el que se venía utilizando. Se elige de nuevo el intervalo 1,1 – 1,4.

Al final de la iteración, tres de las 5 variables no se han variado. Las especificaciones se cumplen tanto en fondos, donde estamos por debajo de los 50 y 10 ppm de NH<sub>3</sub> y H<sub>2</sub>S respectivamente, como en cabeza donde las composiciones obtenidas se asemejan a las deseadas:

Se termina por tanto, el proceso de optimización y se emplearán para el diseño de la columna, los siguientes datos en las variables de diseño estudiadas:

Caudal de vapor = 0,105 (boilup o razón de recirculación)

Caudal de recirculación = 100 Kmol / h

Temperatura de recirculación = 70 °C

Temperatura de alimentación = 95 °C

Caída de presión = 1,1 – 1,4 ATA

En algunos pasos del proceso de diseño, se recurrirá de nuevo a la simulación para tomar datos de composiciones de algunas corrientes en procesos iterativos como primer valor de la iteración. Las variables de esa simulación serán los óptimos obtenidos aquí.

## **8. VARIABLES DE DISEÑO**

### 8.1 Caudal

#### 8.1.1 Caudal de carga

El caudal de diseño de la unidad es de 550 m<sup>3</sup>/día. Evidentemente, la unidad puede ir a caudales superiores al de diseño (620 m<sup>3</sup>/día), pero se debe de tener en cuenta que valores muy por encima provocan inundación de los platos del stripper, disminuyendo la eficacia del stripping. Por el contrario, valores muy bajos si no se reduce el duty del reboiler, pueden provocar el efecto de soplado que conlleva también, la disminución de la eficacia.

#### 8.1.2 Caudal de reflujo

El stripper tiene un reflujo de 100 Kmol/h de la corriente extraída en el séptimo plato. El líquido que se obtiene del aerorefrigerante es recirculado hasta la cabeza de la columna. El mayor o menor caudal de reflujo, dependerá del caudal de vapor suministrado por el reboiler y la potencia de la bomba 3.

#### 8.1.3 Caudal de vapor al reboiler:

El vapor de baja presión que entra al reboiler, permite vaporizar parte del fondo y regresarlo al stripper. En las condiciones de diseño, el caudal de baja presión debe ser de 2330 Kg/h.

## 8.2 Temperatura

### 8.2.1 Temperatura de la carga

Vendrá dada por la temperatura que se mantenga en el fondo del stripper y la eficacia del cambiador carga/fondo. En diseño, esta temperatura se establece en 95°C.

### 8.2.2 Temperatura del reflujo

Esta corriente busca disminuir la temperatura de la cabeza de columna. Su límite está en la temperatura de formación de sulfato amónico en la corriente. En diseño, se establece en 70°C.

### 8.2.3 Temperatura de cabeza del stripper.

Para que el funcionamiento del stripper sea óptimo, se debe mantener la temperatura del reflujo en la de diseño, y la temperatura del plato de alimentación entre 100-105°C. Esta temperatura se regula a partir del duty del reboiler, es decir, la cantidad de vapor que se inyecta, junto con la cantidad de corriente que es recirculada.

## 8.3 Presión

La presión de trabajo será la menor posible siempre que el gas ácido salga hacia las plantas de azufre y teniendo en cuenta que siempre debe ser superior a la atmosférica.

## 9. BALANCE DE MATERIA

En este apartado se exponen los resultados obtenidos en la Memoria de Cálculo referente a los balances de materia del proceso. El esquema de la planta diseñada se muestra a continuación:

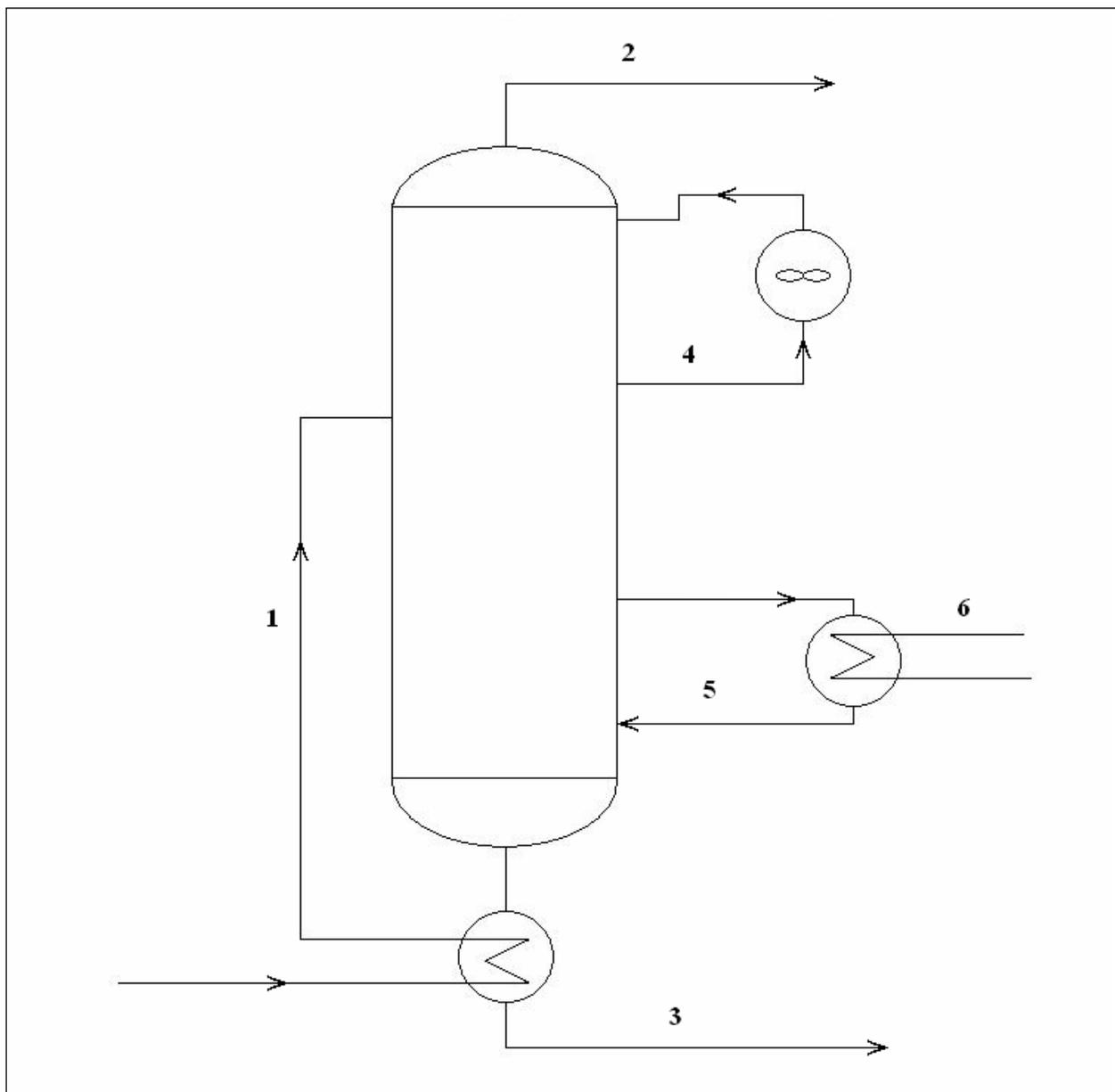


Figura 9.1: Corrientes de la unidad de aguas ácidas

Se exponen también las corrientes y las características calculadas como resultado del balance de materia realizado:

- 1 = Alimentación de aguas ácidas.
- 2 = Corriente de gas ácido de cabeza.
- 3 = Corriente de fondo del stripper.
- 4 = Extracción lateral del stripper.
- 5 = Corriente del reboiler.
- 6 = Vapor de baja presión.

1				2			
Corriente	%peso	Kg/h	Kmol/h	Corriente	%peso	Kg/h	Kmol/h
H2O	0,9891	21908,50	1217,15	H2O	0,1940	57,812	3,211
H2S	0,0082	181,63	5,354	H2S	0,6088	181,411	5,335
NH3	0,0027	59,80	2,518	NH3	0,1970	58,712	3,453
<b>Total</b>	-	22150	1226	<b>Total</b>	-	297,93	12

3				4			
Corriente	%peso	Kg/h	Kmol/h	Corriente	%peso	Kg/h	Kmol/h
H2O	0,99994	21850,688	1213,93	H2O	0,8995	1619,1	89,95
H2S	0,00001	0,219	0,0064	H2S	0,0531	180,54	5,31
NH3	0,00005	1,093	0,0643	NH3	0,047	80,58	4,74
<b>Total</b>	-	21852	1214	<b>Total</b>	-	1880,22	100

5				6			
Corriente	%peso	Kg/h	Kmol/h	Corriente	%peso	Kg/h	Kmol/h
H2O	0,99993	24035	1315,91	H2O	1	2330	129,4
H2S	0,000015	0,3605	0,01	H2S	-	-	-
NH3	0,000055	1,32	0,077	NH3	-	-	-
<b>Total</b>	-	24037	1316	<b>Total</b>	-	2330	129,4

## **10. DISEÑO DEL STRIPPER**

El stripper de esta unidad de aguas ácidas, tiene por objetivo eliminar el ácido sulfhídrico y el amoníaco que contiene la alimentación, de forma que el agua retirada por fondos contenga contenidos de ppm que cumplan con las especificaciones que se exigen.

A la hora de abordar el diseño de la columna de desorción o stripper, se debe de tener en cuenta que existen dos partes en las que se puede dividir el cálculo. Una primera consistiría en el diseño de la columna en si, y otra segunda parte, en el diseño de los platos perforados que se emplean.

### **10.1 Antecedentes**

En las refinerías, se emplean muchos tipos de strippers sencillos para la eliminación de ácido sulfhídrico y amoníaco. Consisten en una torre donde la alimentación entra por la parte superior y el vapor de stripping es introducido por la parte inferior llevándose los componentes que se desean eliminar.

Las características del ácido sulfhídrico hacen que sea eliminado mucho más rápidamente que el amoníaco, debido a su menor solubilidad. En los strippers actuales que trabajan por encima de los 50°C, prácticamente la totalidad el ácido sulfhídrico es eliminado en el plato de alimentación. El resto de la operación se lleva a cabo a temperaturas en las que se elimine el amoníaco, es decir, cercanas a los 110°C.

Los strippers que emplean vapor de agua como medio para eliminar ácido sulfhídrico y amoníaco, se dividen en dos: con utilización de reflujo o sin reflujo.

En el caso de que no se este utilizando un reflujo de la corriente de cabeza, el gas que se obtiene es enviado directamente a tratamiento. Se admite por tanto que se

pueden obtener compuestos gaseosos húmedos. El gas húmedo suele abandonar la unidad a temperaturas mayores que en el caso del reflujo.

Si se emplea el reflujo, es en el caso de que no se pueda tolerar un producto húmedo. En este caso se emplea un condensador del vapor de agua que se vuelve a recircular hasta el stripper. Normalmente requieren mayor cantidad de vapor de stripping para alcanzar la misma cantidad de eliminación.

La idea de un sistema pump-around en cabeza es utilizar ambos conceptos. El gas saldrá directamente por cabeza del stripper con un porcentaje bajo en vapor de agua (20%), y no lo hará a una temperatura demasiado elevada. Además, se permite un ahorro energético y menores problemas de corrosión que en el sistema que emplea el reflujo.

También se debate en la utilización de platos o un relleno para la columna. Los platos en el proceso de deserción son más utilizados. En este caso serán de acero inoxidable. La opción del relleno se descarta debido a los problemas de corrosión que presenta el fluido. Tendría que sustituirse el relleno cada vez que la corrosión fuese demasiado perjudicial para el sistema, además de la consecuente parada de la unidad. Con los platos, el mayor coste inicial, sería solventado a la larga, por una mayor estabilidad.

## 10.2 Consideraciones generales

- Si se presentan en la alimentación polisulfuros (procedentes del cracking de alta presión), se deberá emplear como mínimo una presión de 3,5 ATA y una temperatura de 145°C con objeto de descomponer los polisulfuros en productos que puedan separarse del agua por stripping.
- Se excluirán aguas que contengan carbonatos por el peligro de precipitación y eventual obstrucción del stripper. Si la concentración en carbonatos no es elevada, se deberá realizar un lavado periódico con ácido clorhídrico.
- Se deberá evitar la contaminación de aceite para eliminar problemas de emulsión. En tal caso se diseñara un recipiente adecuado para separar aceite.

- La concentración de amoníaco en fondos parece ser superior en la práctica que en la calculada en forma teórica, por encima de un caudal determinado de vapor de stripping. Además la cantidad de amoníaco desorbido puede ser menor debido al dióxido de carbono.
- El pH de la alimentación no suele ser el correspondiente a disoluciones puras de ácido sulfhídrico y amoníaco. Si es bajo, la eliminación del amoníaco se retarda, mientras que se favorece la de ácido sulfhídrico. Si el pH es alto, se favorece la eliminación del amoníaco y se retarda la del ácido. Se debe procurar que la alimentación este en un pH próximo a 9, añadiendo sosa si es necesario. Si se hace en la columna, se debe hacer en platos alejados de la alimentación para evitar que se produzcan reacciones indeseables entre sosa y sulfhídrico.
- Para el diseño de la columna, calculo de las etapas necesarias y resolución del problema en general, se hace necesario la división de la columna de stripping en dos secciones. Una que abarca desde el primer plato hasta el plato en el que se tiene la extracción lateral y una segunda, que va desde el plato de alimentación hasta fondo de columna. Por ello, a partir de ahora, la nomenclatura en este sentido que se sigue en todo el proyecto responde a:

Platos 1-7: Columna 1

Platos 8-30: Columna 2

En el Anexo de la Memoria descriptiva se puede ver un esquema de la solución adoptada para el cálculo de la columna.

### 10.3 Materiales

La elección de materiales para strippers de aguas ácidas depende del tipo de operación de la unidad. Las unidades que operan sin reflujo presentan pocos problemas de corrosión, mientras que las que tienen reflujo suelen presentar mayores problemas.

La menor corrosión en los procesos sin reflujo, se debe a que la concentración de sulfhídrico y amoníaco en cabeza es inferior a la de un stripper con reflujo, así como la condensación parcial de los vapores de cabeza de la columna. Es por tanto importante

que la columna se encuentre correctamente aislada, porque de no ser así, habría zonas donde se produciría condensación y por tanto, corrosión.

Cuando se emplea un reflujo, se realiza para acondicionar los vapores de cabeza a posteriores procesos, reduciendo el contenido en agua. Las condiciones de la cabeza de la columna y en el sistema de reflujo son muy críticas y se requiere de especial protección para combatir la corrosión. Para el condensador que se emplee, se debe utilizar acero inoxidable.

En el caso de este proyecto, se deben tener en cuenta condiciones de las opciones. Estamos ante una salida de cabeza del stripper que va directamente al resto de equipos en las condiciones necesarias, pero también se tiene una extracción lateral que sufrirá un proceso de condensación con lo que es necesario cuidar esta línea por su alta probabilidad de corrosión, tal como si de un reflujo se tratase.

Es de vital importancia, la calorifugación de esta línea de cabeza para evitar condensaciones de ácido sulfhídrico antes del aerorefrigerante. Por motivos de corrosión, el material empleado para todos los internos es acero inoxidable.

Por factores económicos y debido a la dimensión de la torre, la columna se construirá de acero al carbono calmado (con un sobreespesor de corrosión de 6 mm.). Si toda la torre fuera de acero inoxidable, el precio sería demasiado elevado. De todas formas, la zona media-baja de la columna, no sufre la misma corrosión puesto que amoniaco y sulfhídrico ya han sido casi eliminados.

Para prevenir la mayor corrosión que se da en la parte alta de la columna debido al ácido, se recubre la zona comprendida entre los platos previos a la entrada de la alimentación, y los 5 siguientes a esta, con una capa de acero inoxidable LINING 304L (con menos carbono). En total, los platos serían los comprendidos entre la cabeza de columna (plato 1), y el plato número 12, ambos incluidos.

#### 10.4 Descripción del stripper

Las dimensiones del equipo son:

- Diámetro interior del recipiente: 1 m
- Longitud del recipiente: 22,1 m

##### 10.4.1 Tubuladuras y conexiones

Las conexiones de este equipo fueron calculadas para un diámetro interior de 1 m. Se recuerda que la numeración de los platos es desde el plato número uno colocado en la parte superior de la torre hasta el plato número 30 colocado en fondos. Las conexiones y sus dimensiones son las que se enumeran a continuación:

###### 10.4.1.1 Boca de hombre

Con el fin de facilitar la limpieza del stripper, este tendrá 4 bocas de hombre. El diámetro será de 24". Se sitúan en los siguientes puntos:

- Por encima del primer plato
- Entre el plato 10 y 11
- Entre el plato 20 y 21
- Por debajo del último plato a la altura de la entrada de vapor.

###### 10.4.1.2 Conexiones de entrada y salida de fluido

Las conexiones de entrada y salida del fluido son múltiples y se enumeran a continuación junto con su ubicación según los cálculos:

- Alimentación: Entrada en plato número 8

- Gas de cabeza: Salida por la parte superior del casco
- Extracción lateral: Salida de vapor en el plato número 7
- Entrada de reflujo: Entrada al plato número uno.
- Agua desorbida: Salida por el fondo inferior
- Agua a reboiler: Salida de rebosadero del plato número 30.
- Vapor de stripping: Entrada a 910 mm. por debajo del plato 30.

Los diámetros nominales de las conexiones son los mismos que los de las líneas a los que están conectadas a menos que se indique lo contrario.

#### 10.4.1.3 Drenaje

El stripper dispondrá de un drenaje de 2" de diámetro y se encontrará situado en la parte inferior de la columna, según se puede apreciar en el Anexo correspondiente.

#### 10.4.1.4 Venteo

El stripper dispondrá de un venteo de 2" según queda reflejado en el reglamento de aparatos a presión. Se encontrará situado en el casco superior del stripper.

#### 10.4.1.5 Adición de sosa

La entrada de la inyección de pequeños caudales de sosa se realiza de forma muy controlada dependiendo del pH y las condiciones de la corriente de alimentación. Se sitúan por debajo de la entrada de la alimentación para evitar que reaccione con el ácido que esta contiene. Se sitúan en los platos número 11 y 17.

#### 10.4.1.6 Tomas de nivel

El stripper de aguas ácidas, dispondrá de unas tubuladuras donde se colocarán los instrumentos de control, utilizados para medir el nivel de líquido en el recipiente. Se conocen como tomas de nivel. Se distribuyen a lo largo de la sección inferior de la columna por debajo del último plato. En concreto, se instala uno para el mayor nivel de líquido y otro para el menor nivel de líquido permitido.

Las conexiones del stripper se pueden observar en la figura representada en el Anexo 0.3.

#### 10.4.2 Características de las conexiones

Las conexiones se realizan embridadas, ya que permiten su montaje y desmontaje sin tener que realizar ningún corte ni soldadura. Las diversas partes que conforman la conexión embridada se muestran a continuación:

- Tubuladura: Tronco cilíndrico que se suelda al recipiente y a la brida. Estará construida de tubería, en cada caso el diámetro es el especificado en los cálculos siempre dentro de los normalizados. Se emplea la normativa americana ANSI B-36.10
- Placas de refuerzo: Para realizar una conexión debe practicarse un agujero en el recipiente, lo que se significa que se elimina parte de la pared resistente y por lo que precisa compensar esta eliminación con un aporte de material resistente en igual cantidad (sección) a la eliminada. Esta misión es la que cumple la placa de refuerzo.
- Bridas: Las bridas utilizadas se encuentran normalizadas por la norma ANSI B-16.5. Para definir las, es necesario indicar el material, el diámetro nominal, la serie a la que pertenece, el tipo de brida y la forma de la cara del asiento. En este equipo se usan bridas de 150 Lb (150#) de cuello soldable (welding neck) y cara con resalte (raised face).

- Pernos y tuercas: Los pernos o tirantes aprietan las bridas entre sí para que deformen a las juntas y así se garantice su estanqueidad. El tamaño y número de pernos viene definido por la brida y por lo tanto, debe fijarse solamente el material para complementar su definición. Como los diámetros de los pernos usados para las distintas bridas de las diferentes conexiones existentes en este equipo no superan en ningún caso un diámetro de 1", estos quedarán fijados por la norma ANSI B-1.1 serie U.N.C.

#### 10.4.3 Espesor

Se ha calculado un espesor para la virola y los fondos del stripper de 12,7 mm. Los fondos empleados son de tipo toriesféricos utilizados para equipos que operen a bajas presiones.

En el presente proyecto, se toma un mismo valor para la virola y fondos, una vez calculado los espesores mínimos y los reales con sus sobreespesores de corrosión. Este espesor es de ½" (12,7 mm.)

#### 10.4.4 Soporte

Lo más adecuado para columnas de este tamaño es emplear soportes de tipo faldón o "skirt", y será por tanto, los que se empleen en este diseño. Consisten en una carcasa cilíndrica o cónica soldada a la base del recipiente. Esta carcasa esta anclada en los cimientos de la columna. Los dos tipos de soportes skirt, se muestran en la imagen. Están especialmente diseñados para soportar cargas de viento, importantes en el diseño de las columnas de mucha altura.

El diseño de los faldones, queda fuera del alcance del proyecto, si bien, se elige el tipo, como ya se ha acordado, y la altura a la que se eleva la columna del suelo. Este valor vendrá marcado por el diseño conjunto del fondo del stripper y el reboiler. Se estima una distancia de 4,5 m desde el suelo hasta la línea de tangencia inferior.

Esta elevación junto con la distancia entre el fondo del stripper y la entrada del vapor del reboiler, son necesarias para mantener la hidráulica del termosifón diseñado.

Un esquema de la forma de los faldones que se emplean en la columna se pueden observar en el Anexo 0.4.

### 10.5 Diseño de los platos

Los platos teóricos del stripper coinciden con los equilibrios establecidos para la columna. Los platos reales de estos equipos suelen tener una eficacia baja, comprendida entre el 40-60%. En el stripper proyectado se ha considerado una eficacia del 50%, donde un plato teórico equivale a dos platos reales. Por tanto, se estiman necesarios 30 platos reales para el stripper. Se supone inicialmente una pérdida de carga de 0,017 Kg/cm<sup>2</sup> por plato. En el diseño de los platos, se ha calculado la pérdida de carga obteniéndose un valor acorde con el supuesto.

Los platos de la columna no serán exactamente iguales en cada sección. En la parte superior al plato de alimentación, tendrán unas características y por debajo de este, tendrán otras. Prácticamente coinciden en todas las variables. Se ha optado por utilizar platos del mismo diámetro en las dos secciones, lo que equivale a variar el paso de orificio en una de las columnas para mantener un flujo de vapor y un intercambio de materia adecuado.

El resto de variables calculadas serán las mismas (distancia entre platos, tipo de distribución de los orificios, espesor de plato, etc). Se tomará como modelo de referencia en cada sección, el plato superior que es el que sufre las condiciones más desfavorables al descargarse el líquido.

#### 10.5.1 Descripción de los platos

Los platos generalmente, están hechos de hojas metálicas y, si es necesario, de aleaciones especiales, como es el caso de este diseño que será de acero inoxidable ya

que los fluidos son altamente corrosivos. Los platos deben unirse a la cubierta, con el fin de prevenir el movimiento debido a oleadas de gas. Los platos deberán tener entradas para personas de forma que un hombre pueda trepar de un plato a otro para reparaciones o limpieza. Los platos deben instalarse de forma nivelada dentro de un rango de 6 mm, para favorecer una buena distribución de líquido.

A continuación se describen algunas de las variables necesarias en el diseño de los platos.

#### 10.5.1.1 Diámetro de la torre

El diámetro de la torre, y por tanto, su área transversal, debe ser lo suficientemente grande para manejar el flujo de gas y del líquido dentro de la región óptima de operación

#### 10.5.1.2 Espaciamiento entre platos

El peso final de la columna va a depender del espaciado de los platos. Este esta normalizado y se mueve en valores desde 0,15 hasta 1 m. Espaciados pequeños se eligen para pequeños diámetros de columna. En columnas con diámetros de 1 m, el espaciado se mueve entre 0,3 y 0,6 m.

En este caso, elegimos un valor estandarizado, común en la industria petrolífera, donde el espaciado será 0,61 m. Posteriormente debe verificarse para evitar cualquier inundación y arrastre excesivo del líquido o gas.

#### 10.5.1.3 Vertederos

El líquido se lleva de un plato a otro a través de los vertederos. Estos pueden ser tuberías circulares, simples cortes de la sección transversal del plato cortada para que el fluido fluya por los platos verticales. Puesto que el líquido se agita hasta formar una

espuma sobre el plato, debe permitirse que permanezca un tiempo adecuado en el vertedero para permitir que el gas se separe del líquido, de tal forma que solo entre líquido limpio al siguiente plato. El vertedero debe colocarse lo suficientemente cerca del plato inferior como para que se una al líquido de ese plato, para evitar que el gas ascienda por el vertedero acortando camino hacia el plato superior.

#### 10.5.1.4 Derramaderos

La profundidad del líquido sobre el plato, requerida para el contacto con el gas, se mantiene mediante un derramadero, que puede ser o no una continuación del plato de descenso. Los derramaderos rectos son los más empleados y son los que se emplean en este caso. Con el fin de asegurar una distribución razonable uniforme del flujo del líquido de un plato de un paso se utiliza un diámetro de derramadero de 60 a 80% del diámetro de la torre.

Se puede observar un esquema de la disposición de los vertederos y derramaderos y de la distribución del fluido en ellos, en los Anexos 0.5 – 0.6.

#### 10.5.2 Dimensionamiento de los platos

Seguidamente, se muestran los distintos valores empleados para el dimensionamiento de los platos.

Se parten de las siguientes condiciones de diseño:

- Diámetro de los orificios del plato: 4,5 mm.
- Distribución de los orificios en forma de triángulo equilátero
- Hoja de acero inoxidable de 3 mm de espesor
- Distancia entre platos: 610 mm.
- Altura de derramadero: 50 mm.

A partir de estas variables de diseño, y con los cálculos obtenidos en el diseño de platos de la memoria de cálculo se obtienen los parámetros que definen a los platos del stripper proyectado. A continuación se muestran dichos parámetros:

Propiedad	Unidades	Columna 1	Columna 2
		1-7 plato	8-30 platos
Area total	m <sup>2</sup>	0,785	0,785
Area neta	m <sup>2</sup>	0,688	0,688
Diámetro	m.	1	1
Longitud vertedero	m.	0,7	0,7
Area vertedero	m <sup>2</sup>	0,069	0,069
Area activa	m <sup>2</sup>	0,425	0,425
Pitch	mm.	35	12

### 10.5.3 Caída de presión en el gas

En el cálculo de la caída de presión total del plato, se incluyen los siguientes términos dentro de la expresión:

$$h_T = h_D + (\max h_{ow} + h_w) + h_r$$

Donde:

- $h_t$  : Caída de presión total
- $h_D$  : Caída de presión en plato seco
- $h_{ow}$  : Caída de presión por cresta en vertedero
- $h_w$  : Altura del vertedero
- $h_r$  : Caída de presión residual

Propiedad	Unidades	Columna 1	Columna 2
		1-7 plato	8-30 platos
$\Delta P$ Gas	mm.	126	135
$\Delta P$ Plato seco	mm.	54,6	36,6
$\Delta P$ Cresta vert.	mm.	6,8	35,7
$\Delta P$ Residual	mm.	50	50
Altura vertedero	mm.	15	13,2

El valor obtenido de la pérdida de carga total del gas cumple con el requisito inicial supuesto de  $0,017 \text{ Kg/cm}^2$  ya que es similar o menor a la estipulada.

#### 10.5.4 Verificación del diseño del plato

Una vez descrita y obtenidas las principales variables para el dimensionamiento de un plato, se debe comprobar que no se produce inundación, arrastre ni lloriqueo para que de este modo se asegure unas condiciones óptimas de operación.

Se muestran a continuación, los valores obtenidos en la memoria de cálculo de forma justificada.

##### 10.5.4.1 Verificación de la inundación del plato

Este parámetro sirve para comprobar que la distancia entre platos tomada es lo suficientemente grande como para que no se produzca inundación en el plato. Se debe cumplir que:

$$h_b + h_w < \frac{t_p}{2}$$

Donde:

$h_b$  : Retroceso en el vertedero

$h_w$  : Altura del vertedero;  $h_w = 0,05$  mm

$t_p$  : Distancia entre platos;  $t_p = 0,61$

Columna 1:

$$h_b = 0,182 \text{ mm.}$$

$$0,182 + 0,050 < \frac{0,61}{2}$$

$$\mathbf{0,187 < 0,305}$$

Columna 2:

$$h_b = 0,232 \text{ mm.}$$

$$0,232 + 0,050 < \frac{0,61}{2}$$

$$\mathbf{0,237 < 0,305}$$

Se cumple la condición por lo que la distancia de platos es correcta y no se produce inundación en el plato en ninguno de los dos casos. El vapor no subirá por el bajante, de forma que desplace al líquido al plato superior.

#### 10.5.4.2 Verificación del arrastre del líquido

Esto ocurre cuando el líquido es arrastrado por el gas hacia el plato superior, el líquido que es atrapado por el líquido del plato superior. Este efecto es acumulativo y las cargas del líquido en los platos superiores de la torre pueden llegar a ser excesivas.

La forma en que se cuantifica este parámetro es la fracción del líquido que entra en un plato y es arrastrado hacia el plato superior. Para ello se emplea la gráfica incluida en el Anexo 2.6.

El resultado obtenido en los dos casos es una fracción por debajo de 0,01 es decir solo un % de la fracción líquida es arrastrada hacia el plato superior.

Por lo que al ser la retroalimentación del líquido tan pequeña, la hidráulica del plato no se modifica.

#### 10.5.4.3 Verificación del lloriqueo

El menor rango de operación tiene lugar cuando el líquido que gotea a través de los orificios del plato llega a ser excesivo. Es lo que se conoce como velocidad de lloriqueo. En este punto, la velocidad del vapor es la mínima para que la operación se mantenga estable. El área de orificios debe ser elegida de modo que la velocidad mínima del gas a través de los orificios siga siendo mayor en todo momento que la velocidad de lloriqueo.

Para el cálculo de la velocidad de lloriqueo se emplea la siguiente expresión:

$$V_h(\text{min}) = \frac{[k_2 - 0,9 \cdot (25,4 - d_o)]}{\rho_v^{1/2}}$$

El valor mínimo de velocidad del gas en la columna, se estima en un 70% del valor máximo del caudal volumétrico.

La comparación entre estos dos parámetros en las dos secciones es la siguiente:

Propiedad	Unidades	Columna 1	Columna 2
		1-7 plato	8-30 platos
Lloriqueo	m/s	12,18	15,38
V. actual	m/s	15,3	17,3

En los dos casos la velocidad del gas en la columna es mayor que la velocidad de lloriqueo. Se demuestra así que los platos están diseñados correctamente y pueden operar en condiciones satisfactorias de operación.

### 10.5.5 Tipos de platos

Los platos de flujo cruzado son los más comunes dentro de los tipos de platos de contacto utilizados en las columnas de destilación y absorción. En estos tipos, el líquido atraviesa el plato desbordándolo por los vertederos de los que consta, y el vapor asciende a través de pequeños orificios perforados en el plato, permitiendo el contacto entre ambos fluidos. Ver figura:

Los tres principales tipos de platos de flujo cruzado se clasifican según el método de contacto líquido-vapor:

#### *1. Plato perforado*

Es el más simple de los tres. El vapor atraviesa las perforaciones del plato y el líquido es retenido en el plato por el flujo de vapor. No hay ningún tipo de cierre y un bajo caudal de vapor puede hacer que se produzca lloriqueo a través de los orificios reduciendo la eficiencia del plato. Las perforaciones son normalmente pequeños agujeros.

#### *2. Platos de tipo campana de borboteo*

En estos, el vapor pasa a través de pequeñas tuberías denominadas sumideros, cubiertas con una campana de borde serrado o con slots. Es el más antiguo de los tres y

por ello, hay muchos diseños desarrollados de este tipo. La novedad es que las campanas aseguran que el nivel de líquido se mantiene en el plato para todos los caudales de vapor.

### *3. Platos de válvula*

Son esencialmente platos perforados con orificios de gran diámetro cubiertos por una tapa móvil, la cual permite que el flujo de vapor incremente.

Como el área de flujo de vapor varía con este flujo, los platos de válvula pueden operar eficientemente a menores caudales que los platos perforados. A caudales muy bajos, las válvulas se cierran.

#### 10.5.5.1 Selección del tipo de plato

Se recogen a continuación los principales factores de selección:

- Coste: Los platos de campana son los más caros. El coste relativo dependerá del material de construcción utilizado.
- Capacidad: Hay poca diferencia en la capacidad de los tres tipos (el diámetro de la columna viene dado para un caudal dado). El orden de mayor a menor es: perforado, válvula, campana.
- Rango de operación: Es el factor más significativo. Se refiere a los rangos de líquido y vapor en los cuales el plato opera satisfactoriamente. Se necesita cierta flexibilidad a la hora de diseñar una planta debido a cambios en el caudal de producción, condiciones de arranque, de parada, etc. El rango desde los mayores a los menores caudales posibles se conoce como “turn-down”. Los platos de campana tienen sellado para líquidos pueden trabajar además a bajos caudales de vapor. Los perforados dependen del caudal de vapor para mantener el líquido en el plato y no pueden operar por debajo de estos valores. Pero con un buen diseño, los platos perforados pueden dar buenos rangos de operación: desde el 50 al

120% de la capacidad de diseño. Por su parte los platos de válvula están en un lugar intermedio donde dan mayor flexibilidad que los perforados pero a precios más baratos que los de campana.

- Eficiencia: La eficiencia de los tres tipos es prácticamente la misma cuando operan bajo sus condiciones de diseño y no hay grandes distinciones.
- Caída de presión: Es un factor importante en el diseño de columnas, especialmente a vacío. La caída de presión del plato dependerá del diseño del plato, aunque en general, los perforados tienen la menor pérdida seguidos de los de válvulas y siendo los de campana los de mayor caída.

En general, los platos perforados son los más baratos y satisfactorios para muchas aplicaciones. Los de válvula se consideran si no se es capaz de encontrar el “turn-down” con los perforados. Y los de campana solo se usan para platos con pequeños caudales de vapor. Por tanto, en este proyecto, se considerarán platos de tipo válvula que dan una mayor versatilidad en lo que a caudales y pérdidas de presión se refiere. Se puede observar un esquema en el Anexo 0.7.

#### 10.5.6 Consideraciones de los orificios de platos

Las perforaciones de los platos son una variable a tener muy en cuenta y por tanto, se adjuntan una serie de consideraciones para su diseño:

No deben de tener diámetros menores a 1/8” ni superiores a 1”. Existen valores industriales normalizados entre los que se pueden elegir los más adecuados para el diseño.

El espesor de la bandeja perforada, es función del diseño mecánico del plato y del tipo de material de construcción, siendo las más frecuentes las de acero al carbono, acero inoxidable y aleaciones de cobre. Ya que el agua ácida tiene un alto poder de corrosión, se elegirá acero inoxidable.

El espesor de la bandeja esta relacionado con el diámetro de la torre, de forma que no se produzca arqueo en el plato al aumentar el diámetro. Si el diámetro es muy grande, es posible instalar soportes transversales para los platos de forma que se disminuye el espesor. El espesor elegido para los platos del proyecto es de 3 mm (valor normalizado).

Existirán zonas del plato que no estarán perforadas. Se utilizan como zonas de calma (antiespumantes), y para evitar que se produzcan interferencias en el burbujeo del vapor.

Las zonas sin perforar son las siguientes:

- Zona de desprendimiento de vapor: zona que deja a la salida del plato.
- Zona de distribución: zona que se deja a la entrada del plato para producir una buena distribución de líquido.
- Zona sin perforar periférica: para poder colocar los soportes del plato con la carcasa de la columna y que estos no produzcan interferencias en el burbujeo del vapor.

Estas zonas son desde luego, áreas desaprovechadas para el intercambio de materia entre líquido y vapor ya que se produce menor burbujeo. Por tanto, es un objetivo, el minimizarlas al máximo con tal de no perder superficie activa en el plato. En el Anexo 0.8 se puede ver un dibujo de las zonas de un plato perforado, de forma orientativa.

## **11. DESCRIPCIÓN DEL PRECALENTADOR DE CARGA**

El objetivo del precalentador de carga es el de calentar la corriente de entrada de aguas ácidas al stripper, que viene más fría, aprovechando la corriente de salida de agua strippada proveniente del stripper de aguas ácidas que viene más caliente. Con este precalentamiento se favorecerá la desorción del ácido sulfhídrico y del amoníaco.

### **11.1 Tipo de cambiadores de calor**

Las distintas alternativas para intercambiar calor entre dos corrientes son:

- Intercambiador de carcasa y tubos (shell and tube): Es el más empleado en la industria del petróleo por su gran versatilidad que permite adaptar el diseño para transmitir el calor deseado con pérdidas de carga aceptable para multitud de fluidos diferentes.
- Tubos en espiral (spiral bound): Consiste en serpentines enrollados en forma espiral dentro de una envolvente y están indicados para cantidades de calor moderadas y líquidos viscosos.
- Doble tubo (double pipe): Consiste en un tubo interior recto (o varios tubos en cuyo caso se denominan multitubos) o en U por el que circula uno de los fluidos y otro externo y concéntrico con el anterior por el que circula el otro fluido. Su configuración es de flujo en contracorriente lo que permite conseguir buenas diferencias de temperatura en las corrientes de salida. Permiten fácil limpieza al no estar el tubo interior aleteado.
- Serpentines en recipientes: Se utilizan para calentar tanques o fondos de columnas de destilación. Consisten en tubos lisos o aleteados normalmente en U por el que circula el fluido calefactor y transmite el calor con convección libre.

- Intercambiadores de placas: Consiste en un conjunto de placas rectas que se acoplan paralelamente mediante juntas elastómeras. Las placas llevan estampados unos canales para crear turbulencia a los fluidos que circulan en contracorriente cada uno por un lado de la placa. El conjunto de placas está unido mediante un bastidor.
  
- Intercambiadores de placas aleteadas (platea and fin): Consisten en placas, generalmente de aluminio, que forman canales paralelos contiguos por los que circulan los distintos fluidos.

### 11.2 Elección del cambiador

Para proceder a la elección del tipo de cambiador se adjunta en los Anexos un gráfico con el criterio de selección elegido.

El cambiador de doble tubo es el primero en quedar descartado ya que la superficie necesaria para llevar a cabo el proceso de transferencia de calor para precalentar la carga no es muy pequeña.

El siguiente equipo descartado es el cambiador de tubos en U ya que se va a considerar que el fluido que circula por los tubos no es limpio. Contiene partes por millón de ácido sulfhídrico y amoníaco que son compuestos corrosivos. Además la presión en los tubos no es muy alta (condición necesaria para este tipo).

El último equipo descartado es el cambiador de placas tubulares fijas ya que al igual que antes se considerará al fluido que circula por carcasa como un fluido sucio y corrosivo y además la presión del fluido no es alta.

Por consiguiente, el tipo de cambiador que se emplea es el intercambiador de carcasa y tubos. Además este es el equipo más empleado para el intercambio de calor en la industria petroquímica.

### 11.3 Descripción general de un intercambiador de calor

Un intercambiador de calor de carcasa y tubo se divide principalmente en 3 partes fundamentales:

- Haz tubular
- Distribuidor
- Carcasa

#### 11.3.1 Haz tubular

El haz de tubos es la parte más importante de un intercambiador de calor tubular. En general los tubos constituyen el componente más costoso del intercambiador y el que se corroe con mayor facilidad. El haz esta compuesto por un número de tubos unidos a dos placas tubulares perpendiculares a ellos y colocados de forma regular. Se completa con deflectores o placas de soporte, tirantes y comúnmente, espaciadores.

##### 11.3.1.1 Placas tubulares:

Las placas tubulares que mantienen unidos los tubos tienen también como misión mantener separados los dos fluidos que llevan a cabo el intercambio. En todos los intercambiadores se observan dos placas tubulares, excepto en el caso de tubos en “U”. Deben ser de características idénticas y diseñadas según el fluido más corrosivo. Así pues, tendrán igual espesor, material y distribución de tubos.

La distancia entre tubos adyacentes (entre centros), se denomina paso de tubos o pitch. Esta distancia no puede ser demasiado pequeña puesto que se debilita la placa tubular. Su valor es al menos 1,25 el valor del diámetro exterior de tubos. La distribución puede ser triangular, cuadrada o en cualquiera de los dos casos de forma rotada. La disposición triangular mejora el intercambio y admite un 15% más de tubos pero no permite la limpieza mecánica de los tubos por lo que se emplea en fluidos

limpios. La disposición cuadrada si permite la limpieza exterior al ser los tubos más accesibles y tiene menor caída de presión.

A continuación se presentan los valores de pitch más comunes y las disposiciones que pueden adoptar los tubos.

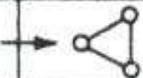
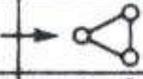
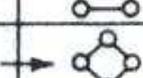
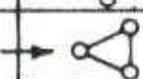
Diám. ext. de tubo, $D_o$ in.	Espaciamiento $p'$ in.	Config.	$p_p$ in.	$p_m$ in.
0.625	0.812		0.704	0.406
0.750	0.938		0.814	0.469
0.750	1		1.000	1.000
0.750	1		0.707	0.707
0.750	1		0.866	0.500
1.000	1.250		1.250	1.250
1.000	1.250		0.884	0.884
1.000	1.250		1.082	0.625

Figura 11.1: Valores y configuraciones de paso de tubo ( $p'$ )

### 11.3.1.2 Tubos

Los tubos utilizados en intercambiadores de haz tubular son cilíndricos. El diámetro de dichos tubos es el diámetro real dentro de tolerancias muy estrictas. El espesor de pared de tubo, se representa por valores normalizados de BWG y debe ser suficiente para soportar las presiones y temperaturas de diseño.

La longitud del tubo también suele estar normalizada, pero puede ser cualquiera, aunque se tiende a mantener la uniformidad dentro de la planta. Los más usados son 16, 20, 24 ft, y múltiplos.

### 11.3.1.3 Deflectores

El soporte inmediato de los tubos se hace mediante chapas perpendiculares a los mismos espaciadas regularmente y denominadas deflectores o baffles. El espaciamiento mínimo de baffles es de 1/5 el diámetro de la carcasa. El espaciamiento máximo está limitado por el requisito de que se proporcione un soporte adecuado a los tubos.

Se dispone de deflectores con fines de transmisión de calor. Cuando no se requieren deflectores del lado de la carcasa con este fin, como ocurre en el caso del reboiler, se instalan soportes de tubos. Se puede observar en el Anexo 0.10 un esquema de un intercambiador donde se observa la función de estos baffles o deflectores.

A parte de soportar los tubos, los deflectores cumplen otra misión, conduciendo el flujo del fluido de carcasa por recorridos transversales y longitudinales que creen turbulencia y mejoren el proceso de intercambio de calor.

### 11.3.1.4 Unión tubo-placa tubular

Esta unión, que puede ser de distintos tipos, debe impedir el paso de los fluidos de forma que se contaminen, y debe ser lo suficientemente fuerte como para soportar las fuerzas debidas al paso de los tubos y la dilatación térmica. Para su elección, se debe tener en cuenta el material de las placas y de los tubos.

### 11.3.2 Carcasa

Es el cilindro externo que envuelve el haz tubular. Los intercambiadores de calor tienen un único diámetro nominal de carcasa, excepto los reboilers tipo Kettle que tienen dos correspondientes al haz y la envolvente.

La configuración de la carcasa puede ser de un solo paso (muy común), de dos pasos (con un deflector longitudinal) y que mejora la eficacia térmica; o de flujo dividido, donde el deflector longitudinal puede ser sólido o encontrarse perforado.

El fondo de la carcasa es la tapa del lado contrario al distribuidor. Hay algunos tipos de intercambiadores donde no existe este elemento como tal.

### 11.3.3 Distribuidor

Es la parte por la que entra el fluido que deje pasar por el interior de los tubos, encaminándolos por los diferentes pasos de los mismos hasta que sale del intercambiador. Hay que señalar también que el distribuidor es donde se encuentran las chapas de partición que dividen la superficie en distintas secciones incomunicadas entre si.

### 11.4 Diseño del cambiador

El diseño del intercambiador se realizará según el código TEMA (Tubular Exchangers Manufactures Association). Dentro de la norma TEMA hay tres clases de estándar mecánico: clase R, clase C, clase B. La clase R es la que se aplicará al precalentador de carga, ya que ésta es aplicable a servicios con características severas de operación y mantenimiento y es la clase que se suele emplear en la industria del petróleo dado que satisface la máxima exigencia de sus servicios.

Se define según el código TEMA, por tres letras que describen por orden el tipo de cabezal distribuidor, carcasa y cabezal de salida o retorno (Anexo 0.11).

#### 11.4.1 Tipo de distribuidor

*A: Canal y carcasa desmontables*

Distribuidor con tapa desmontable para acceso a los tubos para su limpieza. Haz extraíble con cabezales flotantes en el otro extremo.

*B: Casquete (carcasa integrada)*

Se desmonta el distribuidor para acceso a los tubos (requiere desconexión de las tuberías de entrada y salida atornilladas al distribuidor). Más caro que el tipo A pero útil como alternativa para presiones elevadas y servicios que no requieran limpieza por carcasa frecuente (por ejemplo para vapores). Haz extraíble con cabezales flotantes en el otro extremo. Junto al tipo A, son los más usados.

*C: Canal integrado con panel de tubos y carcasa desmontable*

Distribuidor con placa tubular en una pieza. Se accede a los tubos por tapas desmontables. Es más económico que el tipo A pero requiere mayor espacio para la extracción del haz tubular en caso de cabezal flotante en otro extremo.

*D: Cierre especial para alta presión*11.4.2 Tipo de carcasa

*E: Carcasa de un paso.* Es el tipo más empleado.

*F: Dos pasos por carcasa con placa longitudinal*

Permite en un solo equipo conseguir mejor “approach” de temperatura (diferencia de temperatura entre el fluido frío y caliente a la salida del intercambiador), evitando el cruce de temperatura. La integridad del cierre de la placa longitudinal limita la pérdida de carga del equipo a  $0,5 \text{ Kg/cm}^2$ .

*G, H, J:* No llevan “baffles” transversales para aumentar el recorrido y velocidad por el interior de la carcasa y por tanto están pensados para servicios con muy poca pérdida de carga y en los que la baja velocidad del fluido no afecta significativamente al coeficiente de transmisión de calor del lado de la carcasa. Es el caso de vaporizadores por circulación natural tipo termosifón o condensadores de columnas de destilación. Se distinguen en la división del flujo.

*K: Tipo "Kettle"*

Se emplea solo en vaporizadores. La carcasa tiene dos diámetros, uno menor en la entrada del haz tubular adaptado al diámetro de éste y otro mayor que permite disponer de una zona de separación L/V.

11.4.3 Tipo de cabezales de salida

*L, M, N:* La placa tubular esta fija (solidaria a la carcasa) y por tanto no permiten la extracción del haz tubular. Son similares a los tipos de distribuidor A, B, N.

*P: Cabezal flotante con cierre a la carcasa mediante prensaestopas*

Permite un solo paso por el lado de los tubos (algo realmente poco habitual por los problemas de dilatación que conlleva), situando la salida en la tapa desmontable. Suele emplearse solo con fluidos que no presenten peligro ante fugas.

*S: Placa tubular flotante*

Requiere desmontar el cabezal para la extracción del haz tubular desde el extremo del distribuidor. Es el más empleado.

*T:* Placa tubular flotante, similar al tipo S pero más caro porque el diámetro de la carcasa es mayor para el mismo tamaño del haz tubular pero permite su extracción sin desmontar el cabezal de retorno.

*U:* No es un cabezal sino el propio haz tubular con tubos en U el que hace de dispositivo de retorno de fluidos.

*W:* Similar al P pero permite colocar la tubuladura de salida, no en la tapa, sino en sentido radial con ventajas de espacio, etc.

Se puede ver un resumen de esta clasificación en los Anexos.

### 11.5 Características del precalentador de carga

Según normas del código TEMA, la clasificación en tres partes fundamentales queda como sigue:

- Se elige una carcasa de tipo F: Dos pasos por carcasa con placa longitudinal.

Debido a que la temperatura de salida del fluido que atraviesa la carcasa ( $T_2=60^\circ\text{C}$ ) es menor que la del fluido que pasa por los tubos ( $t_2=95^\circ\text{C}$ ), se empleará una carcasa tipo F de dos pasos por carcasa. Esto permite conseguir mejor approach evitando el cruce de temperaturas. La integridad del cierre de la placa longitudinal limita la pérdida de carga del equipo a  $0,5 \text{ Kg/cm}^2$ .

- Se elige un distribuidor de tipo A: Distribuidor con tapa desmontable.

Para un mejor acceso a la hora de la limpieza se dispondrá de un cabezal tipo A, el cual nos permite extraer el haz tubular y facilita su mantenimiento.

- Se elige un cabezal de salida tipo S: Placa tubular flotante.

Acorde al tipo de distribuidor elegido (tipo A), se escoge un cabezal tipo S, que es el que mejor se complementa con el distribuidor de tipo A y es el más empleado. Requiere desmontar el cabezal para la extracción del haz tubular desde el extremo del distribuidor.

El intercambiador será del tipo “AFS” según código TEMA.

El área de intercambio es de  $141 \text{ m}^2$  para lo que se dispone de un intercambiador de dos pasos por carcasa y cuatro pasos por tubos, con 402 tubos. El diámetro de carcasa será de 26” y el material de fabricación será acero al carbono.

El diámetro del haz tubular es de 0,512 m. Los tubos son de 20 ft de longitud y  $\frac{3}{4}$ ” de diámetro exterior. Tienen un espesor BWG de 14, paso cuadrado y 1” de pitch.

La corriente que circula por tubos es el agua ácida sin tratar que entra a 40°C y sale a 95°C. Por carcasa circula el agua desorbida, entrando a 110°C y saliendo a 60°C. No existe cambio de fase.

En el siguiente cuadro resumen se exponen las características más importantes del intercambiador que funciona como precalentador de la carga de aguas ácidas:

<b>PRECALENTADOR DE CARGA</b>					
<b>Servicio:</b>		Precalentar la alimentación del stripper de aguas ácidas			
<b>Tipo / TEMA</b>		Intercambiador carcasa y tubos / AFS			
<b>Calor transferido</b>		KJ/h	5055737,5		
<b>LMTD</b>		°C	10,42		
<b>U (Servicio / Limpio)</b>		Kcal/h.°C.m <sup>2</sup>	490 / 791		
<b>Área de transferencia de calor</b>		m <sup>2</sup>	141		
<b>DISEÑO TÉRMICO</b>					
<b>Lado</b>		<b>TUBOS</b>		<b>CARCASA</b>	
<b>Fluido</b>		Agua agotada de fondo		Aguas ácidas	
<b>Localización</b>		Entrada	Salida	Entrada	Salida
<b>Caudal total</b>	Kg/h	22150	22150	21852	21852
<b>Vapor</b>	Kg/h	-	-	-	-
<b>Líquido</b>	Kg/h	22150	22150	21852	21852
<b>Temperatura</b>	°C	40	95	110	60
<b>Pérdida carga</b>	Kg/cm <sup>2</sup>	0,084		0,194	
<b>Factor ensuciamiento</b>	h.m <sup>2</sup> .°C/Kcal	0,0004		0,0004	
<b>DATOS DE CONSTRUCCIÓN</b>					
<b>Tubos</b>	<b>Diámetro externo</b>		3/4"	<b>BWG</b>	14
	<b>Longitud de tubos</b>		20 ft	<b>Nº tubos</b>	402
	<b>Pitch</b>	Cuadrado	1"	<b>Material</b>	A.C.
<b>Carcasa</b>	<b>Distancia entre baffles</b>		0,132 m	<b>Nº baffles</b>	32
	<b>Diámetro carcasa</b>		26"	<b>Material</b>	A.C.

## **12. DESCRIPCIÓN DEL REBOILER**

Los reboilers son en esencia, cambiadores de calor que se utilizan sobre todo para proporcionar vapor a partir del producto de colas de columnas de destilación y torres similares. Todos los tipos realizan vaporización parcial de una corriente que fluye bajo condiciones de circulación natural o forzada.

Los tres principales tipos de reboilers son:

– Tipo Kettle:

La vaporización tiene lugar en los tubos inmersos en una piscina de líquido. No hay circulación de líquido a través del intercambiador. También se le conoce como reboiler de haz sumergido. En algunas aplicaciones es posible acoplar el haz a la base de una columna ahorrando el costo de la carcasa.

– Tipo termosifón o circulación natural:

Pueden ser verticales con vaporización en tubos u horizontales con vaporización en carcasa. El líquido circula a través del intercambiador gracias a la diferencia de densidades entre la mezcla de dos fases líquido-vapor y el líquido de la base de la columna.

– Circulación forzada:

El fluido es bombeado a través del intercambiador y el vapor formado es separado en la base de la columna. Cuando se usa como vaporizador es necesario un recipiente adicional.

En el Anexo 0.12 se pueden ver esquemas de algunos de estos tipos de reboilers.

## 12.1 Descripción de los tipos de reboilers

### 12.1.1 Kettle

Los reboilers de la caldera consisten en un haz de tubos en una carcasa de gran tamaño. Los tubos están sumergidos y esto se asegura por un vertedero donde desborda el fluido. Este vertedero tiene unos 5 - 15 centímetros más que el tubo más alto. Se prefiere un haz de tubos abierto.

La temperatura en la caldera es sustancialmente uniforme. El tiempo de residencia es alto. Diámetros grandes de la carcasa hacen calderas poco rentables por la alta presión de operación. Normalmente, es más barato instalar el haz tubular directamente en el fondo de una columna pero la cantidad de superficie que puede ser instalada es limitada.

### 12.1.2 Termosifón o circulación natural

#### 12.1.2.1 Termosifón horizontal

La fracción vaporizada en reboilers tipo termosifón generalmente es menor que en calderas. Se necesita menor diferencia estática para conducir la circulación que en las unidades verticales.

La velocidad de circulación se puede controlar mediante válvulas cerca de la línea de entrada. Debido al flujo forzado, hay un gradiente de la temperatura, desde el punto de ebullición en la entrada hasta el de salida, mientras que en una caldera la temperatura a la que hierve el fluido es más uniforme, asemejándose al punto de ebullición a la salida. Por lo tanto, para el mismo porcentaje de vaporización, la temperatura media logarítmica entre carcasa y tubos será mayor para termosifones que para el tipo Kettle. O para la misma temperatura, el porcentaje la vaporización es menor.

Los termosifones horizontales tienen a su favor los requerimientos superficiales respecto a los verticales. El haz de tubos es más fácil de mantener. Y los procedimientos de cálculo para los lados de tubo y de carcasa son también aplicables en este caso.

### 12.1.2.2 Termosifón vertical

Funcionan mediante la circulación natural del líquido a través del conducto descendente hasta el reboiler y de la mezcla de dos fases a través de las tuberías de retorno. Por tanto, lo importante en este caso es la diferencia de presiones estáticas entre el líquido y la columna parcialmente vaporizada. El flujo se introduce mediante el desequilibrio hidrostático de presión entre el líquido presente en el conducto descendente y la mezcla de dos fases presente en los tubos del reboiler.

Los termosifones no precisan de ninguna bomba para la recirculación y, en general, se considera que tienen menos posibilidades de atascarse en servicio, debido a las velocidades, relativamente altas, que se obtienen en los tubos. No existen posibilidades de que se acumulen componentes pesados en el termosifón vertical, pero su diseño es más complicado que el de los reboilers de caldera, sobre todo para su funcionamiento a vacío.

### 12.1.3 Reboilers de circulación forzada

En este caso se emplea una bomba para garantizar la circulación del líquido más allá de la superficie de transmisión de calor.

Los reboilers de circulación forzada pueden ser horizontales o verticales. Puesto que el líquido de la alimentación está en su punto de ebullición, se debe asegurar el NPSH adecuado para la bomba si es de tipo centrífugo. Las desventajas principales son los costes de bomba y de energía, y un mantenimiento severo. Este modo de operación es un último recurso con fluidos viscosos o que ensucian los materiales, o cuando la fracción vaporizada debe mantenerse muy baja.

## 12.2 Elección del tipo de reboiler

La elección del mejor tipo de reboiler para un duty específico dependerá de los siguientes factores:

- La naturaleza del proceso, particularmente la viscosidad y la facilidad de formación de espumas.
- La presión de operación: a vacío o presión.

Los reboilers de circulación forzada están especialmente diseñados para fluidos muy viscosos y procesos con fluidos espumantes. Tienen altas velocidades de circulación. Pueden trabajar a vacío y a bajos porcentajes de vaporización. La mayor desventaja de este tipo es que necesitan una bomba y el coste del bombeo suele ser alto.

Los termosifones son un tipo más económico para muchas aplicaciones, pero no sirven para fluidos viscosos o para operaciones a alto vacío. No trabajan por debajo de presiones de 0,3 bares. Los verticales tienen el inconveniente de requerir que la base de la columna esté elevada para proveer de la diferencia estática de presiones necesarias, con lo que aumenta el coste de la columna. Los horizontales no tienen este problema tan acusado y son mayor sencillez a la hora de mantenerlo. Su haz tubular puede ser más fácilmente limpiado.

Los reboilers tipo Kettle tienen menores coeficientes de transferencia de calor que los otros tipos, ya que no hay circulación de líquido. No sirven para fluidos que formen espumas y tienen un alto tiempo de residencia. Su coste suele ser mayor que su equivalente en el tipo termosifón y necesita una carcasa mayor. En este caso, si el duty fuera tal, que el haz se pudiera instalar en la base de la columna, el coste podría llegar a ser competitivo. Pueden trabajar a vacío y para altos porcentajes de vaporización (entorno al 80% de la alimentación).

### 12.3 Descripción general de las partes de un reboiler

En esencia un reboiler no se trata más que de un intercambiador de carcasa y tubo. Las partes que lo componen son las mismas ya descritas en el apartado correspondiente al precalentador de carga.

#### 12.4 Características del reboiler

Según normas del código TEMA, la clasificación en tres partes fundamentales queda como sigue:

- Se elige una carcasa de tipo B: Carcasa integrada tipo casquete.

Se emplea una carcasa integrada (casquete), recomendada para reboilers empleados en columnas de destilación.

- Se elige un distribuidor de tipo J: Flujo dividido.

Siguiendo de nuevo recomendaciones de la bibliografía, para este tipo de equipos, el uso más extendido es una carcasa con flujo dividido o de tipo J.

- Se elige un cabezal de salida tipo U: Tubos en U.

Al considerarse tubos en U para el diseño, el tipo de cabezal adecuado es el U, que corresponde al de un haz de tubos de este tipo.

El reboiler será un intercambiador del tipo “BJU” según código TEMA.

El área de intercambio es de 32 m<sup>2</sup> para lo que se dispone de un intercambiador con 122 tubos. El diámetro de carcasa será de 21 ¼” y el material de fabricación será acero al carbono.

Los tubos son de 10 ft de longitud y 1” de diámetro interior. Tienen un espesor BWG de 14, paso cuadrado y 1 ¼” de pitch.

La corriente que circula por tubos es el vapor de baja presión que entra a la temperatura de saturación de 147°C. Por carcasa circula el agua desorbida, entrando a 109,3 °C y saliendo de forma parcialmente vaporizada a unos 110 °C.

Las características del reboiler se resumen en el siguiente cuadro:

<b>REBOILER</b>					
<b>Servicio:</b>		Hervidor de baja presión			
<b>Tipo / TEMA</b>		Termosifón horizontal / BJU			
<b>Calor transferido</b>		KJ/h	4942475,8		
<b>LMTD</b>		°C	37,4		
<b>U</b>		Kcal/h·°C·m <sup>2</sup>	600		
<b>Área de transferencia de calor</b>		m <sup>2</sup>	32		
<b>DISEÑO TÉRMICO</b>					
<b>Lado</b>		<b>TUBOS</b>		<b>CARCASA</b>	
<b>Fluido</b>		Vapor de baja		Agua agotada de fondo	
<b>Localización</b>		Entrada	Salida	Entrada	Salida
<b>Caudal total</b>	Kg/h	2330	2330	24037	24037
<b>Vapor</b>	Kg/h	2330	-	-	2185
<b>Líquido</b>	Kg/h	-	2330	24037	21852
<b>Temperatura</b>	°C	147	147	109,3	110
<b>Pérdida carga</b>	Kg/cm <sup>2</sup>	0,009		0,02	
<b>Factor ensuciamiento</b>	h·m <sup>2</sup> ·°C/Kcal	0,0004		0,0004	
<b>DATOS DE CONSTRUCCIÓN</b>					
<b>Tubos</b>	<b>Diámetro externo</b>		1,082"	<b>BWG</b>	14
	<b>Longitud de tubos</b>		12	<b>Nº tubos</b>	122
	<b>Pitch</b>	Cuadrado	1"	<b>Material</b>	A.C.
<b>Carcasa</b>	<b>Diámetro carcasa</b>		21 ¼"	<b>Material</b>	A.C.

### **13. DESCRIPCIÓN DEL AEROREFRIGERANTE**

El aerorefrigerante, tiene como función la de refrigerar los vapores de la extracción lateral que recirculamos hasta la cabeza de la torre. La corriente está compuesta por vapor de agua, amoníaco y ácido sulfhídrico.

#### 13.1 Tipos de equipos de condensación

A continuación, se presentan las distintas alternativas para realizar la condensación, así como la elección del equipo más conveniente:

1. Emplear otra corriente de proceso más fría que interesa que se caliente
2. Emplear agua procedente de una torre de refrigeración:
3. Emplear agua de mar
4. Emplear aire como medio enfriador

En este caso, la condensación de la corriente se realiza mediante aire aspirado o impulsado por ventiladores. Lógicamente, la temperatura de diseño del aire debe ser inferior a la de salida del producto con una diferencia de al menos 10°C menos para que el equipo resulte económicamente rentable.

La gran ventaja del aire es que no hay ninguna posibilidad de contaminación del medio ambiente y su coste de instalación es inferior al de un intercambiador de carcasa y tubo.

#### 13.2 Elección del tipo de equipo

Para elegir el aerorefrigerante se siguen las siguientes consideraciones:

- Equipos necesarios: Si se requiere el agua para realizar la condensación se debe contemplar el circuito completo que incluye básicamente intercambiadores de

calor, depósitos del agua, bombas y tuberías del intercambiador y torre de refrigeración. Por el contrario, para usar aire el material se resume al propio aerorefrigerante.

- Disponibilidad del fluido: En el caso del aire la cantidad es ilimitada y su localización es inmediata.
- Tratamiento del agua: Normalmente el agua, antes de introducirse en el circuito, deberá ser tratada para evitar exceso de incrustaciones en el intercambiador, corrosión en las superficies metálicas en contacto con el agua, depósito de suciedad, crecimiento de algas y bacterias, etc. Estos tratamientos requieren grupos de inyección de inhibidores, etc. que superan un coste de instalación inicial y otros de operación y mantenimiento.
- Coste de energía eléctrica: La energía se requiere en el sistema de agua, para la reposición e inyección de agua en el circuito, para las bombas de recirculación y los ventiladores de la torre de refrigeración. En el sistema de aire se requiere solamente para el accionamiento de los ventiladores de los aerorefrigerantes. El consumo de energía de un sistema de refrigeración por aire es, generalmente, un 10-20% inferior al consumo de energía en un sistema de refrigeración por agua.
- Coste de mantenimiento: La comparación de los costes de mantenimiento de los sistemas, da ventaja al que utiliza aire para realizar la condensación, puesto que en este sistema se deberá tener en cuenta las reparaciones de los equipos motrices, engranajes, cojinetes y ventiladores. En cambio, en el sistema de agua se deberá considerar los costes de corrosión y ensuciamiento de todos los intercambiadores por el lado del agua, así como en tuberías, reparaciones de bombas, torre de refrigeración y equipos motrices, engranajes, cojinetes y ventiladores. Como aproximación se puede decir que el coste de mantenimiento de una instalación con sistema de aire es, aproximadamente, el 30% del coste de mantenimiento de una instalación de enfriamiento por agua.

### 13.3 Definición de aerorefrigerante

Se entiende por aerorefrigerante todo equipo que se destina a enfriar o condensar cualquier fluido que circula por el interior de tubos sobre los cuales incide el aire impulsado o aspirado por ventiladores.

El aerorefrigerante estará compuesto por haces tubulares colocados sobre (o bajo) las cámaras de aire, en las cuales están dispuestos los ventiladores; estos ventiladores estarán accionados por un motor adecuado (eléctrico, turbina, etc.)

Si los haces tubulares están colocados sobre los ventiladores, recibiendo el aire impulsado por ellos, el aerorefrigerante se denomina de “tiro forzado”, que es la disposición mas frecuente. Si, por el contrario, los haces están colocados bajo los ventiladores, recibiendo el aire aspirado por ellos, el aerorefrigerante se denomina de “tipo inducido”.

### 13.4 Descripción general de un aerorefrigerante

Los aéreos están compuestos por el haz tubular que conforma la parte estática, y por los ventiladores que son la parte dinámica. El aire que impulsan los ventiladores, pasa a través del haz tubular, consiguiéndose el intercambio de calor entre el aire y el producto interior de los tubos.

Las partes del aéreo son las siguientes:

- Haz tubular
- Cámaras de aire
- Grupo ventilador-motor

### 13.4.1 Haz tubular

Es un conjunto formado por:

- Cabezales
- Tubos
- Bastidor

Los tubos son realmente los elementos activos donde se da el intercambio. El bastidor es un elemento estructural que da soporte al haz y los cabezales son distribuidores y colectores del flujo hacia los tubos.

#### 13.4.1.1 Tipos de haces y cabezales

Se pueden adoptar distintas disposiciones constructivas para los haces y cabezales. A continuación se enumeran las más importantes:

- Cabezales con tapa desmontable
- Cabezales desmontables
- Cabezales soldados con tapones

La más frecuente es la última, la cuál será utilizada en el diseño posterior. Las dos primeras tienen un elemento embridado de tal manera que es posible su desmontaje para limpieza de los tubos. En el tercer caso, el cabezal es totalmente cerrado, disponiendo de tapones que permiten la limpieza de cada tubo individualmente. Otra forma en la que se pueden construir habitualmente es la de haz tipo “distribuidor”.

El cabezal soldado con tapones está formado por cajas, con todas sus caras soldadas, y en los que la cara opuesta a la placa tubular está provista de agujeros con sus respectivos tapones, frente a cada tubo. Esta disposición permite la limpieza mecánica tubo a tubo por medio de un rascador. Este tipo de cabezal es el de mayor utilización y

de menor coste. Es recomendable para servicios con presiones medias o bajas (como es el caso).

#### 13.4.1.2 Sección

Conjunto de uno o más haces tubulares, abastecidos por uno o varios ventiladores, de forma que da cabida a las cámaras de aire, las estructuras y otros equipos pertinentes. Normalmente la sección está compuesta por haces pertenecientes al mismo servicio, pero también puede estar formada por haces pertenecientes a diferentes servicios. En este último caso se dice que son “servicios acoplados”.

#### 13.4.1.3 Tipo de unión tubo-aleta

Los tubos aleteados constituyen la parte fundamental de un aerorefrigerante, por ser los elementos activos de transmisión de calor y representar aproximadamente el 50% del coste del equipo.

Es natural, por ello, que le dediquemos una atención especial. Existen diversos tipos de tubos aleteados y es de primordial importancia una correcta elección de la alternativa más adecuada al servicio a que se destine el equipo.

En general, los tubos usados en los aéreos están formados por un tubo base de un material (acero al carbono, inoxidable, acero baja aleación, cupro-níquel, etc.) Idóneo para el fluido que circula por su interior, y por aletas transversales también de material adecuado (aluminio normalmente, aunque también se usan de acero, cobre, etc).

El diámetro del tubo puede ser teóricamente cualquiera, aunque es general el uso de tubos de 1” de diámetro exterior.

Igualmente las demás dimensiones (longitud de los tubos, altura de las aletas, espesor y espaciado de las aletas, etc) pueden, teóricamente, elegirse libremente, aunque en la práctica están normalizados ciertos valores.

La unión de la aleta al tubo puede hacerse por diversos procedimientos. Entre los muchos tipos de tubos aleteados se considera los tres siguientes, más habituales:

- Tubo bimetálico con aletas extruidas: Consiste en un tubo base encamisado con otro de aluminio del cual se obtienen las aletas por extrusión. Normalmente el número de aletas/pulgada se limita a 8 como máximo.
- Tubo con aletas helicoidales unidas por incrustación mecánica: Comúnmente denominados tubos tipo G. El material de la aleta, en forma de fleje, es introducido en una ranura helicoidal continua practicada en el tubo. La ranura es cerrada a continuación por ambos lados. La profundidad de la ranura es de 0,3 + 0,4 mm.
- Tubo con aletas helicoidales enrolladas bajo tensión: Normalmente denominado tubo tipo L. El fleje es conformado en una sección en forma de L y a continuación se enrolla bajo tensión con paso helicoidal.

Los requisitos fundamentales que deben de cumplir estos tubos aleteados son:

- Contacto íntimo entre aleta y tubo, estando libre su unión de aire u óxido que dificulten la transferencia de calor.
- Impedir la deformabilidad de las aletas, evitando que se doblen y junten unas con otras, de forma que imposibiliten la circulación del aire a través del haz.

A la hora de elegir el tipo de unión tubo-aleta, dependerá mucho de la temperatura máxima de trabajo del aerorefrigerante. Las temperaturas máximas permitidas en cada tipo de unión aleta-tubo son las siguientes:

<b>Tipos de unión de las aletas</b>	<b>Temperatura máxima permitida</b>
Tipo "L"	180 °C
Tipo "Extruido"	280 °C
Tipo "G"	355 °C

En el diseño propuesto se utilizarán los tubos tipo L, ya que son los más adecuados con las temperaturas de diseño que se están empleando.

#### 13.4.1.4 Bastidor

El bastidor no es más que un elemento estructural, rigidizador y soporte del haz propiamente dicho.

Está constituido por marcos situados perpendicularmente a los tubos a los que soportan, a través de unas pequeñas chapas que, sirven como distanciadores de los tubos a lo largo del aerorefrigerante. Los marcos van soportados por dos vigas paralelas a los tubos, que cierran el bastidor.

#### 13.4.2 Cámaras de aire

Las cámaras de aire, son la parte de los aerorefrigerantes que conducen el aire desde el ventilador hasta su choque con el haz tubular.

#### 13.4.3 Ventiladores

Los ventiladores usados en aerorefrigerantes son de flujo axial con 3, 4 o 6 palas. Normalmente las palas, están compuestas de resinas de poliéster reforzadas con fibra de vidrio. Otras posibilidades del mercado son el aluminio y las aleaciones ligeras.

Los ventiladores pueden ser:

- De regulación manual: en el que puede variarse el ángulo de ataque de las palas pero solo cuando el ventilador esta en parada.
- De regulación automática: dispone de una cabeza servo-motora capaz de orientar las palas durante la marcha.

En el diseño del aerorefrigerante propuesto, se utilizarán ventiladores de regulación automática por ser estos los más recomendables. Tendrán 4 palas de resinas de poliéster reforzadas por fibra de vidrio.

### 13.5 Criterios de selección del tipo de aerorefrigerante

Para el diseño de aerorefrigerantes, se decide primero el tipo de tiro requerido del equipo. A continuación, se expondrán los diferentes motivos para la elección de un aerorefrigerante de tiro forzado o inducido. En los Anexos de la Memoria Descriptiva, se añaden esquemas de las disposiciones de un aerorefrigerante.

La disposición más usada normalmente es la de tiro forzado y ello por diversas razones, entre las que destacamos:

En el tiro inducido, para proteger al motor, al ventilador y la transmisión, la temperatura de salida del aire debe mantenerse por debajo de ciertos límites (aproximadamente 60°C); este problema no existe en el tiro forzado.

El montaje y desmontaje de haces, ventiladores, motores y transmisiones ofrece más complicación en el tiro inducido.

Igualmente, en el tiro inducido, es más difícil el acceso para el mantenimiento a los haces, ventiladores, motores y transmisiones. Sin embargo, en la disposición de tiro inducido, la recirculación de aire caliente de la descarga hacia la succión es menor, dado que el aire es descargado directamente por los ventiladores de la atmósfera, a mayor velocidad, y por tanto a mayor altura.

### 13.6 Datos del proceso del aéreo

Por los tubos del aéreo se introduce la corriente de vapor procedente de la extracción lateral de la columna. Este fluido entra a 105°C y sale a 70°C.

El caudal de aire que se emplea para producir la condensación y refrigeración, entra a una temperatura de 36°C, con humedad relativa del 80%, y sale a 50°C.

Se adjunta el siguiente cuadro que resume el diseño del aéreo:

<b>AEROREFRIGERANTE</b>				
Servicio: Condensar la corriente de extracción lateral y reducir su temperatura.				
<b>DISEÑO TÉRMICO DEL LADO DE TUBOS</b>				
<b>Fluido</b>	Mezcla		<b>T entrada</b>	105 °C
<b>Caudal entrada</b>	1880,2	Kg/h	<b>T salida</b>	70 °C
<b>Vapor salida</b>	236,27	Kg/h	<b>Pérdida carga</b>	0,017 Kg/cm <sup>2</sup>
<b>Líquido salida</b>	1643,9	Kg/h	<b>U</b>	225 Kcal/h·°C·m <sup>2</sup>
<b>DISEÑO TÉRMICO DEL LADO DEL AIRE</b>				
<b>Fluido</b>	Aire		<b>T entrada</b>	36 °C
<b>Caudal entrada</b>	250000	Kg/h	<b>T salida</b>	50 °C
<b>Caudal salida</b>	250000	Kg/h	<b>Pérdida carga</b>	0,0008 Kg/cm <sup>2</sup>
Calor intercambiado = 867114 Kcal /h			LMTD = 41,92 °C	
<b>DATOS DE CONSTRUCCIÓN</b>				
<b>Tubos</b>	<b>Material</b>	Acero inoxidable	<b>Número de tubos</b> 156	
	<b>Diámetro exterior</b>	1"	<b>Longitud de los tubos</b> 30 ft	
	<b>BWG</b>	12	<b>Pitch</b>	Triangular 2,6"
<b>Aletas</b>	<b>Nº aletas/in</b>	9	<b>Material</b>	Aluminio tipo "L"
<b>Unidad</b>	<b>Nº secciones</b>	1	<b>Longitud de los haces</b> 9,6 m	
	<b>Nº haces</b>	2	<b>Anchura del haz</b> 1,3 m	
	<b>Nº filas/haz</b>	6	<b>Altura del cabezal</b> 0,55 m	
<b>Área de la planta = 26,3 m<sup>2</sup></b>				

## **14. BOMBAS**

### **14.1 Características de las bombas**

Las bombas utilizadas en esta unidad son bombas centrífugas de una sola etapa. La bomba centrífuga monoetapa es uno de los tipos más comunes. Puede usarse para una gran variedad de líquidos tanto de elevado peso específico como de bajo peso, y a su vez pueden trabajar en un amplio margen de temperaturas y presiones. Estas bombas permiten el uso de agua de enfriamiento en camisas de refrigeración o la radiación de líquido de enfriamiento al sello.

Las bombas centrífugas requieren venteo antes del arranque para eliminar cualquier gas que esté en la carcasa. Al realizar esta operación se deben tener en cuenta las condiciones del viento y siempre que sea posible se debe ventear el sistema a antorcha.

Durante el arranque, se utilizan filtros en todas las succiones de las bombas para retener impurezas arrastradas en las tuberías. El filtro deberá estar localizado de tal forma que, si es necesario cambiarlo, las impurezas no caigan dentro de la succión de la bomba.

Es preciso evitar la capitación de la bomba. La causa principal de este fenómeno es una condición de succión inadecuada, especialmente en bombas con filtros incorporados en la succión. En columnas donde existe una gran diferencia entre el punto de ebullición entre los productos de cabeza y cola se puede producir este fenómeno, durante el arranque de la misma. También puede ocurrir, cuando se trata de ajustar las condiciones de operación, si se produce mezcla de los productos de cabeza y fondo dando lugar a la vaporización de productos ligeros en la bomba.

El sistema de bombas centrífugas empleado en la unidad no lleva una sola bomba para cada trabajo. Se utilizan siempre dos bombas trabajando en paralelo. De

esta forma es posible trabajar con una o con ambas. En caso de avería la unidad puede continuar trabajando con la bomba auxiliar y no tiene que parar. Además de esta forma se consigue una mayor capacidad a la misma presión.

#### 14.2 Bombas de la planta

Las bombas del equipo se identifican del siguiente modo:

B<sub>1</sub> : Bomba de impulsión de la carga de alimentación hacia el stripper.

B<sub>2</sub> : Bomba de impulsión de los fondos del stripper hacia tratamiento de aguas.

B<sub>3</sub> : Bomba de impulsión del agua procedente del aerorefrigerante hacia cabeza de columna.

Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

<b>BOMBAS</b>				
<b>Propiedades</b>	<b>Unid.</b>	<b>B<sub>1</sub></b>	<b>B<sub>2</sub></b>	<b>B<sub>3</sub></b>
<b>Temperatura</b>	<b>°C</b>	50	60	70
<b>Caudal</b>	<b>m<sup>3</sup>/h</b>	22,41	23,26	2
<b>Diámetro interno</b>	<b>mm</b>	73,6	62,7	33,96
<b>Densidad, ρ</b>	<b>Kg/m<sup>3</sup></b>	988,25	980,45	972,5
<b>Factor de fricción, f</b>	-	0,018	0,022	0,023
<b>Reynolds</b>	-	210045	250034	73075
<b>Presión de succión</b>	<b>Kg/cm<sup>2</sup></b>	1,38	1,78	1,38
<b>Presión de descarga</b>	<b>Kg/cm<sup>2</sup></b>	6,62	8,12	5,8
<b>ΔP</b>	<b>Kg/cm<sup>2</sup></b>	5,24	6,34	4,42
<b>Presión de vapor</b>	<b>Kg/cm<sup>2</sup></b>	0,1217	0,1952	0,3055
<b>Altura elevación</b>	<b>m</b>	16	1	5
<b>Pérdida carga fricción</b>	<b>m</b>	11,81	30,4	27,5
<b>Carga total H</b>	<b>m</b>	52,4	63,4	44,2
<b>Rendimiento</b>	<b>%</b>	52	52	52
<b>Trabajo</b>	<b>KW</b>	3,9	4,5	0,4
<b>NPSH</b>	-	15	15	10

## **15. PIPING DE LA UNIDAD**

### **15.1 Tuberías de la planta**

Las partes que componen un sistema de tuberías se pueden agrupar en: tuberías, accesorios, bridas y válvulas.

Los sistemas de tuberías representan, aproximadamente un tercio del coste del material de una planta de proceso. Requieren entre un 30 y un 40% del trabajo de montaje y consumen un 45% de las horas-hombre de ingeniería, ocupando un 60% del volumen de material.

A continuación se enumeran las líneas de la unidad y el servicio que prestan respectivamente. Se adjuntan planos

- T<sub>1</sub> = Alimentación de aguas ácidas al precalentador de carga
- T<sub>2</sub> = Alimentación caliente de aguas ácidas al stripper.
- T<sub>3</sub> = Extracción lateral del stripper hacia el aerorefrigerante
- T<sub>4</sub> = Reciclo frío hacia cabeza del stripper
- T<sub>5</sub> = Corriente de gas ácido de cabeza.
- T<sub>6</sub> = Alimentación de agua tratada al reboiler
- T<sub>7</sub> = Vapor de baja presión
- T<sub>8</sub> = Corriente procedente del reboiler hacia el stripper
- T<sub>9</sub> = Corriente de fondo del stripper hacia precalentador
- T<sub>10</sub> = Agua desorbida que abandona el precalentador hacia tratamiento.

El diámetro de las tuberías y los espesores de cada una de las líneas de la unidad quedan reflejados en la siguiente tabla:

Líneas de la planta											
Prop.	Unid.	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>7</sub>	T <sub>8</sub>	T <sub>9</sub>	T <sub>10</sub>
Fase	-	Líquida	Líquida	Vapor	Mezcla	Vapor	Líquida	Vapor	Mezcla	Líquida	Líquida
Caudal m.	Kg/h	22150	22150	1880,22	1880,22	297,95	24037	2330	24037	21852	21852
Caudal v.	m <sup>3</sup> /h	22,41	23,26	2530,58	1,93	297,56	25,58	970,83	933,84	23,26	22,29
$\rho$	Kg/m <sup>3</sup>	988,25	952,10	0,74	972,50	1,001	939,50	2,40	25,74	939,50	980,45
$\mu$	Cp	0,5	0,3	0,01	0,4	0,01	0,25	0,01	0,2	0,25	0,5
$\Delta P$	Kg/cm <sup>2</sup>	0,225	0,268	0,010	0,110	0,045	0,210	0,006	0,021	0,578	0,492
Tipo tubo	-	3" - 80	3" - 80	10" - 160	1 1/2" - 160	3" - 80	3" - 40	8" - 40	10" - 40	2 1/2" - 40	2 1/2" - 40
Material	-	A.C.	A.C.	A. I	A. I	A. I	A.C.	A.C.	A.C.	A.C.	A.C.
Esp calc.	in	0,136	0,136	0,142	0,134	0,135	0,136	0,164	0,144	0,136	0,135
Esp real	in	0,3	0,3	1,125	0,38	0,3	0,21	0,32	0,365	0,2	0,2

### 15.2 Aislamiento térmico de las tuberías

Las principales causas por las que se debe aislar las tuberías suelen ser:

- El control de la temperatura.
- La anticorrosión, de modo que se eviten las condensaciones.
- Protección contra hielo para evitar la solidificación de fluidos en las canalizaciones.
- Conservación de la energía calorífica.
- Seguridad de la planta, de forma que se eviten quemaduras por superficies calientes, o problemas por una radiación fuerte.

El aislamiento de tuberías se estudiaría en la Ingeniería de detalle, pero se nombrarán las líneas que interesa calorifugar en el proyecto:

- Línea 2: Corriente de aguas ácidas a 95°C que abandona el precalentador para entrar al stripper.

- Líneas 3 y 4: Corrientes pertenecientes a la extracción lateral y reflujo. Es importante vigilar bien los sistemas de aislamiento para que no se produzcan precipitados en estas líneas, sensibles de alta corrosión.
- Línea 5: Gas ácido que abandona el stripper.
- Líneas 6, 7 8: Todas las líneas que componen la alimentación y los productos del reboiler de fondo. Se deben mantener las temperaturas y presiones establecidas en los cálculos para que los caudales de vapor obtenidos sean los adecuados para la eliminación de amoníaco y sulfhídrico.
- Línea 9: Agua desorbida que entra al precalentador. Es necesario mantener su temperatura para poder elevar la de la alimentación hasta la temperatura de entrada al stripper.

### 15.3 Selección de bridas y accesorios

#### 15.3.1 Bridas:

Las bridas son elementos universalmente adaptados para unir, entre si, tramos de tuberías, o bien, unir tuberías con válvulas, recipientes o bombas.

Para las bridas, independientemente de su clasificación según la presión primaria de servicio, existe medidas normalizadas.

Las conexiones por bridas son el medio más utilizado para conservar la posibilidad de desmontaje. Las bridas comprimen una junta de caucho, amianto o metal, que aseguran la estanqueidad. Las dimensiones de las bridas, de los pernos y su número, permiten soportar la presión longitudinal resultante, además de, apretar suficientemente la junta.

En las conexiones por bridas, los tramos de tubería deben estar bien alineados y sujetos y hay que asegurarse de ello antes de situar la válvula, bomba, etc, en posición, ya que estas no deben soportar esfuerzos que resultarían perjudiciales. La posición correcta de las bridas hay que comprobarlas con un nivel, en sentido vertical de cara a la brida. Este tipo de conexión puede realizarse con bridas soldadas a la tubería o con bridas roscadas a la misma.

– Bidas soldadas:

Se usa la soldadura para realizar uniones entre bridas y tubería. Las conexiones de este tipo son de más calidad que las bridas roscadas, porque eliminan la posibilidad de pérdidas a través de la rosca, se mantiene el espesor del tubo y la brida soldada pasa a ser parte integrante de la tubería.

– Bidas roscadas:

En el caso de estas conexiones, para instalaciones carentes de gran responsabilidad, la brida simplemente se enrosca a la tubería, en cuyos extremos se habrá practicado las rocas adecuadas. La soldadura se puede usar también para perfeccionar el cierre de bridas de acero roscadas.

#### 15.3.1.1 Selección de bridas:

A la hora de seleccionar que brida es la más adecuada para un determinado servicio, se deben tener en cuenta una serie de recomendaciones:

- Las bridas roscadas se pueden emplear para altas presiones y temperaturas moderadas. No son adecuadas para servicios que impliquen fatigas térmicas.
- Las bridas de enchufe y soldadura son buenas para pequeñas conexiones, donde se prefieren a las roscadas por motivos de estanqueidad.

- Las bridas deslizantes o postizas, se pueden emplear para servicios moderados y particularmente cuando un montaje fácil es una consideración de primer orden.
- Las bridas de reborde se emplean en servicios que requieran frecuentes inspecciones y desmontajes, o para grandes diámetros en los que la posibilidad de girar la brida es importante. Se debe evitar para condiciones que impliquen fatiga a flexión.
- Las bridas de cuello, son las de empleo más común en la industria de procesos y se pueden utilizar para condiciones de servicios severos, alta presión y temperatura criogénica.

En cuanto al tipo de asiento o cara, se recomiendan:

- Cara resaltada para condiciones de servicio moderadas.
- Macho y hembra, para servicios especiales que requieran una junta retenida. No son frecuentes.
- Anillo, preferibles para altas presiones y temperaturas.
- Planas para servicios poco severos, donde se emparejan con válvulas y accesorios de hierro fundido.

Las bridas utilizadas en las líneas dimensionadas anteriormente son de las siguientes características:

La brida será tipo de cuello, con un espesor igual al de la tubería soldada. Es el tipo más empleado en las industrias de procesos.

Respecto a la terminación de las caras de la brida, será de tipo cara con resalte, también de uso muy común. Se emplea en condiciones de usos moderadas, como es el caso.

Todas las líneas tendrán bridas de unión con un rating de 175 lb, como presión primaria de servicio.

#### 15.4 Accesorios

Los accesorios que se emplean en las conducciones pueden prestar distintos servicios:

- Cambio de diámetro de una línea
- Cambio de dirección
- Cerrar el final de una línea
- Conectar distintas líneas.
- Bifurcaciones

El diseño y elección de los accesorios queda fuera del alcance del proyecto, siendo objeto de una posterior Ingeniería de detalle donde se trazará la isométrica de la planta.

## **16. INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL**

### **16.1 Consideraciones previas**

El objetivo del control automático de procesos es mantener en determinado valor de operación las variables del proceso tales como temperaturas, caudales, presión o nivel. Los procesos son de naturaleza dinámica, donde siempre ocurren cambios y hay que vigilar que en todo momento se empleen las medidas correctoras para que las condiciones de diseño se mantengan.

La nomenclatura utilizada para la instrumentación es la empleada en la refinería:

- SW – Unidad de aguas ácidas
- U – Indicador de temperatura
- T – Controlador de temperatura
- P – Indicador de presión
- L – Indicador de nivel
- F – Indicador de caudal
- V – Válvula automática
- VS – Válvula de seguridad

A continuación se indicarán brevemente cuales son estas variables que se manipulan y controlan y que instrumentos se emplean para ello:

### **16.2 Medidores de Temperatura**

Es necesario mantener ciertos equipos del proceso a determinadas temperaturas y es por ello, que la temperatura es una de las más importantes funciones que deben medirse. Las temperaturas deben ser medidas por instrumentos que puedan transmitir la

señal a la sala de control, y normalmente, estos equipos de medida están acompañados de elementos que permitan actuar de forma que pueda controlarse esta temperatura.

Los instrumentos más empleados en la industria son termómetros o termopares.

- Termómetros: se usan principalmente como indicador local.
- Termopares: sistema simple compuesto por dos alambres de metales diferentes, con extremos soldados entre sí. Cuando la temperatura aumenta, el extremo expuesto a este cambio genera un voltaje muy pequeño proporcional al cambio de temperatura. Los termopares junto con su equipo electrónico se utilizan para transmitir temperaturas leídas en diversas partes de la unidad.

Los instrumentos de medición de temperatura se indican a continuación:

SWT – 01	Plato número 10 del stripper
SWT – 02	Salida del aéreo WSE3
SWU – 03	Carga al botellón de carga WSC2
SWU – 04	Cabeza del stripper
SWU – 05	Plato 6 del stripper
SWU – 06	Plato 15 del stripper
SWU – 07	Plato 25 del stripper
SWU – 08	Salida del precalentador de carga WSE1
SWU – 09	Fondo del stripper
SWU – 10	Aspiración de las bombas de fondo
SWU – 11	Retorno del reboiler

### 16.3 Medidores de Presión

Los elementos de medición de presión son conocidos como manómetros. La mayoría de ellos son tubos de Bourdon, construidos en acero, aunque en servicios en condiciones rigurosas se construyen también en acero inoxidable. No se realizan en cobre o bronce, ya que en caso de incendio podrían fundirse y ocasionar pérdidas de presión en la planta.

El principio de funcionamiento se basa en que cualquier tubo que esté curvado tratará de enderezarse al provocar un aumento de presión en su interior. En cuanto el tubo comienza a extenderse, se produce un pequeño movimiento en su extremo y debido a un sistema de engranajes el puntero marca la presión.

Los empleados en la planta se resumen a continuación:

SWP – 15	Gas ácido del stripper a planta de azufre
SWP – 16	Llegada al botellón de carga WSC2

#### 16.4 Medidores de nivel

Los niveles se miden por un sistema de flotador. El control adecuado se hace a través de la sala de control mediante el equipo neumático o electrónico. La indicación de nivel puede ser verificada a través de instrumentos de vidrio instalado de forma adyacente al indicador.

Los que se utilizan en este equipo son los siguientes:

SWL – 20	Aguas ácidas en botellón de carga
SWL – 21	Aceite de botellón de carga
SWL – 22	Nivel mínimo en el fondo del stripper
SWL – 23	Nivel máximo en el fondo del stripper

#### 16.5 Medidores de caudal

Todas las medidas de caudal se realizan con medidores diferenciales. Este medidor opera según el principio de que hay una diferencia de presión a través de una placa de orificios cuando hay un flujo de fluido. La placa es plana, de disco delgado, montada entre bridas y con un hueco concéntrico de diámetro específico, calculado de manera que el flujo pueda ser evaluado con la precisión requerida.

La diferencia de presión puede ser tomada con un manómetro, que se puede calibrar directamente en relación a la variación de flujo. Los manómetros utilizados en refinería para estos medidores son de celdas de presión diferencial, ya que pueden combinarse con otros equipos neumáticos apropiados para transmitir la indicación y medida de flujo a la sala de control.

Los medidores de caudal de la unidad son:

SWF – 30	Vapor de baja al reboiler
SWF – 31	Carga al stripper
SWF – 32	Reflujo del stripper
SWF – 33	Fondo del stripper
SWF – 34	Gas ácido de cabeza

## 16.6 Válvulas de control

Las válvulas de control no se dimensionan en este proyecto, pero se citan los tipos que contendrán el equipo y su ubicación dentro de la línea de procesos.

### 16.6.1 Válvulas automáticas

La válvula de control, explicada brevemente, consiste en orificios variables dentro de la línea de proceso de forma que permita regular el caudal de fluido. Tienen un papel fundamental en el control del proceso.

Pueden tener una posición normalmente abierta o normalmente cerrada, dependiendo del servicio que presten. La acción del aire en la válvula permitirá la abertura o cierre, total o parcial, de la válvula según proceda. Existen también, válvulas de cierre automático. El cuerpo de la válvula puede ser de un solo orificio (tapón simple) o de dos orificios (tapón doble).

Las válvulas automáticas de la unidad son las mostradas a continuación:

SWV – 40	Cabeza de botellón de carga
SWV – 41	Vapor al reboiler
SWV – 42	Carga al stripper
SWV – 43	Reflujo del stripper
SWV – 44	Gas ácido a planta de azufre
SWV – 45	Gas ácido a antorcha
SWV – 46	Caudal de fondo del stripper

### 16.6.2 Válvulas de seguridad

Las válvulas de seguridad son válvulas automáticas que tienen la función de mantener la presión de una instalación por debajo de un límite preestablecido. Son reguladores automáticos cuya intervención se produce por la presión estática existente en la entrada de la válvula. Su apertura se produce de forma proporcional al aumento de la presión en la entrada. Se caracteriza por su descarga repentina con apertura total y rápida.

Como ya se ha mencionado, no se dimensionan, pero si se nombran las probables causas de una sobrepresión en los recipientes, de forma que sirva de base para el cálculo del caudal de descarga de la válvula y el resto de su diseño. Las principales causas son las siguientes:

- Cierre accidental de la válvula.
- Defecto de refrigeración
- Rotura de un tubo del intercambiador
- Incendio

Las principales válvulas de seguridad instaladas en el sistema son:

SWVS – 50	Línea de sosa
-----------	---------------

SWVS – 51	Cabeza del stripper
SWVS – 52	Salida del aéreo WSE3
SWVS – 53	Carga al stripper (antifuego)

### 16.6.3 Válvulas auxiliares

En todo proceso químico existen una serie de válvulas que no son consideradas de control, pero que son imprescindibles para lograr un diseño óptimo del sistema de control que rige dicho proceso. Son las siguientes:

- Válvulas de compuerta
- Válvulas de retención

#### 16.6.3.1 Válvulas de compuerta

Este tipo de válvulas no se utilizan como reguladoras, sino como acción de apertura o cierre, es decir, trabajan totalmente abiertas, o totalmente cerradas. Cuando están abiertas, el fluido pasa a través de la válvula en dirección recta, ofreciendo una pequeña pérdida de carga. Cuando está parcialmente abierta, el fluido puede producir erosiones en el disco o en la superficie del asiento.

#### 16.6.3.2 Válvulas de retención

Las válvulas de retención se utilizan cuando se requiere obtener un flujo unidireccional. Son automáticas en su funcionamiento, permitiendo el flujo en una dirección pero no en otra. Se colocan en la impulsión de las bombas (tipo balancín). En ellas, el flujo mantiene abierto el cierre o bisagra.

## **17. SEGURIDAD: VARIOS**

### 17.1 Generalidades

El gas ácido encontrado en la unidad de aguas ácidas del stripper consiste básicamente en  $H_2S$  y  $NH_3$ .

El ácido sulfhídrico es un compuesto químico extremadamente peligroso. Puede ser manejado en la industria química sólo cuando se presta la atención más rigurosa en los procedimientos. Es tóxico a muy bajas concentraciones y altamente combustible.

El amoníaco sin embargo, tiene menor combustibilidad y su toxicidad depende directamente de su concentración.

### 17.2 Ácido sulfhídrico

Es un gas extremadamente tóxico e irritante que ha causado algunos desastres en la industria del crudo y el gas.

El principal peligro de ácido sulfhídrico es que sus efectos son rapidísimos a determinadas concentraciones. Una exposición corta (de unos segundos a 2 minutos), a 500 – 600 ppm. Ocasiona incapacidad de control del sistema nervioso afectando al respiratorio. Una dosis masiva puede causar la muerte de inmediato.

Al ser más pesado que el aire, en un espacio cerrado y sin ventilación, se estancará en el fondo y formará un gas letal.

Una exposición prolongada a bajas concentraciones afecta al sentido olfativo haciendo que parezca que el olor desaparezca. Por tanto, el olfato es una manifestación muy irreal de protección contra su sobreexposición y crea una falsa sensación de seguridad. Además el ácido sulfhídrico puede destruir la capacidad de raciocinio de una

persona, ésta puede tener la suficiente fortaleza física como para alejarse del espacio cerrado pero no podrá tomar decisiones de una forma adecuada.

Además de ser peligroso para los seres vivos, el ácido sulfhídrico es un gas extremadamente inflamable. En concentraciones del 43 – 46 % en volumen, explota por encima de su punto de ignición.

Debido a que el gas es más pesado que el aire, el ácido sulfhídrico puede recorrer una distancia considerable hasta la fuente de ignición y retroceder. Por todo esto, es necesario que todas las fuentes de ignición, encendidos de llama (incluida la descarga estática) y los equipos productores de calor sean excluidos del contacto con el gas.

A continuación, se muestran las respuestas olfativas y efectos que sobre los humanos provoca una exposición a varias concentraciones de ácido sulfhídrico:

<b>Volumen (ppm)</b>	<b>Respuesta olfativa</b>
0.02	Inodoro
0.13	Mínimo olor perceptible
4.60	Olor moderado y fácilmente detectable
27	Olor fuerte y desagradable pero no intolerable
100	Paralización del sentido del olfato

Tabla 18.1: Relación Volumen / Respuesta olfativa

La unidad de stripper de aguas ácidas y su personal deben estar protegidos de fugas de ácido sulfhídrico del equipo y de fallos de conducciones mediante detectores de ácido sulfhídrico estratégicamente situados en áreas que están sometidas a la exposición. Los monitores asociados a estos detectores son de gran importancia pues darán la alarma en áreas de niveles de ácido sulfhídrico peligrosas.

Se instalan en concreto 3 detectores de ácido sulfhídrico situados:

- Junto a las bombas B1 A/B (0,5 m)
- Junto a las bombas B2 A/B (0,5 m)
- Aerorefrigerante de cabeza (9,6 m)

Cuando se trabaje en equipos que contengan concentración apreciable de ácido sulfhídrico, los operadores deben llevar siempre máscaras y como mínimo por parejas de manera que puedan ayudarse en caso de accidente.

Volumen (ppm)	Efectos físicos
0.10	Exposición máxima admisible de gas H <sub>2</sub> S durante 8 horas diarias laborables y 40 semanales.
50 – 100	Ligera irritación ocular, inflamación e irritación de vías respiratorias tras 1 hora.
100 – 500	Tos, irritación ocular, pérdida de sentido olfativo tras 2 – 15 minutos. Alteración de la respiración, dolor de ojos tras 15 – 30 minutos. Una exposición de varias horas provoca un empeoramiento gradual de estos síntomas pudiendo sobrevenir la muerte en las 48 horas siguientes.
500 – 700	Pérdida de la conciencia y posible muerte en 30 minutos o 1 hora a menos que la víctima se retirada al aire fresco y reciba reanimación.
700 – 1000	Rápida inconsciencia, paro respiratorio y muerte.
1000 – 2000	Inconsciencia de inmediato con rápido paro respiratorio y muerte en pocos minutos. La muerte puede ocurrir incluso si el individuo se retira de inmediato al aire fresco.

Tabla 18.2: Relación Volumen / Efecto físico del ácido sulfhídrico.

17.3 Amoníaco

Al igual que el ácido sulfhídrico, el amoníaco también es un gas tóxico e incoloro. Los riesgos y características tóxicas se muestran a continuación:

<b>Volumen (ppm)</b>	<b>Efectos físicos</b>
5	Mínima irritación
9 – 50	Sequedad nasal, fatiga olfativa e irritación moderada
125 – 137	Irritación permanente de nariz, garganta y pecho
150	Espasmos de laringe
500	Si la exposición es de 30 minutos puede causar incremento de tensión arterial e irritación aguda de las vías respiratorias, persistentes a veces hasta 24 horas
700	Irritación inmediata
1500 – 10000	Tos convulsiva, dolor de pecho, espasmos respiratorios, esputos rosáceos, rápida asfixia y edema pulmonar

Tabla 18.3: Relación Volumen / Efectos físicos del amoníaco

- Gas combustible. Las mezclas gas – aire son explosivas.
- Por inhalación produce picores de garganta, tos y respiración dificultosa dependiendo de las concentraciones presentes en el medio tal y como se muestra a continuación:

Al contacto con la piel, es corrosivo produciéndose enrojecimiento, dolor y serias quemaduras. Al contacto con los ojos, es corrosivo produciéndose enrojecimiento, dolor y visión borrosa.

Para prevenir todos los efectos anteriores, no se expondrá al fuego ni se fumará en sus proximidades. Se proveerá a la instalación de un equipo de ventilación, se llevarán puestos guantes y ropas protectoras así como mascarillas para la respiración y protección ocular.

#### 17.4 Sosa cáustica

Se trata de un compuesto sólido a temperatura ambiente, sobre el cual hemos de citar una serie de precauciones:

- El contacto con la humedad o el agua puede generar suficiente calor para arder material combustible.
- Reacciona con muchos metales produciendo hidrógeno gas, el cual puede formar una mezcla explosiva con aire.
- Es además, incompatible con ácidos fuertes, materiales combustibles, materiales orgánicos, cinc, aluminio, peróxidos e hidrocarburos halogenados.

#### 17.4.1 Efectos a una sobreexposición

Las vías de entrada más comunes serán inhalación, ingestión y contacto con ojos y piel, afectando al sistema respiratorio, ojos y piel.

- Inhalaciones: Irritaciones o quemaduras del sistema respiratorio, edemas pulmonares, inflamación del pulmón y daños en el sistema respiratorio en general.
- Contacto con la piel: Irritaciones o quemaduras.
- Contacto con los ojos: Irritaciones, quemaduras, daño permanente en el ojo.
- Ingestión: Es perjudicial y puede ser fatal. Quemaduras en la boca, garganta y estómago, náuseas y vómitos.
- Efectos crónicos: No identificados.

#### 17.4.2 Emergencia y procedimientos de primera ayuda

- Inhalación: Si es inhalado, respirar aire fresco. Si no puede respirar, proceder a respiración artificial. Si respira con dificultad, dar oxígeno.
- Contacto con la piel: Lavar con agua inmediatamente al menos durante quince minutos, mientras se cambia la ropa y zapatos contaminados.
- Contacto con los ojos: Lavar con agua la menos durante quince minutos.

Tomar precauciones en general, llevar guantes y protección facial, evitar las salpicaduras, evitar inhalar el polvo, mantener cerrado el contenedor, trabajar con adecuada ventilación y lavar después de su manejo.

## **18. BIBLIOGRAFÍA**

- **MANUAL DEL INGENIERO QUÍMICO:**  
Robert H. Perry, Don W. Green. Volúmenes 1 – 4. Ed. McGraw Hill
- **PROBLEMAS DE INGENIERÍA QUÍMICA:**  
Joaquín Ocon, Grabiél Tojo. Tomos 1 – 2. Ed. Aguilar
- **CHEMICAL ENGINEERING DESIGN:**  
R.K. Skinnot, Coulson & Richarson's Chemical Engineering Series. Ed Elsevier
- **CHEMICAL PROCESS EQUIPMENT – SELECTION AND DESIGN:**  
Copuer, Penney, Fair, Walas. Ed. Elsevier
- **PHASE EQUILIBRIA IN CHEMICAL ENGINEERING:**  
Stanley M. Walas. Ed. Heinemann
- **CURSO DE QUIMICA TÉCNICA:**  
J. Costa Lopez y Otros. Ed. Reverté
- **PRINCIPIOS ELEMENTALES DE LOS PROCESOS QUÍMICOS:**  
Fólder y Rousseau. Ed. Limusa Wiley
- **THE PROPERTIES OF GASES AND LIQUIDS:**  
Reid, Prausnitz and Poling. Ed. McGraw Hill
- **PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR:**  
Donald Q. Kern. Ed. McGraw Hill
- **TRANSFERNCIA DE CALOR:**  
J.P. Holdhann. Ed. McGraw Hill

- **TERMODINAMICA:**  
Kenneth Wark. Ed. McGraw Hill
  
- **FUNDAMENTOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR:**  
Frank P. Incropera y otros. Ed. Preantice may
  
- **INGENIERIA QUÍMICA:**  
Coulson J. M. y Richardson J.F.
  
- **AIR COOLED HEAT EXCHANGERS FOR GENERAL REFINERY SERVICE:** API STD 661, 5<sup>th</sup> 2002 126p.
  
- **OPTIMIZATION OF CHEMICAL PROCESSES:**  
Edgar and Himmelblau. Ed. McGraw Hill.
  
- **MANUAL DE STRIPPER DE AGUAS ÁCIDAS**  
Suministrado por CEPSA.

*Artículos:*

- **Optimum design of sour water strippers:**  
Chemical Eng. Progress, BCQ Vol 93, N°3 1975
  
- **Stripping de aguas ácidas (Partes I y II)**  
Jose Luis Gutierrez Rexach, Ingeniería Química, Oct-Nov 1978
  
- **Representation of NH<sub>3</sub> – H<sub>2</sub>S – H<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub> – CO<sub>2</sub> – H<sub>2</sub>O, and NH<sub>3</sub> – SO<sub>2</sub> – H<sub>2</sub>O Vapor –Liquid Equilibria:**  
Didier Beutier and Henri Renon; Ind. Eng. Chem. Process Des. Vol. 17, N° 3, 1978
  
- **Optimize reboiler design:**  
E. Chen; Hydrocarbon processing, Julio 2002

- Build a better NGL sour water stripping unit:  
M.G.Eskaros; Hydrocarbon processing, Enero 2003
  
- Improved Sour water stripper overhead system  
American Chemical Engineering, Abril 2003
  
- Optimize sour water treatment:  
T. Amstrong; Hydrocarbon processing, Junio 2003

## **0. ÍNDICE DE LA MEMORIA DE CÁLCULO**

### **0. INDICE DEL DOCUMENTO**

#### **1. BALANCE DE MATERIA Y CÁLCULO DEL N° DE PLATOS**

*1.1 Características de la corriente de alimentación*

*1.2 Balance general de materia*

*1.3 Consideraciones previas*

*1.4 Balance de materia al aerorefrigerante*

*1.5 Cálculo de la columna 1*

*1.5.1 Estudio de la Etapa 1*

*1.5.2 Cálculo de las etapas restantes*

*1.6 Cálculo de la columna 2*

*1.6.1 Balance de materia al reboiler*

*1.6.2 Estudio de la última etapa*

### **2. DISEÑO DEL STRIPPER**

#### **A. DISEÑO DE LOS PLATOS**

*2.1 Datos de las corrientes de vapor y de líquido*

*2.2 Cálculo del diámetro del stripper*

*2.2.1 Cálculo de la velocidad superficial del gas*

*2.2.2 Cálculo de la velocidad de inundación*

*2.2.3 Cálculo del área neta requerida*

*2.2.4 Cálculo del área total del plato*

*2.2.5 Cálculo del diámetro de columna*

*2.3 Elección del tipo de paso por plato*

*2.3.1 Cálculo del máximo flujo volumétrico líquido*

*2.4 Cálculo de la longitud del vertedero*

*2.5 Diseño de la columna 2*

- 2.5.1 Cálculo de la sección transversal del vertedero
- 2.5.2 Cálculo del área activa para la lámina perforada
- 2.5.3 Cálculo del área perforada
- 2.5.4 Cálculo de la velocidad de lloriqueo
- 2.5.5 Cálculo de las pérdidas de carga
  - 2.5.5.1 Cálculo de caída de presión en plato seco
  - 2.5.5.2 Cálculo de la caída de presión residual
- 2.5.6 Cálculo del retroceso en el vertedero
- 2.5.7 Verificación de inundación del plato
- 2.5.8 Cálculo del arrastre

## 2.6 Diseño de la columna 1

- 2.6.1 Cálculo de la velocidad de lloriqueo
- 2.6.2 Cálculo de las pérdidas de carga
  - 2.6.2.1 Cálculo de la caída de presión en plato seco
  - 2.6.2.2 Cálculo de la caída de presión residual
- 2.6.3 Cálculo del retroceso en el vertedero
- 2.6.4 Verificación de inundación del plato
- 2.6.5 Cálculo del arrastre

## 2.7 Cálculo del pitch

- 2.7.1 Cálculo de la longitud del arco que sustenta el plato
- 2.7.2 Cálculo del sector de corona circular que sustenta el plato
- 2.7.3 Cálculo de la zona de calma
- 2.7.4 Cálculo del área total perforada
- 2.7.5 Cálculo del área de un orificio
- 2.7.6 Cálculo del pitch de la columna 1
- 2.7.7 Cálculo del pitch de la columna 2
- 2.7.8 Cálculo del número de orificios

## **B. CÁLCULO DEL ESPESOR Y EL PESO DE LA COLUMNA**

- 2.8 Consideraciones previas
- 2.9 Cálculo del espesor de la virola de la columna
- 2.10 Cálculo del espesor de fondo y casco
  - 2.10.1 Cálculo del término L

2.10.2 Cálculo del término  $M$

2.11 Cálculo del peso de la columna

2.11.1 Cálculo del término  $H$

2.11.2 Cálculo del peso de la virola y los fondos

2.11.3 Cálculo del peso de los platos

2.11.4 Cálculo del peso total de la columna

**3. PRECALENTADOR DE CARGA**

3.1 Consideraciones previas

3.2 Metodología básica para el diseño

3.3 Fundamentos del cálculo de intercambiadores de calor

3.4 Características de las corrientes

3.5 Cálculo de las temperaturas calóricas

3.6 Propiedades físico – químicas de los fluidos

3.7 Cálculo de la temperatura media logarítmica (LMTD)

3.8 Cálculo de la temperatura media logarítmica corregida (MTD)

3.9 Cálculo del duty del intercambiador

3.10 Cálculo del área y elección del cambiador

3.11 Configuración de los tubos del precalentador

3.11.1 Cálculo del número de tubos ( $N_{\text{tubos}}$ )

3.12 Cálculo de los coeficientes individuales de transferencia de calor

3.12.1 Cálculo del coeficiente del lado de tubos

3.12.1.1 Cálculo del área de paso por tubo

3.12.1.2 Cálculo de la velocidad por tubos

3.12.1.3 Cálculo del número de Reynolds en el lado de tubos

3.12.1.4 Cálculo del número de Prandtl

3.12.1.5 Cálculo del factor de transferencia de calor

3.12.2 Cálculo del coeficiente del lado de carcasa

3.12.2.1 Cálculo del diámetro del haz tubular

3.12.2.2 Cálculo del espaciado entre baffles

3.12.2.3 Cálculo de la sección de paso por carcasa

3.12.2.4 Cálculo de la velocidad másica del lado de carcasa

3.12.2.5 Cálculo del diámetro equivalente

- 3.12.2.6 *Cálculo del número de Reynolds en el lado de carcasa*
- 3.12.2.7 *Cálculo del número de Prandtl*
- 3.12.2.8 *Cálculo del factor de transferencia de calor*
- 3.13 *Cálculo de los coeficientes globales de transferencia de calor*
  - 3.13.1 *Coefficiente global limpio*
  - 3.13.2 *Coefficiente global sucio*
- 3.14 *Cálculo de pérdidas de carga*
  - 3.14.1 *Cálculo de las pérdidas de carga en el lado de tubos*
  - 3.14.2 *Cálculo de las pérdidas de carga en el lado de la carcasa*
- 3.15 *Configuración de la carcasa del precalentador*
  - 3.15.1 *Cálculo del baffle de entrada*
  - 3.15.2 *Cálculo del baffle de salida*
  - 3.15.3 *Cálculo del número de baffles*

#### **4. REBOILER**

- 4.1 *Características de las corrientes*
- 4.2 *Balance de energía*
  - 4.2.1 *Cálculo de las entalpías*
  - 4.2.2 *Cálculo del calor de calentamiento*
  - 4.2.3 *Cálculo del calor de vaporización*
  - 4.2.4 *Cálculo del calor total intercambiado*
  - 4.2.5 *Cálculo del caudal de vapor de baja presión*
- 4.3 *Cálculo de la temperatura media logarítmica*
- 4.4 *Cálculo de las propiedades fisico-químicas*
  - 4.4.1 *Cálculo de la densidad media del fluido*
    - 4.4.1.1 *Cálculo del volumen de vapor*
    - 4.4.1.2 *Cálculo del volumen de líquido*
    - 4.4.1.3 *Cálculo del volumen total*
    - 4.4.1.4 *Cálculo de la densidad media*
- 4.5 *Cálculo del flujo de calor*
- 4.6 *Cálculo del área de intercambio*
  - 4.6.1 *Otras consideraciones*
- 4.7 *Cálculo del número de tubos*

- 4.8 Cálculo de los coeficientes individuales de transmisión de calor
  - 4.8.1 Cálculo del coeficiente individual del lado de tubos
    - 4.8.1.1 Cálculo de la velocidad por tubos
    - 4.8.1.2 Cálculo del número de Reynolds
    - 4.8.1.3 Cálculo del número de Prandtl
    - 4.8.1.4 Cálculo del factor de transferencia de calor
  - 4.8.2 Cálculo del coeficiente individual del lado de carcasa
    - 4.8.2.1 Espaciado entre baffles
    - 4.8.2.2 Cálculo de la sección de paso por carcasa
    - 4.8.2.3 Velocidad másica lado carcasa
    - 4.8.2.4 Cálculo del diámetro equivalente
    - 4.8.2.5 Cálculo del número de Reynolds
    - 4.8.2.6 Cálculo del número de Prandtl
  - 4.8.3 Cálculo de la temperatura de pared
  - 4.8.4 Estimación de los coeficientes  $h_s$  y  $h_v$
  - 4.8.5 Comprobación del coeficiente individual del lado de carcasa
  - 4.8.6 Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor
- 4.9 Cálculo de las pérdidas de carga
  - 4.9.1 Cálculo de las pérdidas de carga en el lado de tubos
  - 4.9.2 Cálculo de las pérdidas de carga en el lado de la carcasa:

## **5. AEROREFRIGERANTE**

- 5.1 Datos de la corriente del equipo
- 5.2 Balance de energía de la corriente
  - 5.2.1 Cálculo de entalpías
  - 5.2.2 Cálculo del calor de condensación
  - 5.2.3 Cálculo del calor de enfriamiento del líquido
  - 5.2.4 Cálculo del calor de enfriamiento del vapor
  - 5.2.5 Cálculo del calor total intercambiado
- 5.3 Determinación salto térmico y MLDT
- 5.4 Determinación de las temperaturas calóricas
- 5.5 Cálculo de la superficie de intercambio
- 5.6 Dimensionamiento de la superficie del aéreo

5.6.1 Cálculo del número de tubos

5.6.2 Disposición de los tubos

5.6.3 Cálculo del número de tubos por fila y haz

5.6.4 Dimensiones del haz, de la sección y de la unidad

5.6.4.1 Cálculo de la anchura mínima cabezal

5.6.4.2 Cálculo de la anchura total del haz

5.6.4.3 Cálculo de la altura del cabezal

5.6.4.4 Cálculo de la anchura de la sección

5.6.4.5 Cálculo de la anchura del aéreo

5.6.4.6 Cálculo de la longitud de los haces y la sección

5.6.4.7 Cálculo del área de la planta

5.7 Diseño del lado del aire

5.7.1 Cálculo del área frontal de paso del aire

5.7.2 Cálculo del diámetro equivalente

5.7.3 Cálculo del diámetro volumétrico equivalente

5.7.4 Cálculo del caudal de aire

5.7.5 Cálculo de la velocidad másica del aire

5.8 Cálculo de las pérdidas de carga

5.8.1 Cálculo de las pérdidas de carga del aire

5.8.2 Cálculo de la pérdida de carga en tubos

5.9 Elección de los ventiladores

5.9.1 Cálculo del diámetro del ventilador

## **6. BOMBAS**

6.1 Cálculo de bombas

6.2 Procedimiento de cálculo

6.2.1 Cálculo de la altura útil

6.2.2 Cálculo de la potencia de la bomba

6.2.3 Rendimiento de la bomba

6.2.4 Cálculo de las pérdidas de carga

6.2.5 Carga neta positiva de aspiración (NPSH)

6.3 Bombas de la planta

## **7. TUBERÍAS Y ACCESORIOS**

*7.1 Consideraciones previas*

*7.2 Normalización de las tuberías*

*7.3 Cálculo de las tuberías*

*7.3.1 Cálculo del diámetro óptimo de tuberías*

*7.3.2 Líneas principales de la planta*

*7.3.3 Resultados de los diámetros de las tuberías*

*7.3.4 Comprobación de los espesores de las tuberías*

## 1. BALANCE DE MATERIA Y CÁLCULO DEL N° DE PLATOS

En los siguientes apartados se abordarán los cálculos necesarios para resolver los balances de materia y energía a las unidades de la planta que ayude a obtener las características de cada corriente. En primer lugar, se trata el balance de materia general y el cálculo del número de platos que contiene la columna.

### 1.1 Características de la corriente de alimentación (1)

El caudal de agua ácida que se tratará en el stripper es de 535 ton/día. Las composiciones másicas de amoníaco y sulfhídrico en la corriente de alimentación (1) se encuentran recogidas en la tabla siguiente:

Corriente 1	Composición	Kg/h	Kmol/h
H <sub>2</sub> O	0,9891	21908,5	1217,15
H <sub>2</sub> S	0,0082	181,63	5,354
NH <sub>3</sub>	0,0027	59,8	2,518
<b>Total</b>	-	22150	1226

El fondo de la torre opera a una temperatura ligeramente inferior a la de condensación del agua a 1,48 ATA, es decir, 109,3 °C. Los datos de pesos moleculares (Kg/Kmol) son los siguientes:

NH<sub>3</sub>: 17

H<sub>2</sub>O: 18

H<sub>2</sub>S: 34

El objetivo que se marca en el desarrollo del proyecto dicta las siguientes condiciones de las corrientes de gas ácido y de agua strippada:

1. Gas ácido:

- Caudal: 12 Kmol/h
- peso H<sub>2</sub>O: 20 %
- peso H<sub>2</sub>S: 60 %
- peso NH<sub>3</sub>: 20 %

2. Agua strippada:

- % peso H<sub>2</sub>S: < 10 ppm
- % peso NH<sub>3</sub>: < 50 ppm

A continuación se muestra el diagrama de flujo del proceso con cada una de las corrientes que lo componen:

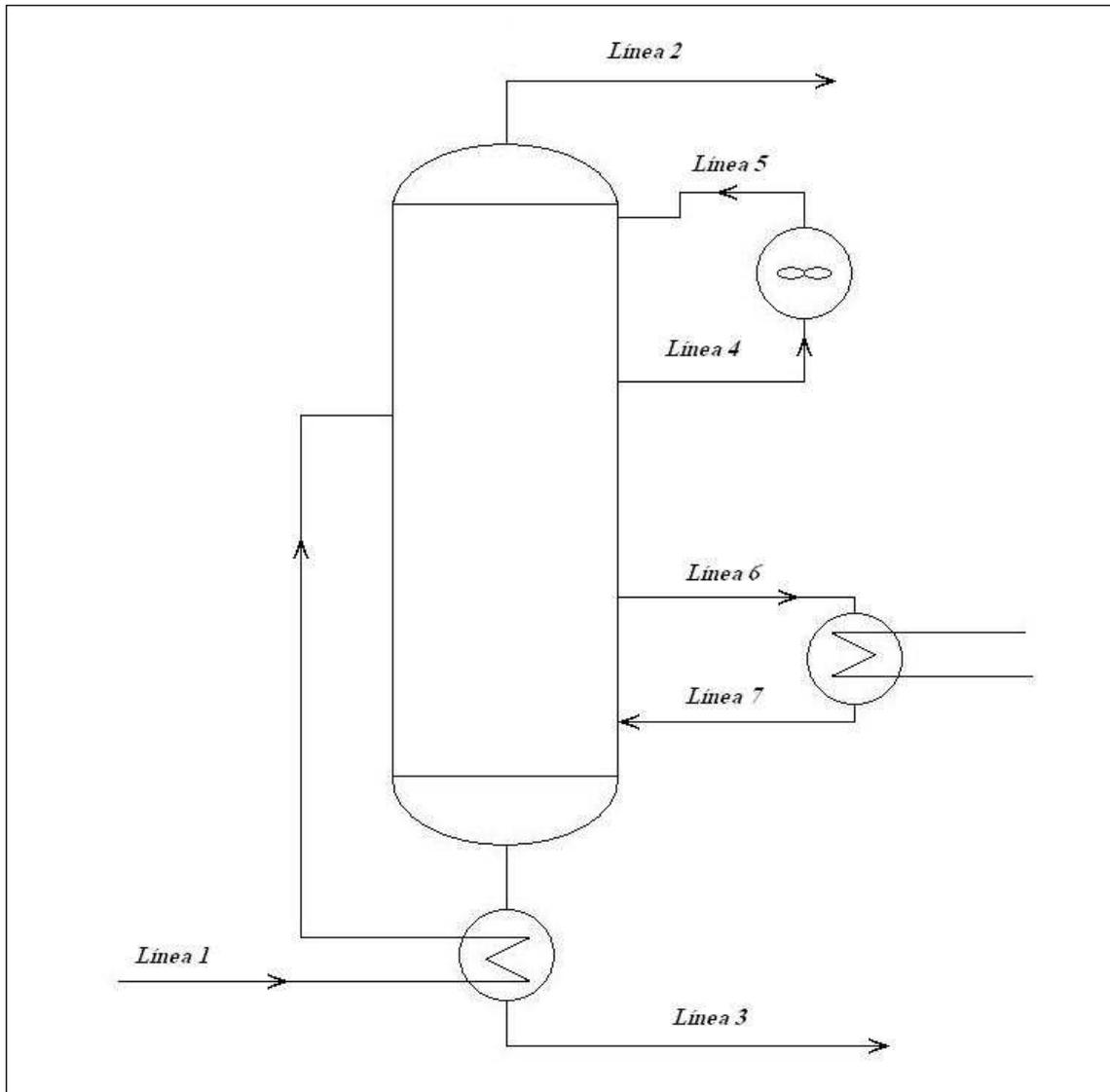


Figura 1.1: Diagrama de flujo

Seguidamente se expone el procedimiento de cálculo desarrollado para la obtención de los caudales y composiciones de las distintas corrientes del proceso.

### 1.2 Balance general de materia

En primer lugar se realiza un balance general de materia y se obtienen los caudales de gas ácido en cabeza de columna y de agua desorbida en colas. El cálculo del resto de corrientes esta asociado a la resolución de los platos de equilibrio de la columna.

Se establecen las siguientes ecuaciones de balance de materia para la columna:

$$F = D + B$$

$$F \cdot X_{Fi} = D \cdot X_{Di} + B \cdot X_{Bi}$$

Donde:

F : Caudal másico de alimentación; F = 22150 Kg/h

D : Caudal másico de gas ácido (cabeza)

B : Caudal másico de agua desorbida (fondo)

X<sub>Fi</sub>: Composición componente "i" en la alimentación

X<sub>Di</sub>: Composición componente "i" en cabeza de columna

X<sub>Bi</sub>: Composición componente "i" en fondo de columna

Con los valores correspondientes de composiciones para el amoníaco y el ácido sulfhídrico tanto en alimentación, como las composiciones perseguidas en fondo, se puede despejar:

$$22150 \cdot 0,0082 = D \cdot 0,6 + 0,00001 \cdot B$$

$$22150 \cdot 0,0027 = D \cdot 0,2 + 0,00005 \cdot B$$

Se obtiene:

$$B = 21852 \text{ Kg / h}$$

$$D \approx 298 \text{ Kg / h}$$

Se realiza por comprobación, el balance por componentes:

Para la corriente de colas (3):

Corriente 3	Composición	Kg/h	Kmol/h
H <sub>2</sub> O	0,99994	21850,688	1213,927
H <sub>2</sub> S	0,00001	0,21852	0,00642
NH <sub>3</sub>	0,00005	1,0926	0,06427
<b>Total</b>	-	21852	1214

Con las ecuaciones de balance:

$$\text{H}_2\text{O}: 21908,5 = 21850,688 - m_{D,\text{H}_2\text{O}}$$

$$\text{H}_2\text{S}: 181,63 = 0,21852 - m_{D,\text{H}_2\text{S}}$$

$$\text{NH}_3: 59,805 = 1,0926 - m_{D,\text{NH}_3}$$

Donde  $m_D$  corresponde a los caudales máscicos en la corriente de cabeza (2), para cada uno de los componentes.

Los datos para la corriente de gas ácido (2) quedan del siguiente modo:

Corriente 2	Composición	Kg/h	Kmol/h
H <sub>2</sub> O	0,194	57,812	3,211
H <sub>2</sub> S	0,6088	181,411	5,335
NH <sub>3</sub>	0,197	58,712	3,453
<b>Total</b>	-	297,93	12

Se comprueba que las composiciones de las corrientes son prácticamente las estipuladas en las especificaciones.

### 1.3 Consideraciones previas

A partir de este punto, el planteamiento para la resolución de la columna cambia. Se trabaja sobre la base de una corriente ya existente y se comprueba con los cálculos que todas las suposiciones realizadas son adecuadas. Los datos proporcionados por CEPSA, corresponden a una columna de 30 platos, con una extracción lateral en el séptimo y entrada de alimentación uno por debajo para que no se recircule la carga hasta la cabeza, lo que impediría el buen funcionamiento de la columna.

El planteamiento es dividir la columna en dos:

- Columna 1: una columna abarca desde el primer plato hasta el séptimo desde donde se realiza la extracción.
- Columna 2: la otra contiene desde el plato n° 8 (el de alimentación) hasta el fondo.

Por tanto, lo que se realiza es el cálculo de la primera columna, y después de la segunda.

Para ello, se supone las composiciones del plato de la extracción, de modo que se pueda resolver esta corriente y tener las composiciones de la alimentación de la columna 1. El cálculo de esta columna termina cuando la corriente de vapor que entra al último plato sea igual a la de alimentación.

En este momento, considerando una eficacia de plato del 50%, se calcula el número de platos reales y se compara con los supuestos. Si coinciden, se continúa con el cálculo de la siguiente columna.

### 1.4 Balance de materia al aerorefrigerante

En el balance de materia de la corriente recirculada hasta cabeza (corriente n° 4), se tiene el inconveniente de no conocer las composiciones. Es una extracción lateral que a su vez ejerce de alimentación en la parte alta de la torre. Se comienza un proceso iterativo. Se eligen unas condiciones iniciales para esta corriente y posteriormente, se

realiza el cálculo de las etapas de la columna que alimenta (columna 1). Si las etapas coinciden con las supuestas inicialmente, el proceso es válido. Si no, se continúa probando.

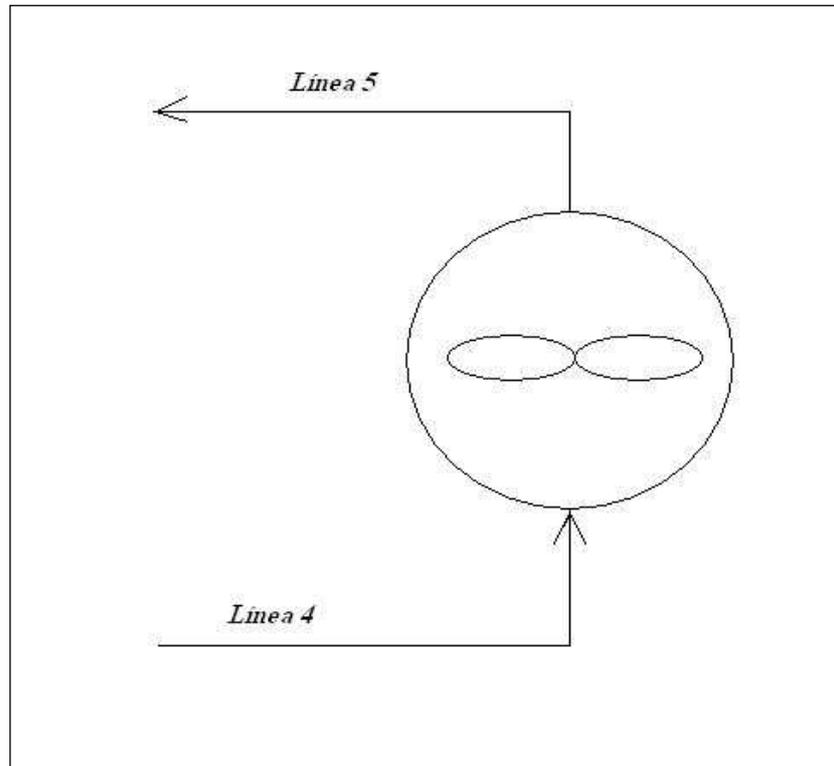


Figura 1.2: Corrientes de entrada y salida al aerorefrigerante

Para simplificar los cálculos y aprovechar la utilización de la simulación, el primer valor iterativo será el que nos proporciona el simulador. Según la optimización realizada, la corriente extraída contiene unos 100 Kmol/h y según datos de la simulación, esta corriente (4) tiene la siguiente composición:

Corriente 4	Composición	Kg/h	Kmol/h
H <sub>2</sub> O	0,8995	1619,1	89,95
H <sub>2</sub> S	0,0531	180,54	5,31
NH <sub>3</sub>	0,0474	80,58	4,74
<b>Total</b>	-	1880,22	100

La ecuación de balance de materia es la siguiente:

$$m_4 = m_{V,5} + m_{L,5}$$

Donde:

$m_4$  : Caudal molar de la corriente 4;  $m_4 = 100 \text{ Kmol/h}$

$m_{V,5}$  : Caudal molar de vapor en la corriente 5

$m_{L,5}$  : Caudal molar de líquido en la corriente 5

No se conoce el calor intercambiado para poder resolver conjuntamente los balances de materia y energía. Por tanto, se considera alrededor de un 91,46 % de condensación en el salto térmico que tiene lugar en el aéreo (105-70°C), a partir de referencias tomadas del simulador. Se resuelve así la primera de las ecuaciones:

$$m_4 = 100 \text{ Kmol/h}$$

$$m_{L,5} = 91,46 \text{ Kmol/h}$$

$$m_{V,5} = 100 - 91,46 = 8,54 \text{ Kmol/h}$$

La ecuación de cada componente es:

$$m_4 \cdot x_{i,4} = m_{V,5} \cdot x_{i,V,5} + m_{L,5} \cdot x_{i,L,5}$$

El balance se complementa con las ecuaciones de los componentes en cada fase:

$$1 = x_{H_2O,V,5} + x_{H_2S,V,5} + x_{NH_3,V,5}$$

$$1 = x_{H_2O,L,5} + x_{H_2S,L,5} + x_{NH_3,L,5}$$

Con las ecuaciones para los 3 componentes y las 2 anteriores, se obtienen 5 ecuaciones para 6 incógnitas. Todavía tendremos que hacer una suposición más. Como

ya se ha comentado, el ácido sulfhídrico es el componente más volátil, por lo que se considera que su composición en el líquido condensado va a ser muy pequeña. Se toma como valor un 0,0005% de H<sub>2</sub>S en la corriente condensada (5). Así se resuelve:

$$100 \cdot 0,0531 = 91,46 \cdot x_{H_2S,V,5} + 8,54 \cdot 0,0005$$

$$x_{H_2S,V,5} = 0,06147$$

El resto de ecuaciones quedan como sigue:

$$100 \cdot 0,0474 = 91,46 \cdot x_{NH_3,V,5} + 8,54 \cdot x_{NH_3,L,5}$$

$$100 \cdot 0,8995 = 91,46 \cdot x_{H_2O,V,5} + 8,54 \cdot x_{H_2O,L,5}$$

$$1 = x_{H_2O,V,5} + 0,06147 + x_{NH_3,V,5}$$

$$1 = x_{H_2O,L,5} + 0,0005 + x_{NH_3,L,5}$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones se obtienen los valores:

$$x_{H_2O,V,5} = 0,2147$$

$$x_{NH_3,V,5} = 0,1704$$

$$x_{H_2O,L,5} = 0,9635$$

$$x_{NH_3,L,5} = 0,0359$$

La corriente (5) que sale del aerorefrigerante, tiene la siguiente composición:

Corriente 5	Líquido			Vapor		
	Composición	Kg/h	Kmol/h	Composición	Kg/h	Kmol/h
H <sub>2</sub> O	0,9635	1585,88	88,11	0,2147	33,12	1,84
H <sub>2</sub> S	0,00005	2,04	0,06	0,6147	178,5	5,25
NH <sub>3</sub>	0,0359	55,93	3,29	0,1704	24,65	1,45
Total	-	1643,9	91,46	-	236,27	8,54

### 1.5 Cálculo de la columna 1

Según bibliografía, la totalidad del sulfhídrico es eliminado en el primer plato. Esto, da pie a realizar la suposición de que solo entra amoniaco. Por tanto se considera una composición en exceso de amoniaco (0,05%).

El balance a la etapa de equilibrio para una etapa “n” es el siguiente:

$$L_{n-1} + V_{n+1} = L_n + V_n$$

$$L_{n-1} \cdot x_{n-1} + V_{n+1} \cdot y_{n+1} = L_n \cdot x_n + V_n \cdot y_n$$

Donde:

$L_n$  : Líquido en equilibrio que abandona el plato n

$V_n$  : Vapor en equilibrio que abandona el plato n

$L_{n-1}$  : Líquido que entra al plato de equilibrio

$V_{n+1}$  : Vapor que entra al plato de equilibrio

x : Composición del líquido

y : Composición del vapor

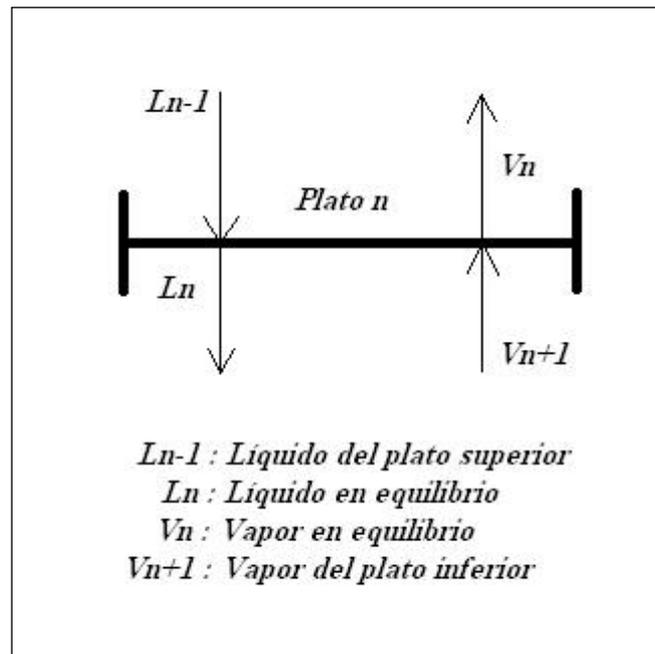


Figura 1.3: Balance de un plato “n”

En el primer plato, conocemos las composiciones del vapor que abandona el plato en equilibrio ( $V_1$ ) y se va a suponer las condiciones de entrada del líquido a la columna ( $L_0$ ). El procedimiento es el siguiente:

- A partir de los datos de equilibrio, obtenidos de la base de datos del simulador, calcular las composiciones del líquido que abandona el plato y está en equilibrio con el vapor conocido.
- Se calculará la composición del vapor que entra al plato y que no está en equilibrio, a partir de la expresión deducida de los balances de materia anteriores:

$$y_{n+1} = \frac{L}{V} \cdot (x_n - x_{n-1}) + y_n$$

- Esta ecuación supone que los caudales molares de líquido y vapor no varían a lo largo de los platos. Se admite esta suposición como válida para la realización de los cálculos.
- Para saber que caudales de líquido y vapor entran en este primer plato hay que observar las corrientes que llegan. Por un lado, la mezcla líquido-vapor procedente del aéreo a unos 70 °C. Por otro, se obtiene el gas ácido procedente de la cabeza de la columna. Para resolver el problema de la mezcla de fases, se realiza una última suposición en la que se considera que el vapor de la mezcla, pasa directamente a la corriente de vapor que abandona la columna.

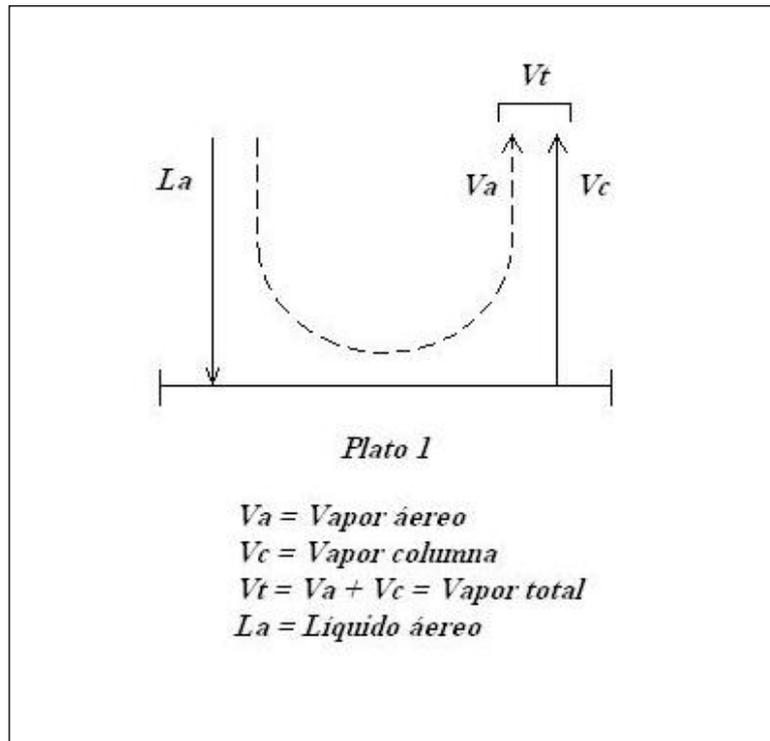


Figura 1.4: Balance del primer plato (Columna 1)

$$V_{total} = Vapor_{columna} + Vapor_{aéreo}$$

- Realizando un balance de materia en este punto, se obtiene la cantidad de vapor y las composiciones que son necesarias obtener en la corriente de vapor que abandona la columna.

El líquido que entra a la columna es de igual composición que el que llega de la mezcla.

Corriente	V (aéreo)		V (total)	
	Kg/h	Composición	Kg/h	Composición
<b>H2O</b>	33,12	0,1401	57,812	0,194
<b>H2O</b>	178,5	0,7556	181,411	0,6088
<b>NH3</b>	24,65	0,1043	58,71	0,197

Por tanto, aplicando la formula anterior, el vapor que nos será útil para los cálculos de la columna ( $V_{\text{columna}}$ ) es:

$$\text{H}_2\text{O} = 24,692 \text{ Kg/h} \quad y_{\text{H}_2\text{O}} = 0,4004$$

$$\text{H}_2\text{S} = 2,911 \text{ Kg/h} \quad y_{\text{H}_2\text{S}} = 0,0473$$

$$\text{NH}_3 = 34,06 \text{ Kg/h} \quad y_{\text{NH}_3} = 0,5523$$

Como se ha nombrado, al suponer que todo el sulfhídrico es eliminado en el primer plato, se recalculan las corrientes de entrada para la estimación supuesta (% $\text{NH}_3 = 0,05$ ). También se suponen los caudales de vapor saliente del plato para que la composición de amoníaco sea cercana a la real.

Corriente	Lo (Kg/h)	Composición	V1 (Kg/h)	Composición
H2O	1559,4	0,95	25	0,4166
NH3	82,074	0,05	35	0,5834
Total	1643,9	-	60	-

### 1.5.1 Estudio de la Etapa 1:

La temperatura de la etapa de equilibrio es de 75 °C. Según datos de equilibrio amoníaco-agua, la constante a esta temperatura tiene un valor de 12,1. A partir de ella se obtiene el valor de la corriente líquida que abandona el plato:

$$x_1 = \frac{y_1}{K_1} = \frac{0,5834}{12,1} = 0,04821$$

A continuación se calcula la composición del vapor que entra al plato ( $y_2$ ):

$$y_2 = \frac{L}{V} \cdot (x_1 - x_0) + y_1$$

$$y_2 = \frac{1643,9}{60} \cdot (0,04821 - 0,05) + 0,5834 = 0,53458$$

### 1.5.2 Cálculo de las etapas restantes:

A partir de aquí, se realiza el mismo proceso para etapas sucesivas hasta llegar a un valor de “y” por debajo del que deja la columna por la extracción lateral que conduce al aéreo. Este valor ( $y = 0,05$ ), se alcanza en la 3ª etapa de equilibrio ( $y_{n+1}=0,533$ ). El vapor que viene de la 4ª etapa será el que corresponda al de la extracción lateral. Se calcula una etapa más para conocer que composición de líquido que cae al plato de alimentación.

A continuación se exponen los resultados de los cálculos de estas etapas.

<b>Etapas</b>	<b>Yn</b>	<b>Ki</b>	<b>Xn</b>	<b>Yn+1</b>	<b>T</b>
<b>1</b>	0,5834	12,1	0,04821	0,53458	75
<b>2</b>	0,5346	12,4	0,04311	0,39499	85
<b>3</b>	0,3950	12,9	0,03062	0,05333	95
<b>4</b>	0,0533	13,1	0,00407	0,03369	105

Sabiendo que la eficacia de plato es del 50%, se puede concluir que la extracción se lleva a cabo entre el 6 y el 7º plato, como se había supuesto, a una temperatura aproximada de 105 °C, lo que concuerda con lo establecido en la simulación.

### 1.6 Cálculo de la columna 2

En la columna 2, se estudia primero la corriente de vapor que tendrá que introducirse desde el fondo. Conociendo las características de la corriente de colas que abandona la columna, y la razón de recirculación, se calcula el vapor que asciende. Se irán calculando platos hasta que la composición del líquido que entra en el plato sea igual a la composición de la alimentación. En ese momento, se calculan los platos reales

y se comprueba que coinciden con los supuestos en un primer momento. Así, se finaliza el cálculo de los equilibrios de la columna.

### 1.6.1 Balance de materia al reboiler

El cálculo de etapas se comienza a partir del fondo de la columna. El vapor obtenido en el reboiler será el resultante del porcentaje que se ha estimado como óptimo en el método de seccionamiento realizado a la columna. La razón de recirculación para el vapor es de 0,101, con lo que:

$$\frac{m_7}{m_3} = 0,101$$

Donde:

$m_7$  : Caudal másico de vapor que asciende por la columna (corriente 7)

$m_3$  : Caudal másico de líquido que deja la columna (corriente 3);  $m_3 = 21852 \text{ Kg/h}$

$$\frac{m_7}{21852} = 0,101$$

$$m_7 \approx 2190 \text{ Kg / h}$$

El balance en el reboiler queda tal que así

$$m_6 = m_7 + m_3$$

Donde  $m_6$  es el caudal másico de líquido que alimenta al reboiler (corriente 6):

$$m_6 = 2190 + 21852$$

$$m_6 = 24037 \text{ Kg / h}$$

Las composiciones de las corrientes 6 y 7, se calcularían siguiendo las siguientes formulas:

$$m_6 \cdot x_6 = m_7 \cdot y_7 + m_3 \cdot x_3$$

$$x_6 = \frac{m_7}{m_6} \cdot y_7 + \frac{m_3}{m_6} \cdot x_3$$

$$x_6 = \frac{2190}{24037} \cdot y_7 + \frac{21852}{24037} \cdot x_3$$

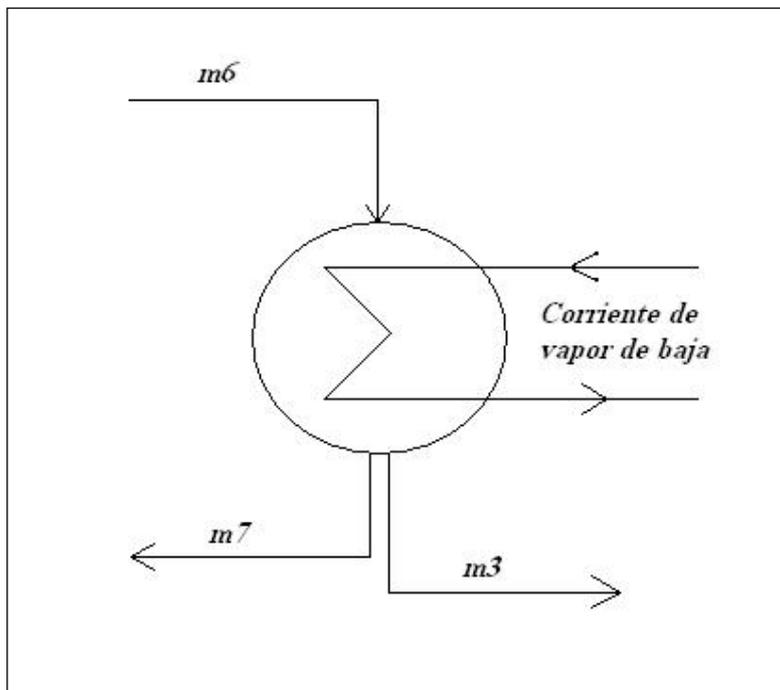


Figura 1.5: Balance al reboiler

En este punto, no se conocen suficientes datos para resolver el balance por componentes.

En el caso que se ha supuesto para resolver las columnas, donde solo se va a considerar el amoníaco, la situación es la siguiente:

El valor de  $y_7$  se obtiene de los datos de equilibrio. Será la composición de vapor en equilibrio con el líquido  $x_3$ . Para la temperatura de 110° C, la constante de equilibrio es 16,2 y por tanto  $y_7 = 0,000648$ .

La ecuación queda resuelta del siguiente modo:

$$x_6 = \frac{2190}{24037} \cdot 0,000648 + \frac{21852}{24037} \cdot 0,00005$$

$$x_6 = 0,000095$$

De esta forma se van calculando las etapas de equilibrio en sentido ascendente.

### 1.6.2 Estudio de la última etapa

Para ir calculando las etapas en sentido ascendente, se empleará la misma expresión que para la última etapa, en la forma:

$$\begin{aligned} L_{n-1} + V_{n+1} &= L_n + V_n \\ L_{n-1} \cdot x_{n-1} + V_{n+1} \cdot y_{n+1} &= L_n \cdot x_n + V_n \cdot y_n \end{aligned}$$

Donde:

$L_n$  : Líquido en equilibrio que abandona el plato n

$V_n$  : Vapor en equilibrio que abandona el plato n

$L_{n-1}$  : Líquido que entra al plato de equilibrio

$V_{n+1}$  : Vapor que entra al plato de equilibrio

$x$  : Composición del líquido

$y$  : Composición del vapor

Al igual que antes, para poder resolver este sistema de ecuaciones, debemos suponer que los caudales máxicos de líquido y vapor a lo largo de la columna se mantendrán constantes. Se cambia en este momento la nomenclatura para que quede más claro a la hora de resolver la ecuación:

$$m_7 = V$$

$$m_6 = L$$

$$x_{n-1} = \frac{V}{L} \cdot (y_n - y_{n+1}) + x_n$$

La composición del líquido de alimentación es de 0,0027. Se supone en 0,003 para añadir un exceso y sobredimensionar. Para saber que composición de líquido se tiene que alcanzar, se realiza una estimación entre la carga al stripper y el líquido que se obtiene por colas de la columna 1, referido al amoníaco.

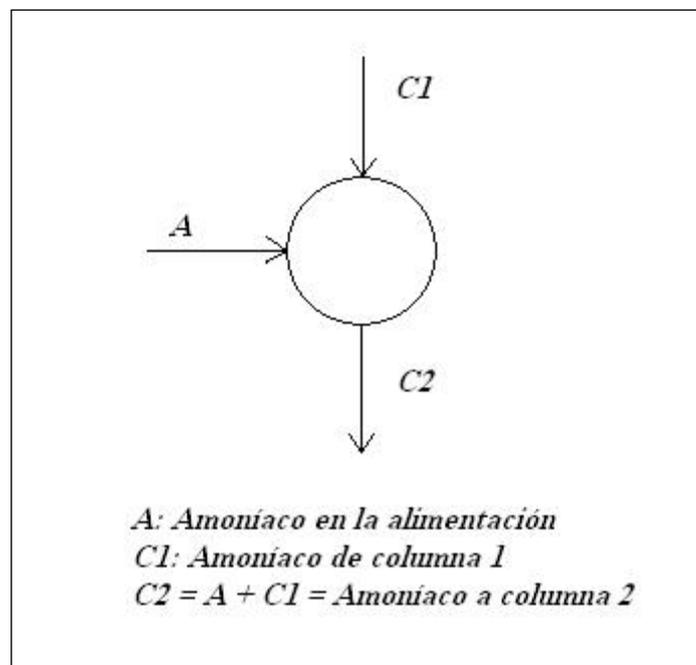


Figura 1.6: Punto de mezcla en la alimentación

Cantidad  $\text{NH}_3$  a columna 2 = Cantidad  $\text{NH}_3$  de la carga + Cantidad  $\text{NH}_3$  columna 1

$$\text{NH}_3 = 0,003 \cdot 22150 + 0,03 \cdot 1642 = 115,71 \text{Kg/h}$$

$$x_{NH_3} = \frac{115,71}{22150+1642} = 0,0034$$

Por tanto el tope de composición que se debe alcanzar en el líquido es 0,0034 para el amoníaco.

Se realiza a continuación el primero de los cálculos a modo de ejemplo. El resto están contemplados en la tabla siguiente.

El líquido que desciende del último plato tiene una composición que corresponde a  $x_n = x_6 = 0,000095$ . A la temperatura conocida del último plato 109,3 °C, se busca la razón de equilibrio para este líquido:  $K = 15,9$ .

$$y_n = K_n \cdot x_n$$

$$y_n = 15,9 \cdot 0,000095 = 0,001517$$

Con la ecuación expuesta anteriormente, se tienen los datos suficientes para calcular la composición del líquido que entra al plato que se esta calculando:

$$x_{n-1} = \frac{V}{L} \cdot (y_n - y_{n+1}) + x_n$$

$$x_{n-1} = \frac{2190}{24037} \cdot (0,001517 - 0,000648) + 0,000095$$

$$x_{n-1} = 0,000175$$

Para representar los cálculos del resto de etapas, en la columna de las etapas, se nombra con una B (referente a que se parte desde la base de la columna) y al lado el número de etapa comenzando una nueva numeración en sentido ascendente.

Etapa	X <sub>bn</sub>	K <sub>i</sub>	Y <sub>bn</sub>	X <sub>bn+1</sub>	T
B1	0,000095	15,9	0,001517	0,000175	109,3
B2	0,000175	15,7	0,002741	0,000286	109,0
B3	0,000286	15,3	0,004377	0,000435	108,5
B4	0,000435	15,1	0,006571	0,000635	108,0
B5	0,000635	14,9	0,009462	0,000898	107,5
B6	0,000898	14,6	0,013117	0,001231	107,0
B7	0,001231	14,2	0,017486	0,001630	106,5
B8	0,001630	13,9	0,022650	0,002100	106,0
B9	0,002100	13,6	0,028560	0,002638	105,5
B10	0,002638	13,2	0,034828	0,003210	105,0
B11	0,003210	13,1	0,042045	0,003867	104,5

Como resultado, se comprueba que la corriente de alimentación se alcanza prácticamente en la etapa 11. Las temperaturas también concuerdan con lo simulado y la el plato de alimentación está entorno a los 105°C.

Sabiendo que la eficacia de plato es del 50%, se estiman unos 22 platos para esta segunda columna, elevando el total de platos de la columna a los 30 que se habían supuesto al principio. Una vez comprobado que los supuestos concuerdan, se concluye el cálculo de las corrientes del equipo y del número de platos de la columna.

Número de platos reales = 30

En el Anexo 1.2 se incluye un esquema de los platos teóricos y las composiciones de amoníaco que se han obtenido divididas por etapas.

A continuación se incluye un resumen de las corrientes calculadas en el balance de materia:

Corriente 1	Composición	Kg/h	Kmol/h
H <sub>2</sub> O	0,9891	21908,5	1217,15
H <sub>2</sub> S	0,0082	181,63	5,354
NH <sub>3</sub>	0,0027	59,8	2,518
<b>Total</b>	-	22150	1226

Corriente 2	Composición	Kg/h	Kmol/h
H <sub>2</sub> O	0,194	57,812	3,211
H <sub>2</sub> S	0,6088	181,411	5,335
NH <sub>3</sub>	0,197	58,712	3,453
<b>Total</b>	-	297,93	12

Corriente 3	Composición	Kg/h	Kmol/h
H <sub>2</sub> O	0,99994	21850,688	1213,927
H <sub>2</sub> S	0,00001	0,21852	0,00642
NH <sub>3</sub>	0,00005	1,0926	0,06427
<b>Total</b>	-	21852	1214

Corriente 4	Composición	Kg/h	Kmol/h
H <sub>2</sub> O	0,8995	1619,1	89,95
H <sub>2</sub> S	0,0531	180,54	5,31
NH <sub>3</sub>	0,0474	80,58	4,74
<b>Total</b>	-	1880,22	100

Corriente 5	Líquido			Vapor		
	Composición	Kg/h	Kmol/h	Composición	Kg/h	Kmol/h
H <sub>2</sub> O	0,9635	1585,88	88,11	0,2147	33,12	1,84
H <sub>2</sub> S	0,00005	2,04	0,06	0,6147	178,5	5,25
NH <sub>3</sub>	0,0359	55,93	3,29	0,1704	24,65	1,45
<b>Total</b>	-	1643,9	91,46	-	236,27	8,54

## 2. DISEÑO DEL STRIPPER

### A. DISEÑO DE LOS PLATOS

El número de platos que conforman el stripper es de 30 del tipo válvula y la pérdida de carga permitida, debe ser igual o menor a 100 mm. columna de agua por plato (0,017 Kg/cm<sup>2</sup>).

$$Pérdida / plato = 100 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 \cdot 9,81 \cdot 30 = 29430 Pa$$

$$Caída de presión = 0,294 atm$$

Se toman como representativos los platos 1 y 7, ya que son los platos donde se encuentran las condiciones más desfavorables: reflujo de cabeza y alimentación respectivamente.

A partir de ahora se distinguirán las dos secciones de la columna del siguiente modo:

Platos 1-7: Columna 1

Platos 8-30: Columna 2

#### 2.1 Datos de las corrientes de vapor y de líquido

Los caudales molares de líquido y vapor para las dos columnas contempladas en el cálculo son los siguientes:

**Columna 1:**

$$L = 1320 \text{ Kmol/h}$$

$$V = 122 \text{ Kmol/h}$$

**Columna 2:**

$$L = 94,7 \text{ Kmol/h}$$

$$V = 12 \text{ Kmol/h}$$

Las temperaturas en la columna 1, son de 75 °C la corriente de cabeza a 105 °C la corriente de colas. En la columna 2, la cabeza está a 105 °C y el fondo alrededor de los 110°C.

A continuación se exponen los principales datos que se necesitan para llevar a cabo los cálculos del diseño de platos.

Los pesos moleculares se han calculado conociendo los datos de pesos moleculares de cada especie y a partir de las siguientes expresiones:

$$PM_{gas} = (Q_{NH_3} \cdot PM_{NH_3}) \cdot (Q_{H_2S} \cdot PM_{H_2S}) \cdot (Q_{H_2O} \cdot PM_{H_2O})$$

$$PM_{líquido} = (Q_{NH_3} \cdot PM_{NH_3}) \cdot (Q_{H_2S} \cdot PM_{H_2S}) \cdot (Q_{H_2O} \cdot PM_{H_2O})$$

Para las densidades de los líquidos se recurre a valores bibliográficos y las composiciones de las corrientes. En el caso del vapor se sigue la expresión:

$$\rho_{vapor} = \frac{PM_{vapor}}{22,4} \cdot \frac{273}{273+T}$$

Los resultados se expresan en la siguiente tabla:

Corriente	Columna 1		Columna 2	
	Densidad (Kg/m3)	PM (Kg/Kmol)	Densidad (Kg/m3)	PM (Kg/Kmol)
<b>Líquido</b>	834,4	18,8	945	18
<b>Vapor</b>	0,874	24,81	0,608	18,76

Los requerimientos básicos de una etapa de contacto deben ser:

- Proveer de un buen contacto líquido – vapor.
- Proveer de suficiente líquido como para que se tenga una alta eficiencia en la transferencia de materia.
- Tener suficiente área y espaciado para mantener la caída de presión en límites aceptables.
- Tener suficiente área de vertedero para que el líquido fluya libremente entre los platos.

El diseño de platos es combinación de teoría y práctica. Los métodos usan correlaciones semiempíricas derivadas de la combinación de trabajos de investigación y la experiencia práctica de las operaciones en columnas comerciales.

Para diseñar los platos se propone la siguiente metodología de cálculo:

1. Calcular los caudales máximos y mínimos de vapor y líquidos.
2. Estimar las propiedades químico-físicas del sistema.
3. Seleccionar el espaciado de platos.
4. Estimar el diámetro de la columna.
5. Calcular áreas del plato: vertedero, total, activa, neta.
6. Estimar velocidad de lloriqueo.
7. Calcular la pérdida de carga del plato.
8. Calcular el retroceso de vertedero.
9. Decidir otros parámetros del plato: zonas de calma, zonas no perforadas.

Se consideran las siguientes condiciones dadas por el fabricante:

- Diámetro de los orificios del plato ( $d_o$ ) = 4,5 mm
- Distribución de los orificios en forma de triángulo equilátero
- Hoja de acero inoxidable de 3 mm. de espesor
- Distancia standard entre platos ( $t$ ) = 0,610 m
- Altura del derramadero ( $h_w$ ) = 0,05 m

2.2 Cálculo del diámetro del stripper:

Se realizará el cálculo simultáneo para ambas columnas, ya que las expresiones son las mismas, y únicamente varían los datos en cada caso:

2.2.1 Cálculo de la velocidad superficial del gas ( $V_F$ ):

La velocidad superficial del gas se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$V_F = k_i \sqrt{\frac{\rho_L - \rho_V}{\rho_V}}$$

Para ello se necesita el valor de  $k_i$  que se obtiene del Anexo 2.1, a partir del valor del factor de flujo líquido - vapor ( $F_{LV}$ ):

$$F_{LV} = \frac{L}{V} \cdot \sqrt{\frac{\rho_V}{\rho_L}}$$

Donde:

L : Caudal molar de líquido

V : Caudal molar de vapor

$\rho_L$  : Densidad del líquido

$\rho_V$  : Densidad del vapor

Columna 1:

$$F_{LV} = \frac{94,7}{12} \cdot \sqrt{\frac{0,874}{834,4}} = 0,255 \quad \text{Constante inundación (Anexo 2.1)} \quad k_1 = 0,075$$

Columna 2:

$$F_{LV} = \frac{1320}{122} \cdot \sqrt{\frac{0,608}{945}} = 0,274 \quad \text{Constante inundación (Anexo 2.1) } k_1 = 0,07$$

Por tanto, los valores de velocidad superficial del gas en los dos sectores de la columna, quedan como sigue:

Columna 1:

$$V_F = 0,075 \sqrt{\frac{834,4 - 0,874}{0,874}} = 2,31 \text{ m/s}$$

Columna 2:

$$V_F = 0,07 \sqrt{\frac{945 - 0,608}{0,608}} = 2,75 \text{ m/s}$$

### 2.2.2 Cálculo de la velocidad de inundación ( $V_I$ ):

Para el cálculo de la velocidad de inundación hay que tener en cuenta si el líquido forma o no mucha espuma. Esto se tendrá en cuenta en un factor de corrección de la velocidad superficial del gas. En este proyecto, se trata de un líquido que forma mucha espuma. El valor recomendado para este factor (dato suministrado por CEPSA), es de 0,55.

$$\text{Columna 1: } V_I = 0,55 \cdot V_F = 0,55 \cdot 2,31 = 1,27 \text{ m/s}$$

$$\text{Columna 2: } V_I = 0,55 \cdot V_F = 0,55 \cdot 2,75 = 1,51 \text{ m/s}$$

2.2.3 Cálculo del área neta requerida ( $A_n$ ):

Para el cálculo del área neta se utiliza la siguiente expresión:

$$A_n = \frac{Q_v}{V_l}$$

Se necesita el valor de  $Q_v$  que corresponde a la máxima velocidad volumétrica de vapor:

$$Q_v = \frac{V \cdot PM_v}{\rho_v \cdot 3600}$$

Columna 1:

$$Q_v = \frac{12 \cdot 24,81}{0,874 \cdot 3600} = 0,09 m^3 / s$$

Columna 2:

$$Q_v = \frac{122 \cdot 18,76}{0,608 \cdot 3600} = 1,04 m^3 / s$$

Una vez calculado estos valores, se estiman las áreas netas de plato:

Columna 1:

$$A_n = \frac{Q_v}{V_l} = \frac{0,09}{1,27} = 0,07 m^2$$

Columna 2:

$$A_n = \frac{Q_v}{V_l} = \frac{1,04}{1,51} = 0,688 m^2$$

### 2.2.4 Cálculo del área total del plato ( $A_{total}$ ):

En este parámetro se incluye el área completa del plato, tanto de la sección perforada, como derramaderos, etc.

$$A_{total} = \frac{A_n}{1 - A_w}$$

Se necesita por tanto, el área utilizada por el vertedero  $A_w$  para la cuál es necesario realizar una aproximación. De la tabla incluida en el Anexo 2.2, se empleará la siguiente expresión que corresponde a una relación entre el área neta y el área de vertedero que se puede emplear para calcular esta última. Siendo:

$$W = 0,7 T$$

Donde:

W : Longitud del vertedero

T : Diámetro de la torre

$A_w$  : Área utilizada por vertedero;  $A_w = 8,8 \% A_{total}$

Se calculan los valores de área total teniendo en cuenta este valor del área de vertedero respecto al total:

Columna 1:

$$A_{total} = \frac{0,07}{1 - 0,088} = 0,076m^2$$

Columna 2:

$$A_{total} = \frac{0,688}{1 - 0,088} = 0,754m^2$$

### 2.2.5 Cálculo del diámetro de columna (T):

A partir de la siguiente ecuación, que es función del área total, anteriormente calculada, se obtendrá el diámetro de la columna.

$$T = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{total}}{\pi}}$$

Según el diseño realizado hasta ahora, en el que se divide la torre en dos secciones de distintas características, se obtendrían dos diámetros de columna para cada una de las dos partes. Para seguir con el cálculo, nos encontramos ante dos opciones:

1. Considerar dos diámetros de columna diferentes: La torre estaría compuesta por una columna de un diámetro pequeño en lo alto, seguido por una sección troncocónica hasta la columna de mayor diámetro.
2. Considerar un solo diámetro de columna: La torre tendría el mayor de los dos diámetros calculados (columna 2). Para recalculer el diseño de la columna 1, se recomienda aumentar el espaciado entre orificios.

En la primera opción se tendrían problemas de distribución de flujo en la transición de una columna a otra, mayor coste de construcción debido a la sección troncocónica de la columna, mayores dificultades de mantenimiento en el sector de menor diámetro. Por todo ello, se elige la segunda opción, en la que toda la columna es del mismo diámetro.

El resultado para el cálculo del diámetro es:

$$T = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,754}{\pi}} = 0,99 \approx 1m$$

A partir de ahora se realizan los cálculos para la columna número 2 con este diámetro.

### 2.3 Elección del tipo de paso por plato:

La elección del tipo de paso del flujo por el plato (reverso, paso único, paso múltiple), dependerá del flujo volumétrico de líquido y del diámetro de columna. Se emplea la figura del Anexo 2.3.

#### 2.3.1 Cálculo del máximo flujo volumétrico líquido ( $Q_L$ ):

$$Q_L = \frac{L \cdot PM_L}{\rho_L \cdot 3600} = \frac{1320 \cdot 18}{945 \cdot 3600} = 6,98 \cdot 10^{-3} m^3 / s$$

Con este valor y sabiendo que el diámetro es de 1 m, se obtienen un flujo cruzado con platos de paso simple (Anexo 2.3).

#### 2.4 Cálculo de la longitud del vertedero (W):

El vertedero es la zona que permite que el líquido se lleve de un plato a otro. Estos pueden ser tuberías circulares, o simples partes de la sección de la columna eliminadas para que el fluido fluya por los platos verticalmente.

$$W = 0,7 \cdot T = 0,7 \cdot 1 = 0,7m$$

Donde:

W = Longitud del vertedero

T = Diámetro columna

2.5 Diseño de la columna 2:

Se calcularán el área de vertedero, el área activa, la necesaria para las vigas y soportes, el área de las perforaciones, etc. Y se evaluarán las pérdidas de presión para esta sección de la torre. Después se realizará el mismo cálculo para la columna 1.

2.5.1 Cálculo de la sección transversal del vertedero ( $A_w$ ):

La expresión que ya se expuso anteriormente, describía el área del vertedero como un 8,8% del área total de la columna:

$$A_w = A_{total} \cdot 0,088 = 0,785 \cdot 0,088 = 0,069m^2$$

Siendo el área de la columna:  $A_{total} = 0,785 m^2$

2.5.2 Cálculo del área activa para la lámina perforada ( $A_a$ ):

Es el área que realmente interviene en la transferencia de materia del proceso de desorción que se lleva a cabo en la columna:

$$A_a = A_{total} - 2 \cdot A_w - A_{vigas}$$

El área de las vigas ( $A_{vigas}$ ) corresponde a los soportes de los platos, a las zonas de desprendimiento y distribución, etc. En este caso, las viguetas utilizadas son de 40 mm. de espesor entre los vertederos, y en las zonas de desprendimiento y distribución estas viguetas tienen 50 mm. El soporte empleado es de tipo anillo. De todo esto resulta un área total de  $0,222 m^2$ .

$$A_a = A_{total} - 2 \cdot A_w - A_{vigas} = 0,785 - 2 \cdot 0,069 - 0,222 = 0,425m^2$$

### 2.5.3 Cálculo del área perforada ( $A_h$ ):

El área perforada ( $A_h$ ) se estimará en un 10 % del área activa. Así pues, tenemos que:

$$\frac{A_h}{A_a} = 0,1 \quad A_h = 0,1 \cdot 0,425 = 0,042m^2$$

Para continuar con el diseño son necesarios una serie de datos. Se parte de las siguientes condiciones de diseño dadas por el fabricante:

- Diámetro de los orificios del plato ( $d_o$ ) = 4,5 mm
- Distribución de los orificios en forma de triángulo equilátero.
- Hoja de acero inoxidable de 3 mm de espesor
- Distancia standard entre platos ( $t_p$ ) = 0,61 m
- Altura del vertedero ( $h_w$ ) = 0,050 m

### 2.5.4 Cálculo de la velocidad de lloriqueo ( $V_h$ ):

El menor rango de operación tiene lugar cuando el líquido que gotea a través de los orificios del plato llega a ser excesivo. Es lo que se conoce como velocidad de lloriqueo. En este punto, la velocidad del vapor es la mínima para que la operación se mantenga estable. El área de orificios debe ser elegida de modo que la velocidad mínima del gas a través de los orificios siga siendo mayor en todo momento que la velocidad de lloriqueo.

Por tanto se deben comparar estos dos parámetros los cuales, se pasan a calcular a continuación.

Para el cálculo de la velocidad de lloriqueo se necesita el factor  $K_2$  que se obtiene de la gráfica del Anexo 2.4, para poder resolver la siguiente expresión:

$$V_h(\text{min}) = \frac{[k_2 - 0,9 \cdot (25,4 - d_o)]}{\rho_v^{1/2}}$$

El término  $h_w + h_{ow}$  corresponde a la altura que tomará el líquido en el vertedero. Se suman la altura del vertedero que se ha supuesto en 50 mm, con la cresta del vertedero. Para este cálculo se necesitan los caudales líquidos que se pueden llegar a tener en el plato. Se estiman los valores máximos y mínimos de cada uno para tener el rango de valores de cresta de vertedero.

Máximo caudal másico líquido  $\max Q_{ML} = \frac{L \cdot PM_L}{3600} = \frac{1320 \cdot 18,76}{3600} = 6,87 \text{ Kg/s}$

Mínimo caudal másico líquido  $\min Q_{ML} = 0,7 \cdot \max Q_{ML} = 4,81 \text{ Kg/s}$

Así pues, la pérdida de carga por cresta:

Máxima pérdida carga  $\max h_{ow} = 750 \left( \frac{\max Q_{ML}}{\rho_L \cdot W} \right)^{2/3}$

$$\max h_{ow} = 750 \left( \frac{6,87}{945 \cdot 0,7} \right)^{2/3} = 35,7 \text{ mm}$$

Mínima pérdida carga  $\min h_{ow} = 750 \left( \frac{\min Q_{ML}}{\rho_L \cdot W} \right)^{2/3}$

$$\min h_{ow} = 750 \left( \frac{4,81}{945 \cdot 0,7} \right)^{2/3} = 28,15 \text{ mm}$$

Lo que se intenta calcular es la velocidad mínima del líquido, por lo que empleamos la menor pérdida de carga:  $h_w + h_{ow} = 50 + 28,15 = 78,15 \text{ mm}$

Empleando la gráfica del Anexo 2.4 se obtiene un valor de  $k_2 = 30,8$ .

Con este valor, se calcula la velocidad de lloriqueo:

$$V_h(\text{min}) = \frac{[30,8 - 0,9 \cdot (25,4 - 4,5)]}{0,608^{1/2}} = 15,38 \text{ m/s}$$

El valor mínimo de velocidad del gas en la columna, se estima en un 70% del valor máximo del caudal volumétrico que ya ha sido calculado ( $Q_v = 1,04 \text{ m}^3/\text{s}$ ):

$${}_{\text{actual}} V_h(\text{min}) = \frac{0,7 \cdot Q_v}{A_h} = \frac{0,7 \cdot 1,04}{0,042} = 17,3 \text{ m/s}$$

$$17,3 > 15,38$$

Se comprueba que se supera la velocidad de lloriqueo actual, por lo que el diseño es adecuado.

### 2.5.5 Cálculo de las pérdidas de carga:

En el cálculo de la caída de presión total del plato, se incluyen los siguientes términos dentro de la expresión:

$$h_T = h_D + (\max h_{ow} + h_w) + h_r$$

Donde:

- $h_t$  : Caída de presión total
- $h_D$  : Caída de presión en plato seco
- $h_{ow}$  : Caída de presión por cresta en vertedero
- $h_w$  : Altura del vertedero
- $h_r$  : Caída de presión residual

2.5.5.1 Cálculo de caída de presión en plato seco ( $h_D$ ):

Es el resultado de la pérdida de presión a la entrada de las perforaciones, la fricción dentro del pequeño tubo que forman los orificios (debido al espesor del plato) y debido a las pérdidas a la salida. Se emplea la fórmula:

$$h_D = 51 \cdot \left( \frac{V_h}{C_o} \right)^2 \cdot \frac{\rho_V}{\rho_L}$$

Se necesita tener la velocidad a través de los orificios ( $V_h$ ):

$$V_h = \frac{Q_V}{A_o} = \frac{1,04}{0,042} = 24,76 \text{ m/s}$$

Para el cálculo del coeficiente de orificio  $C_o$  se utiliza la gráfica del Anexo 2.5. Para emplear esta gráfica se requieren los factores:

$$\frac{A_h}{A_o} \cdot 100 = 10 \quad \frac{\text{Espesor de plato}}{\text{Diámetro de orificio}} = \frac{3}{4,5} = 0,66$$

Se obtiene un valor de  $C_o = 0,74$

$$h_D = 51 \cdot \left( \frac{24,76}{0,74} \right)^2 \cdot \frac{0,608}{945} = 36,6 \text{ mm}$$

2.5.5.2 Cálculo de la caída de presión residual ( $h_r$ ):

Es el resultado de vencer la tensión superficial cuando el gas sale a través de una perforación.

$$h_r = \frac{12,5 \cdot 10^3}{\rho_L} = \frac{12,5 \cdot 10^3}{945} = 13,22 \text{ mm}$$

Una vez calculados todos los términos, se tiene la caída de presión total del plato:

$$h_T = 36,6 + (35,7 + 50) + 13,2 = 135,5 \text{ mm}$$

Se había asumido 100 mm de pérdida de carga para el cálculo de la presión. El cálculo debería de repetirse con otra estimación pero sabiendo que un pequeño cambio en las propiedades físicas puede tener efectos en el diseño del plato de considerable magnitud, los 135 mm por plato se considera una pérdida aceptable.

#### 2.5.6 Cálculo del retroceso en el vertedero ( $h_b$ ):

Es la diferencia en el nivel del líquido dentro e inmediatamente afuera del vertedero. Será la suma de las pérdidas de presión que resultan del flujo de líquido y del gas en el plato superior:

$$h_b = h_w + h_{ow} + h_T + h_{dc}$$

Donde:

- $h_b$  : Retroceso en el vertedero
- $h_T$  : Caída de presión total del plato
- $h_{ow}$  : Caída de presión por cresta en vertedero
- $h_w$  : Altura del vertedero
- $h_{dc}$  : Caída de presión en vertedero

Para la caída de presión en vertedero se utiliza la expresión:

$$h_{dc} = 166 \cdot \left( \frac{\max Q_{ML}}{\rho_L \cdot A_{ap}} \right)$$

Donde:

$\max Q_{ML}$  : Máximo caudal másico líquido;  $\max Q_{ML} = 6,87 \text{ Kg/s}$

$A_{ap}$  : Área limpia bajo vertedero, se calcula:

$$h_{ap} = h_w - 10 = 50 - 10 = 40 \text{ mm}$$

$$A_{ap} = W \cdot h_{ap} = 0,7 \cdot 0,04 = 0,028 \text{ m}^2$$

Se resuelven las fórmulas para el cálculo de la pérdida de carga en vertedero y para obtener el retroceso del mismo:

$$h_{dc} = 166 \cdot \left( \frac{6,87}{945 \cdot 0,028} \right) = 11,2 \text{ mm}$$

$$h_b = h_w + h_{ow} + h_t + h_{dc}$$

$$h_b = 50 + 35,5 + 135 + 11,2 = 232 \text{ mm}$$

### 2.5.7 Verificación de inundación del plato:

Seguidamente se comprobará que la distancia entre platos es lo suficientemente grande como para que no se produzca inundación en el plato, fenómeno que impide la transferencia de materia. Se debe cumplir que:

$$h_b + h_w < \frac{t_p}{2}$$

Donde:

$h_b$  : Retroceso en el vertedero;  $h_b = 0,232 \text{ mm}$ .

$h_w$  : Altura del vertedero;  $h_w = 0,05 \text{ mm}$

$t_p$  : Distancia entre platos;  $t_p = 0,61$

$$0,232 + 0,050 < \frac{0,61}{2}$$

$$\mathbf{0,237 < 0,305}$$

### 2.5.8 Cálculo del arrastre:

Con este parámetro se puede apreciar la fracción de líquido que es arrastrada por el vapor ascendente hacia el plato superior.

Se empleará la figura del Anexo 2.6, que utiliza el factor  $F_{LV}$  (0,274), y el porcentaje de inundación que se calcula a partir de la velocidad actual del gas y la velocidad superficial del gas:

La velocidad actual en función del área neta:

$$V_v = \frac{Q_v}{A_n} = \frac{1,04}{0,688} = 1,51 \text{ m/s}$$

El porcentaje de inundación resulta:

$$\% \text{ inundación} = \frac{V_v}{V_F} = \frac{1,51}{2,75} = 0,55$$

$$\% \text{ inundación} = 55 \%$$

Donde:

$V_F$  : Velocidad superficial del gas;  $V_F = 2,75 \text{ m/s}$

$V_v$  : Velocidad actual del gas

Se resuelve utilizando el Anexo 2.6 y comprobando que la fracción de arrastre es menor que 0,1 que es el valor máximo que se permite.

$$\mathbf{\Psi = 0,003 < 0,1}$$

2.6 Diseño de la columna 1:

Se calculan a partir de ahora, los parámetros correspondientes a los platos de la columna pequeña en la parte superior del stripper.

Se recopilan a continuación, los datos necesarios que ya han sido calculados para esta sección:

$L = 94,7 \text{ Kmol/h}$	Caudal molar líquido
$V = 12 \text{ Kmol/h}$	Caudal molar vapor
$PM_{\text{gas}} = 24,81 \text{ Kg/mol}$	Peso molecular vapor
$PM_{\text{líquido}} = 18,87 \text{ Kg/mol}$	Peso molecular líquido
$\rho_V = 0,874 \text{ Kg/m}^3$	Densidad vapor
$\rho_L = 834,4 \text{ Kg/m}^3$	Densidad líquido
$F_{LV} = 0,255$	Factor flujo líquido – vapor
$V_F = 2,31 \text{ m/s}$	Velocidad superficial gas
$V_I = 1,27 \text{ m/s}$	Velocidad inundación
$Q_V = 0,09 \text{ m}^3/\text{s}$	Caudal volumétrico vapor
$T = 1 \text{ m}$	Diámetro de plato
$W = 0,7 \text{ m}$	Longitud del vertedero
$A_{\text{total}} = 0,785 \text{ m}^2$	Área total de plato
$A_d = 0,069 \text{ m}^2$	Área de vertedero
$A_a = 0,425 \text{ m}^2$	Área activa
$h_w = 0,050 \text{ m}$	Altura del vertedero
$t_p = 0,61 \text{ m}$	Distancia Standard entre platos

Como ya se nombró antes, al utilizar platos del mismo diámetro para toda la columna, la solución adoptada es aumentar el pitch del plato, disminuyendo así el área perforada y ajustándose los parámetros al nuevo caudal. En este caso, se toma el área perforada ( $A_h$ ) como un 1 % del área activa. Así pues, se obtiene:

$$\frac{A_h}{A_a} = 0,01 \quad A_h = 0,01 \cdot 0,425 = 0,0042 \text{ m}^2$$

2.6.1 Cálculo de la velocidad de lloriqueo ( $V_h$ ):

Se calculan como en el caso anterior, los datos de caudales máxicos en los límites del rango de operación, y las pérdidas de carga que conllevan:

$$\text{Máximo caudal máxico líquido} \quad \max Q_{ML} = \frac{L \cdot PM_L}{3600} = \frac{94,7 \cdot 18,8}{3600} = 0,5 \text{ Kg / s}$$

$$\text{Mínimo caudal máxico líquido} \quad \min Q_{ML} = 0,7 \cdot \max Q_{ML} = 0,35 \text{ Kg / s}$$

$$\text{Máximo pérdida carga} \quad \max h_{ow} = 750 \left( \frac{0,5}{834,4 \cdot 0,7} \right)^{2/3} = 6,76 \text{ mm}$$

$$\text{Mínima pérdida carga} \quad \max h_{ow} = 750 \left( \frac{0,35}{834,4 \cdot 0,7} \right)^{2/3} = 5,33 \text{ mm}$$

La menor pérdida de carga corresponde a:  $h_w + h_{ow} = 50 + 5,33 = 55,5 \text{ mm}$

Con la ayuda de la figura del Anexo 2.4 se obtiene el valor de  $k_2 = 30,2$ .

Con este valor, se calcula la velocidad de lloriqueo:

$$V_h(\text{min}) = \frac{[30,2 - 0,9 \cdot (25,4 - 4,5)]}{0,874^{1/2}} = 12,18 \text{ m / s}$$

Y se compara con la mínima velocidad que puede alcanzar el vapor:

$$\text{actual } V_h(\text{min}) = \frac{0,7 \cdot Q_v}{A_h} = \frac{0,7 \cdot 0,09}{0,0042} = 15,3 \text{ m / s}$$

$$15,3 > 12,2$$

Se comprueba que se supera la velocidad de lloriqueo actual, por lo que el diseño es adecuado.

### 2.6.2 Cálculo de las pérdidas de carga

La expresión ya conocida:

$$h_T = h_D + (\max h_{ow} + h_w) + h_r$$

#### 2.6.2.1 Cálculo de la caída de presión en plato seco ( $h_D$ ):

$$h_D = 51 \cdot \left( \frac{V_h}{C_o} \right)^2 \cdot \frac{\rho_V}{\rho_L}$$

Se necesita calcular previamente la velocidad a través de los orificios ( $V_h$ ):

$$V_h = \frac{Q_V}{A_o} = \frac{0,09}{0,0042} = 21,42 \text{ m/s}$$

Y utilizando el Anexo 2.5 y con los factores correspondientes se obtiene el valor de  $C_o$  empleado en la formula:

$$\frac{A_h}{A_o} \cdot 100 = 1 \quad \frac{\text{Espesor de plato}}{\text{Diámetro de orificio}} = \frac{3}{4,5} = 0,66$$

Se obtiene un valor de  $C_o = 0,67$

$$h_D = 51 \cdot \left( \frac{21,42}{0,67} \right)^2 \cdot \frac{0,874}{834,4} = 54,6 \text{ mm}$$

2.6.2.2 Cálculo de la caída de presión residual ( $h_r$ ):

$$h_r = \frac{12,5 \cdot 10^3}{\rho_L} = \frac{12,5 \cdot 10^3}{834,4} = 14,98 \approx 15 \text{ mm}$$

Una vez calculados todos los términos, se tiene la caída de presión total del plato:

$$h_r = 54,6 + (6,76 + 50) + 15 = 126 \text{ mm}$$

Al igual que en el caso anterior, 126 mm, se considera una pérdida de carga aceptable.

2.6.3 Cálculo del retroceso en el vertedero ( $h_b$ ):

Se calcula en primer lugar la caída de presión en vertedero:

$$h_{dc} = 166 \cdot \left( \frac{\max Q_{ML}}{\rho_L \cdot A_{ap}} \right)$$

Donde:

$\max Q_{ML}$  : Máximo caudal másico líquido;  $\max Q_{ML} = 0,50 \text{ Kg/s}$

$A_{ap}$  : Área limpia bajo vertedero

El valor de  $A_{ap}$  ya fue calculado para los platos de la columna 2, resultando un valor de  $0,028 \text{ m}^2$ .

$$h_{dc} = 166 \cdot \left( \frac{0,50}{834,4 \cdot 0,028} \right) = 0,12 \text{ mm}$$

$$h_b = h_w + h_{ow} + h_t + h_{dc}$$

$$h_b = 50 + 6,76 + 126 + 0,12 = 182 \text{ mm}$$

2.6.4 Verificación de inundación del plato:

Seguidamente se comprobará que la distancia entre platos es lo suficientemente grande como para que no se produzca inundación en el plato. Se debe cumplir que:

$$h_b + h_w < \frac{t_p}{2}$$

Donde:

$h_b$  : Retroceso en el vertedero;  $h_b = 0,182$  mm.

$h_w$  : Altura del vertedero;  $h_w = 0,05$  mm

$t_p$  : Distancia entre platos;  $t_p = 0,61$

$$0,182 + 0,050 < \frac{0,61}{2}$$

$$\mathbf{0,187 < 0,305}$$

2.6.5 Cálculo del arrastre:

Con este parámetro se puede apreciar la fracción de líquido que es arrastrada por el vapor ascendente hacia el plato superior.

Se emplea de nuevo el Anexo 2.6, que utiliza el factor  $F_{LV}$  (0,274), y el porcentaje de inundación que se calcula a partir de la velocidad actual del gas y la velocidad superficial del gas:

La velocidad actual en función del área neta:

$$V_v = \frac{Q_v}{A_n} = \frac{0,09}{0,688} = 0,135 \text{ m/s}$$

El porcentaje de inundación resulta:

$$\%_{\text{inundación}} = \frac{V_v}{V_F} = \frac{0,135}{2,31} = 0,054$$

$$\%_{\text{inundación}} = 5,4 \%$$

Donde:

$V_F$  : Velocidad superficial del gas;  $V_F = 2,31$  m/s

$V_v$  : Velocidad actual del gas

Se resuelve utilizando la gráfica del Anexo 2.6, y se verifica que la fracción de arrastre es menor que 0,1 que es el valor máximo que se permite.

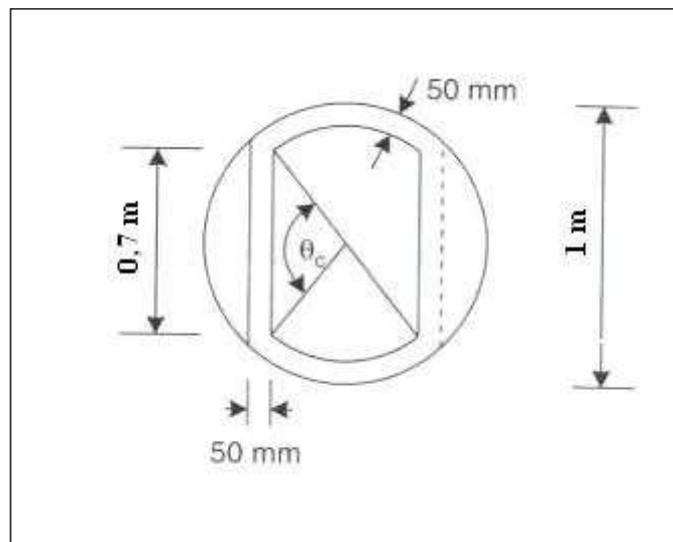
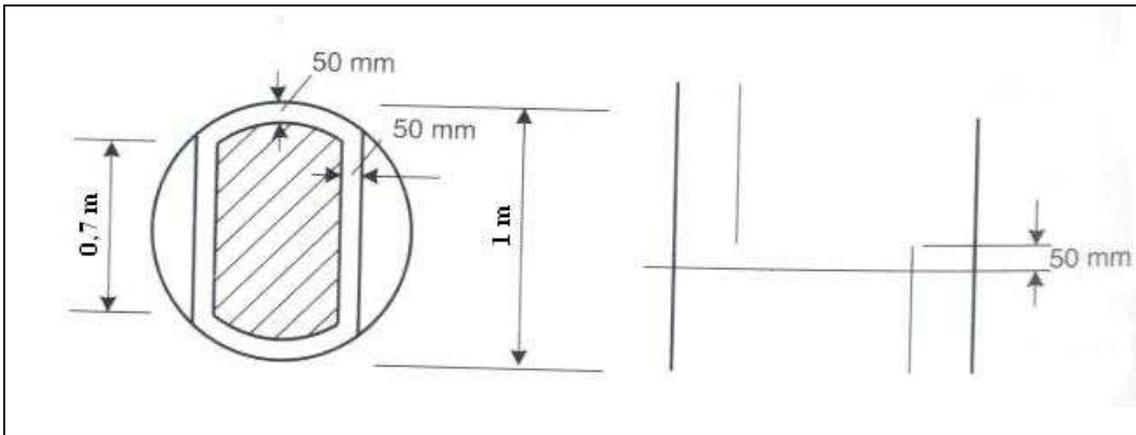
## 2.7 Cálculo del pitch

El pitch o espaciado de los orificios del plato, es el factor diferenciador en el diseño de las dos columnas. En ambos casos se ha seleccionado hojas de acero inoxidable de 3 mm de espesor, con un diámetro de orificio de 4,5 mm. y una distribución de los orificios en forma de triángulo equilátero.

Según la tabla del Anexo 2.2, se ha seleccionado una relación  $W / T = 0,7$ . Observando el dibujo, deben definirse los siguientes parámetros:

- Se considera el ángulo  $\theta_c = 91^\circ$ , según la gráfica del Anexo 2.7.
- Por tanto, el ángulo del borde que sustenta el plato será  $180 - 91 = 89^\circ$ .

Se procede a calcular una serie de parámetros geométricos necesarios para obtener finalmente el área real de las perforaciones.



Figuras 2.1 (a) y (b): Representación de parámetros del plato real

### 2.7.1 Cálculo de la longitud del arco que sustenta el plato ( $S_L$ ):

$$S_L = (T - e) \cdot \pi \cdot \frac{\theta_s}{180}$$

Donde:

$S_L$  : Longitud del arco que sustenta el plato

$T$  : Diámetro del plato;  $T = 1$  m

$\theta_s$  : Angulo del borde que sustenta el plato;  $\theta_s = 89^\circ$

$e$  : Ancho sin perforar;  $e = 50$  mm.

$$S_L = (1 - 0,05) \cdot \pi \cdot \frac{89}{180} = 1,49m$$

### 2.7.2 Cálculo del sector de corona circular que sustenta el plato ( $S_a$ ):

$$S_a = S_L \cdot e = 1,49 \cdot 0,05 = 0,0745m^2$$

### 2.7.3 Cálculo de la zona de calma:

La longitud  $C_L$  será la del vertedero más el espesor que se ha considerado de 50 mm.

$$C_L = W + e = 0,7 + 0,05 = 0,75m$$

Y el área de esta zona responde a la formula:

$$C_a = 2 \cdot (C_L \cdot e) = 2 \cdot (0,75 \cdot 0,05) = 0,075m^2$$

### 2.7.4 Cálculo del área total perforada ( $A_o$ ):

Corresponde al área activa menos el área de la zona de calma y del sector de corona no perforado:

$$A_o = A_a - S_a - C_a$$

Donde:

$A_a$  : Área activa;  $A_a = 0,425 m^2$

$S_a$  : Área de la corona sin perforar;  $S_a = 0,0745 m^2$

$C_a$  : Área de las zonas de calma;  $C_a = 0,075 m^2$

$$A_o = 0,425 - 0,0745 - 0,75 = 0,2755m^2$$

Ahora, para cada columna, con los valores del área de orificios ( $A_h$ ), se obtiene el coeficiente  $A_h/A_o$  que se utiliza de forma diferente dependiendo de la columna.

Columna 1:

$$\frac{A_h}{A_o} = \frac{0,0042}{0,2755} = 0,0152$$

Columna grande

$$\frac{A_h}{A_o} = \frac{0,043}{0,2755} = 0,142$$

2.7.5 Cálculo del área de un orificio ( $O_a$ ):

$$O_a = \pi \cdot \frac{d_h^2}{4} = \pi \cdot \frac{0,0045^2}{4} = 1,59 \cdot 10^{-5} m^2$$

Donde:

$d_h$ : Diámetro de un orificio;  $d_h = 4,5$  mm.

2.7.6 Cálculo del pitch de la columna 1:

Para la columna pequeña se utiliza la siguiente expresión:

$$\frac{A_h}{A_p} = 0,9 \cdot \left( \frac{d_h}{l_p} \right)^2$$

Donde:

$d_h$  : Diámetro de un orificio;  $d_h = 4,5$  mm.

$l_p$  : Pitch

El valor del coeficiente entre áreas para la columna 1 era de 0,0152.

$$0,0152 = 0,9 \cdot \left( \frac{0,0045}{l_p} \right)^2$$

$$l_p = 35mm$$

### 2.7.7 Cálculo del pitch de la columna 2:

Para la columna grande se utiliza la gráfica del Anexo 2.8 donde  $l_p/d_h = 2,6$ . Así, el pitch ( $l_p$ ) de los platos de esta sección queda:

$$l_p = 2,6 \cdot d_h = 2,6 \cdot 0,0045 = 12mm$$

$$l_p = 12mm$$

### 2.7.8 Cálculo del número de orificios:

Dividiendo el área de perforaciones entre el área de un orificio, tendremos el número de orificios por cada plato, para las distintas columnas:

$$\text{Columna 1: } N_{\text{orificios}} = 265$$

$$\text{Columna 2: } N_{\text{orificios}} = 2640$$

## **B. CÁLCULO DEL ESPESOR Y EL PESO DE LA COLUMNA**

### 2.8 Consideraciones previas

Para el cálculo de un recipiente a presión, por lo general se necesitan los siguientes datos:

- Presión de diseño
- Temperatura de diseño
- Corrosión máxima admisible
- Tipo de material
- Inspección radiográfica

La presión de diseño (P), se debe fijar en todo caso mayor a la máxima de operación o servicio. Su valor se puede obtener según datos de la tabla siguiente:

<u>OPERACIÓN</u>	<u>DISEÑO</u>
0 – 1,5	3,5 Kg/cm <sup>2</sup>
1,6 – 13,5	2 Kg/cm <sup>2</sup> + P. Operación
13,6 – 20	115% de P. Operación
20,1 – 25	3 Kg/cm <sup>2</sup> + P. Operación
> 25	112% de P. Operación

En este caso, se toma como presión de diseño 3,5 Kg/cm<sup>2</sup>.

La temperatura de diseño, al igual que la presión, debe ser también superior a la máxima que se produzca durante la operación, y es habitual adoptar como temperatura de diseño el valor de esta máxima más 40 °C.

Para el caso del stripper, la máxima temperatura es 110°C, así que se utilizan 150°C como diseño.

Se utilizará para la construcción de la torre un acero al carbono, el cual, es el más disponible y económico de los aceros, recomendables para la mayoría de los recipientes donde no existen altas temperaturas ni presiones.

La máxima corrosión admisible, considerando que estamos trabajando con un fluido donde en distintas condiciones puede llegar a ser muy corrosivo, no será menor a los 6 mm. en ningún caso.

Los recipientes a presión se calculan con unos espesores de pared capaces de soportar sin deformación la presión a la que se verán sometidos. Es decir, que la presión a la que trabaja el material sea inferior a la máxima tensión admisible (S) del mismo. Se utilizará la tabla, en función de la temperatura de diseño reseñada en el Anexo 2.9.

La unión entre chapas se realiza normalmente, por medio de soldaduras y éstas representan una discontinuidad dentro del trazado de chapa que puede producir una intensificación local de las tensiones a que se encuentra sometido el material. Por ello se considera la zona de soldadura como una zona debilitada. Teniendo en cuenta esto, en el cálculo de recipientes se introduce una reducción en la tensión máxima admisible multiplicando ésta por un coeficiente denominado eficiencia de la soldadura (E), cuyo valor varía según las normas o códigos, y de acuerdo a la soldadura y los controles efectuados sobre ella.

### 2.9 Cálculo del espesor de la virola de la columna:

El espesor de la virola cilíndrica que compone el grueso de la torre de stripping, se puede determinar mediante la utilización de la siguiente formula:

$$t' = \frac{PR}{(SE - 0,6 \cdot P)}$$

Donde:

t' : Espesor de la virola sin considerar la corrosión.

P : Presión de diseño;  $P = 3,5 \text{ Kg/cm}^2 \approx 60 \text{ psi}$

E : Eficiencia de soldadura; E = 0,85

S : Tensión máxima admisible; S = 14700 psi (Anexo 2.9)

R : Radio de la columna

Para calcular el radio de la columna se considerará el diámetro (T) y la corrosión admisible:

$$R = \frac{T \cdot 12''}{2} + 0,2362'' = 19,92''$$

Donde T = 1 m = 3,28 ft

$$t' = \frac{60 \cdot 19,92}{(14700 \cdot 0,85 - 0,6 \cdot 60)} = 0,09''$$

Para el cálculo del espesor final de la columna, se considera un sobreespesor por corrosión de unos 6 mm. (0,2362''):

$$t = t' + 0,2362'' = 0,3262''$$

$$t = 8,3mm$$

## 2.10 Cálculo del espesor de fondo y casco:

Los recipientes sometidos a presión pueden estar contruidos por diferentes tipos de tapas o fondos. Cada una de ellas es más recordable a ciertas condiciones de operación y coste. Todos los fondos del código ASME están contruidos a partir de chapa, a la cual, mediante estampación, se le da la forma deseada, salvo en el caso de los fondos cónicos y planos.

Los tipos de tapas o fondos más usuales son:

– Tapas planas:

Se utilizan para recipientes sujetos a presión atmosférica, generalmente, aunque en algunos casos se usan también en recipientes a presión. Su coste entre las tapas es el más bajo. Se utilizan también como fondos de tanques de almacenamiento de grandes dimensiones. Se utiliza escasamente por presentar una sección poco resistente a la presión lo que hace necesario altos espesores.

– Tapas toriesféricas:

Son las de mayor aceptación en la industria por su bajo coste y por soportar grandes presiones manométricas. Su característica principal es la relación que establecen los parámetros geométricos del diámetro principal y el radio del abombado.

– Tapas semielípticas (SE 2:1)

Son empleadas cuando el espesor calculado de una tapa toriesférica es relativamente alto, ya que las tapas semielípticas soportan mayores presiones que las toriesféricas. El proceso de fabricación de estas tapas es igualmente estampación y dada su enorme facilidad ha multiplicado su uso. Su silueta en general, describe una elipse relación 2:1, su coste es alto y resulta fundamental conocer los diámetros nominales.

– Tapas semiesféricas:

Utilizadas exclusivamente para soportar presiones críticas. Su silueta describe una media esfera soldada a la carcasa. Su radio medio es igual al medio de la carcasa. El espesor requerido para resistir la presión es inferior al requerido por la carcasa cilíndrica. Su construcción es costosa y su uso está restringido por este motivo, a casos específicos de grandes espesores.

- Tapas cónicas:

Se utilizan en fondos donde pudiese haber acumulación de sólidos y como transiciones en cambios de diámetro de recipientes cilíndricos. Su uso es común en torres fraccionadas o de destilación.

En el proyecto se ha optado por fondos y casco de tipo toriesférico, y para el cálculo de su espesor, se sigue la siguiente formula:

$$t'_f = \frac{PLM}{(2SE - 0,2 \cdot P)}$$

Todos los valores son conocidos excepto L y M que responden a las siguientes expresiones:

#### 2.10.1 Cálculo del término L

$$L = 0,8 \cdot D_{ext} + C.A.$$

Donde:

C.A. : Corrosión admisible; C.A. = 0,2362"

$D_{ext}$  : Diámetro exterior de columna

$$D_{ext} = T \cdot 12" + 2 \cdot t = 3,28 \cdot 12" + 2 \cdot 0,3262 = 40,01"$$

$$L = 0,8 \cdot D_{ext} + C.A. = 0,8 \cdot 40,01 + 0,2362 = 32,25"$$

#### 2.10.2 Cálculo del término M:

$$M = 0,25 \cdot \left( 3 + \sqrt{\frac{L}{r}} \right)$$

Donde:

$$r = \frac{D_{ext}}{6,5} + C.A. = \frac{40,01}{6,5} + 0,2362 = 6,4''$$

Se resuelve la ecuación para M:

$$M = 0,25 \cdot \left( 3 + \sqrt{\frac{32,25}{6,4}} \right) = 1,311$$

Por último se calcula el espesor de fondo y casco:

$$t'_f = \frac{60 \cdot 32,25 \cdot 1,311}{(2 \cdot 14700 \cdot 0,85 - 0,2 \cdot 60)} = 0,1015''$$

Con el sobreespesor de corrosión:

$$t_f = t'_f + 0,2362 = 0,3377''$$

$$t_f = 8,58mm$$

Se tomará una chapa de ½" para cascos y fondos y se considerará el mismo espesor standard para la virola.

$$t_{columna} = 12,7 \text{ mm}$$

## 2.11 Cálculo del peso de la columna

Para el cálculo del peso de la columna es necesario conocer previamente que longitud tiene la torre.

Para ello se considerarán 4 medidas:

- Una primera que se obtiene de multiplicar los platos reales del stripper por la distancia entre platos tomada (0,619 m). Esto resulta 18,3 m.
- Una segunda distancia se considera 0,910m de referencia para dejar suficiente espacio para la entrada de la corriente de vapor.
- La altura H se debe tener en cuenta para el cálculo de la longitud de la columna, ya que esta altura es la que va a permitir el control del nivel en la columna a través de la válvula de regulación situada a la salida del fondo del stripper. Se calcula a continuación.
- Por último se toman 450 mm que se añade en la parte superior de la columna, entre el primer plato y el casco.

Estas medidas se pueden ver en la figura siguiente:

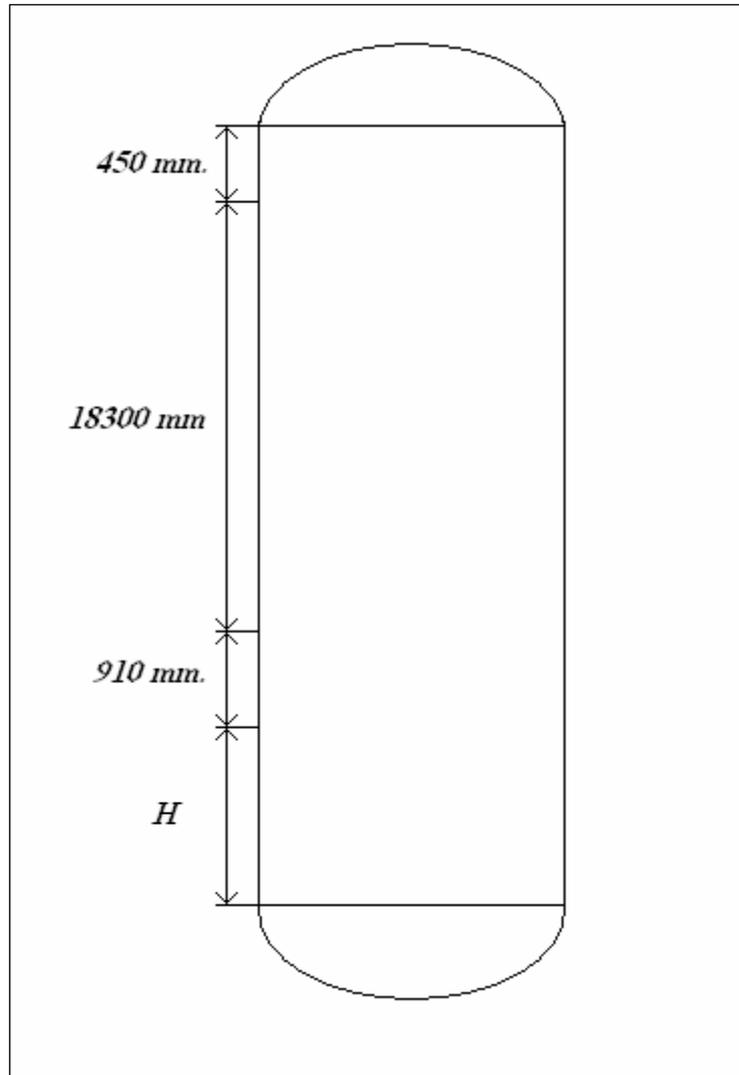


Figura 2.1: Alturas del stripper

#### 2.11.1 Cálculo del término H:

Es una medida standard que puede ser de 14", 32", 48", 60",... Con los datos del máximo caudal másico y su densidad se obtiene un caudal volumétrico:

$$Q_L = \frac{Q_m}{\rho_L} = \frac{24037}{980} = 24,52 m^3 / h = 0,408 m^3 / \text{min}$$

El volumen comprendido en la altura H, es igual al área de la sección circular de la columna para esa altura.

El área de la sección circular de la columna es:

$$A = \pi \cdot \frac{T^2}{4} = \pi \cdot \frac{1^2}{4} = 0,785 m^2$$

Se estima un tiempo de residencia (TR) superior a los dos minutos (tiempo estimado para la respuesta de la válvula automática), con lo que:

$$TR = \frac{V_L}{Q_L}$$

Donde:

$V_L$  : Volumen de líquido comprendido en la altura H.

$Q_L$  : Caudal de líquido;  $Q_L = 0,408 m^3/\text{min}$

A continuación se prueba las distintas medidas standards hasta coger la mínima que supere los dos minutos de tiempo de residencia.

Se comienza por  $H = 48'' = 1,219 m$

$$V_L = A \cdot H = 0,785 \cdot 1,219 = 0,957 m^3$$

$$TR = \frac{V_L}{Q_L} = \frac{0,957}{0,408} = 2,34 \geq 2 \text{ min}$$

Con lo cual la suposición es válida. Finalmente se calcula la longitud total de la columna, empleando para el cálculo, dos veces el valor de H:

$$L = 18,3 + 0,450 + 0,910 + 2 \cdot 1,219 = 22,1m$$

Una vez obtenida la longitud de la columna ( $L = 22,1$  m) se puede proceder al cálculo del peso de la columna.

### 2.11.2 Cálculo del peso de la virola y los fondos:

Para el cálculo aproximado del peso de una carcasa esférica de fondos curvados (cualquier tipo), de paredes con espesor uniforme, se puede seguir una ecuación que en el caso de acero al carbono se simplifica del siguiente modo:

$$W_v = 240 \cdot C_v \cdot D_m \cdot (H_v + 0,8 \cdot D_m) \cdot t$$

Donde:

$W_v$  : Peso total de la carcasa y los fondos.

No incluye el peso de los platos, el cuál se calculará más tarde.

$C_v$  : Factor correspondiente al peso de tubuladuras, bocas de hombre, y otros aspectos internos. Para columnas de destilación o depósitos similares, con numerosas bocas de hombre, soportes de anillo para platos y otros, se considera un valor de 1,15.

$H_v$  : Altura entre líneas de tangencia, que ya se ha calculado anteriormente y corresponde a un valor de 20,3 m.

$t$  : Espesor de la columna (mm)

$D_m$  : Diámetro externo de la columna considerado según la expresión:

$$D_m = T + t \cdot 10^{-3} = 1 + 0,0127 = 1,0127m$$

Así pues, el cálculo del peso queda:

$$W_v = 240 \cdot 1,15 \cdot 1,0127 \cdot (22,1 + 0,8 \cdot 1,0127) \cdot 12,7 = 74935N$$

$$W_v \approx 75KN$$

$$W_n = \frac{75000N}{9,8 \frac{N}{Kg}} = 7655Kg$$

### 2.11.3 Cálculo del peso de los platos:

Para el cálculo de otros parámetros relacionados con el peso del stripper, se proporcionan bastantes valores en la bibliografía: distintos tipos de escaleras, plataformas, para distintos materiales, etc. Por ser el valor más significativo en lo que respecta al peso final, se calculará la aportación de los platos. Según datos consultados en bibliografía, se considerará 1,2 KN/m<sup>2</sup> de área de plato. Se calcula por tanto el área de un plato:

$$Area = \pi \cdot \frac{T^2}{4} = \pi \cdot \frac{1^2}{4} = 0,785m^2$$

$$Peso \text{ de un plato} = 1,2 \cdot Area = 1,2 \cdot 0,785 = 0,943KN$$

$$Peso \text{ de los platos} = N \cdot 0,943 = 30 \cdot 0,943 = 28,3KN$$

$$Peso \text{ de los platos} = \frac{28300N}{9,8 \frac{N}{Kg}} = 2890Kg$$

### 2.11.4 Cálculo del peso total de la columna:

Se considera el peso de las bocas de hombre según la gráfica tal, se incluirán 4 bocas de hombre de 24", cada una de ellas pesa 240 Kg.

Por tanto el peso total de la columna queda de sumar todos los anteriores:

$$Peso_{Total} = 7655 + 2890 + 960 \approx 11500Kg$$

### **3. PRECALENTADOR DE CARGA**

#### **3.1 Consideraciones previas**

Se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se considerarán fluidos, tanto caliente como frío, con las propiedades físico-químicas del agua, ya que el amoniaco y el ácido sulfhídrico se encuentran en ppm.
- Las bases de diseño del intercambiador se han sacado a partir del código TEMA sección R (que recoge las condiciones de diseño para intercambiadores que trabajan en condiciones severas).
- A la hora de decidir por donde circulará cada uno de los fluidos del proceso, las normas indican que el fluido que circule por tubos será el que primero cumpla alguna de las siguientes características:
  - Ser agua de refrigeración
  - Ser el fluido más corrosivo, o con depósitos de coque o sedimentos.
  - Ser el más sucio.
  - Ser el menos viscoso.
  - Ser el sometido a mayor presión.
  - Ser el fluido más caliente.
  - Ser el líquido de menor volumen.

Además debe tenerse en cuenta que:

- El vapor condensante siempre estará en carcasa.
- El fluido con un  $\Delta T$  alto pasará mejor por carcasa.

Estas directrices se rigen de forma que el ensuciamiento sea el menor posible y que se produzca la menor pérdida de carga. En el caso del proyecto, el fluido más

corrosivo (agua ácida alimentación) pasa por los tubos lo que minimiza los costes del equipo (material para distribuidor y haz tubular frente al necesario para carcasa y haz tubular exterior).

### 3.2 Metodología básica para el diseño

Los pasos a seguir en el diseño del intercambiador de calor entre la carga y el fondo del stripper son los siguientes:

1. Definir el duty del intercambiador: velocidades transferencia calor, flujos, temperaturas.
2. Recoger las propiedades físicas de los fluidos que se necesiten a las temperaturas calóricas correspondientes: densidad, viscosidad, conductividad térmica.
3. Decidir el tipo de intercambiador a utilizar.
4. Suponer un valor inicial de coeficiente global de transmisión U.
5. Calcular la temperatura media logarítmica.
6. Calcular el área provisional requerida.
7. Calcular el número de tubos del intercambiador y buscar los valores estándar más próximos.
8. Recalcular el valor supuesto de U y de área de intercambio.
9. Calcular los coeficientes individuales de carcasa y tubo.
10. Calcular el coeficiente global y compararlo con el supuesto.
11. Calcular las caídas de presión del intercambiador.

#### 3.2.1 Fundamentos del cálculo de intercambiadores de calor

La ecuación general de transmisión de calor es:

$$Q = U \cdot A \cdot MTD$$

Donde:

U : Coeficiente global de transferencia de calor

Q : Caudal de calor intercambiado entre fluidos

A : Área de transferencia de calor

MTD: Temperatura media logarítmica

El primer objetivo es el cálculo del área de intercambio de calor requerida para un duty determinado, utilizando un determinado salto térmico.

En la mayoría de los casos, la temperatura de ambos fluidos va variando a lo largo de la longitud de los tubos, por lo que  $\Delta T$  no es constante. En este caso, se sustituye este término por la temperatura media logarítmica (LMTD), definida como:

$$LMTD = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln\left(\frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}\right)}$$

Donde:

T<sub>1</sub> : Fluido de entrada a carcasa

T<sub>2</sub> : Fluido de salida de carcasa

t<sub>1</sub> : Fluido de entrada a tubos

t<sub>2</sub> : Fluido de salida de tubos

El valor de T<sub>2</sub> - t<sub>1</sub> se conoce como "approach" del intercambiador. Un valor de approach cercano a 0, hace que el área tienda a infinito, con lo que no es conveniente desde el punto de vista económico. Así pues, es necesario limitar este valor en ciertos límites que dependerán del valor de U.

Con coeficientes altos de U, se recomiendan valores bajos de approach (5-10 °C), siendo el producto del coeficiente y la temperatura media logarítmica, suficiente para obtener áreas razonables.

Con coeficientes bajos de U, se puede llegar a tener problemas en el cociente Q/A, por eso se limita entorno a (20-30 °C).

El valor de U es definido por la resistencia global a la transferencia de calor, y es suma de resistencias individuales de los distintos procesos involucrados. La magnitud de estos coeficientes individuales dependerá de la naturaleza del proceso de transferencia (conducción, convección, condensación, radiación, ebullición), de las propiedades físico químicas de los fluidos, de los caudales, de las propiedades de la superficie, etc.

Con las formulas anteriormente expuestas, se puede obtener un valor muy aproximado del área (A) del intercambiador de calor a emplear para precalentar la corriente de aguas ácidas que entra al stripper.

Para obtener las variables anteriores, es necesario conocer previamente otras variables como son:

- Caudales máxicos de circulación de los fluidos
- Temperaturas de entrada y salida
- Propiedades físicas y térmicas de los fluidos
- Calor intercambiado

Con el conjunto de estas variables y el tipo de equipo que se va a emplear para el intercambio de calor se puede obtener el valor del área (A).

### 3.3 Características de las corrientes

Los datos de caudales de los fluidos que circulan por carcasa y tubos son:

TUBOS: 22150 Kg/h	40°C hasta 95°C	$C_{p_m} = 4,15 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{C}$
CARCASA: 21892 Kg/h	110°C hasta "60°C"	$C_{p_m} = 4,20 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{C}$

La disposición de los fluidos en el precalentador será:

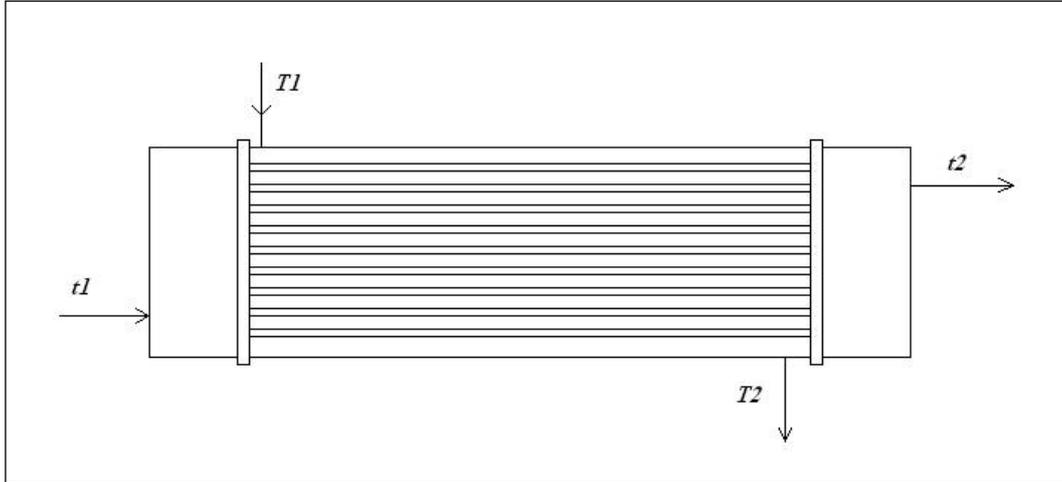


Figura 3.1: Corrientes del precalentador de carga

Donde:

$T_1$  : Agua desorbida (fluido caliente, carcasa) = 110 °C

$T_2$  : Agua desorbida (fluido frío, carcasa)

$t_1$  : Agua ácida (fluido frío, tubos) = 40 °C

$t_2$  : Agua ácida (fluido caliente, tubos) = 95 °C

Para calcular la temperatura de salida de la carcasa, se utiliza la siguiente expresión.

$$m_t \times C_{p_{mt}} \times \Delta T = m_c \times C_{p_{mc}} \times (T_e - T_s)$$

Con subíndice “t” para tubos y “c” para carcasa:

$m$  : Caudal másico (Kg/h)

$C_{p_m}$ : Cp medio (KJ/Kg · °C)

$T_e$  : Temperatura entrada (°C)

$T_s$  : Temperatura salida (°C)

$$22150 \times 4,15 \times (95 - 40) = 21852 \times 4,20 \times (110 - T_s)$$

$$T_s \approx 59^\circ C$$

Los valores de  $C_{p_m}$  se toman en una primera suposición como el valor a la temperatura media entre entrada y salida. La suposición es de una temperatura de salida de carcasa de  $60^\circ C$ , por lo que se toma buena esta aproximación para el resto de los cálculos.

### 3.4 Cálculo de las temperaturas calóricas:

Para el cálculo de los coeficientes de película y de las caídas de presión es necesario conocer las propiedades físico-químicas de los dos fluidos, principalmente: densidad, calor específico, conductividad térmica y viscosidad.

Puesto que los dos fluidos cambian constantemente de temperatura, es necesario determinar unas temperaturas, denominadas “calóricas”, a las cuales se considera que ocurre ese intercambio de calor. Las propiedades antes citadas deben determinarse a estas temperaturas.

Por tanto a continuación, se calcularán las temperaturas calóricas de carcasa y tubos a las que se considerarán las propiedades físico - químicas de los fluidos tanto caliente como frío. Los subíndices “s” corresponden a datos de salida y “e” a datos de entrada, tanto en carcasa como en tubos.

$$T_{carcasa} = T_s \times Fc \times (T_e - T_s)$$

$$T_{tubos} = T_e \times Fc \times (T_s - T_e)$$

El valor de  $Fc$  suele estar comprendido entre 0,3-0,5. Tomamos según bibliografía, un valor intermedio de 0,4.

$$T_{carcasa} = 60 \times 0,4 \times (110 - 60) = 80^\circ C$$

$$T_{tubos} = 40 \times 0,4 \times (95 - 40) = 62^\circ C$$

### 3.6 Propiedades físico – químicas de los fluidos

	<b>Caudal</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Densidad</b>	<b>Viscosidad</b>	<b>Cp</b>	<b>K</b>
	Kg/h	°C	Kg/m <sup>3</sup>	Cp	KJ/Kg*°C	W/m*°C
Tubos	22150	62	983	0,452	4,15	0,65
Carcasa	21852	80	972	0,354	4,2	0,67

### 3.7 Cálculo de la temperatura media logarítmica (LMTD):

Como se nombraba en la descripción de la metodología, se utiliza la siguiente expresión para el cálculo de la temperatura media logarítmica:

$$LMTD = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln\left(\frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}\right)}$$

Donde:

T<sub>1</sub> : Temperatura entrada carcasa; T<sub>1</sub> = 110 °C

T<sub>2</sub> : Temperatura salida carcasa; T<sub>2</sub> = 60 °C

t<sub>1</sub> : Temperatura entrada tubos; T<sub>1</sub> = 40 °C

t<sub>2</sub> : Temperatura salida tubos; T<sub>1</sub> = 95 °C

Sustituyendo los valores de cada temperatura:

$$LMTD = \frac{(110 - 95) - (60 - 40)}{\ln\left(\frac{110 - 95}{60 - 40}\right)} = 17,38^\circ C$$

3.8 Cálculo de la temperatura media logarítmica corregida (MTD):

Con la ayuda de la gráfica que se encuentra en el Anexo 3.1, donde se especifica para el intercambiador considerado (dos pasos por carcasa) y previo cálculo de los valores de R y S, se obtiene el valor del coeficiente de corrección  $F_c$ , para la temperatura media logarítmica corregida.

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = \frac{110 - 60}{95 - 40} = 0,85$$

$$S = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} = \frac{95 - 40}{110 - 40} = 0,78$$

Con los valores de R y S y el Anexo 3.1, que incluye la gráfica correspondiente a 2 pasos por carcasa o múltiplo, obtenemos un valor de  $F_c = 0,6$ .

$$MTD = F_c \times LMTD = 0,6 \times 17,38 = 10,43^\circ C$$

3.9 Cálculo del duty del intercambiador:

Se considera el duty del precalentador como el caudal de calor que absorbe la corriente de alimentación del stripper. Esta corriente circula por tubos y aumenta su temperatura desde 40°C hasta los 95°C con los que entra en la columna.

El cálculo se realiza mediante la fórmula:

$$Q = m_t \cdot C_{p_t} \cdot \Delta T$$

Q : Cantidad de calor intercambiado (KJ/h)

$m_t$  : Caudal másico de la corriente líquida;  $m_f = 22150$  Kg/h

$C_{p_t}$  : Calor específico del agua (bibliografía);  $C_{p_f} = 4,15$  KJ/Kg.°C

$\Delta T$  : Variación de temperatura del fluido ( $T_{salida} - T_{entrada}$ );  $\Delta T = 55^\circ C$

$$Q = m_t \cdot Cp_t \cdot \Delta T = 22150 \cdot 4,15 \cdot 55 = 5055737,5 \text{ KJ/h}$$

### 3.10 Cálculo del área y elección del cambiador:

Para el cálculo del área provisional de transferencia de calor en el intercambiador utilizamos la siguiente formula:

$$Q = U \cdot A_{prov} \cdot MTD$$

Q : Cantidad de calor intercambiado; Q = 5055737,5 KJ/h

A<sub>prov</sub> : Superficie de intercambio de calor (m<sup>2</sup>)

MTD: Temperatura media logarítmica; MTD = 10,43 °C

U : Coeficiente global de transferencia de calor

Suponemos un valor de U con la ayuda del Anexo 3.2:

$$U \approx 1100 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

Con ello, el valor del área es:

$$A_{prov} = \frac{Q}{U \cdot MTD} = \frac{5055737,5 \cdot \frac{1000}{3600}}{1100 \cdot 10,43} = 125 \text{ m}^2$$

Una vez calculada el área del precalentador podemos según la clasificación anterior, realizar la elección del intercambiador que se diseñará según el código TEMA:

#### 1. Carcasa:

Debido a que la temperatura de salida del fluido que atraviesa la carcasa (T<sub>2</sub>=60°C) es menor que la del fluido que pasa por los tubos (t<sub>2</sub>=95°C), se empleará una carcasa tipo F de dos pasos por carcasa.

## *2. Distribuidor:*

Para un mejor acceso a la hora de la limpieza se dispondrá de un distribuidor tipo A, el cual nos permite extraer el haz tubular y facilita su mantenimiento.

## *3. Cabezal de salida:*

Acorde al tipo de distribuidor elegido (tipo A), se escoge un cabezal tipo S, que es el que mejor se complementa con el distribuidor de tipo A.

Así pues, el precalentador de carga será un intercambiador del tipo “AFS”, según TEMA.

### 3.11 Configuración de los tubos del precalentador

Se realizan las siguientes consideraciones generales:

- Cuanto más largo es el intercambiador más económico resulta, aunque la elección última dependerá del espacio disponible en planta. Se toma la longitud de los tubos teniendo en cuenta este criterio. En la industria petroquímica esta longitud esta normalizada en 20 ft.
- Los diámetros de tubos están normalizados. Cuanto menores son los tubos, mayor será el área instalada en la misma sección de la carcasa. Para permitir la limpieza interior el mas frecuente es el de ¾” y a continuación 1” para limitar la pérdida de carga en caso de ser necesario o para permitir la limpieza de los tubos.
- El espesor de tubo se define por el valor de BWG y depende de la presión y temperatura de diseño, corrosividad del fluido y vida deseada del haz tubular (3-5 años). También existen valores normalizados (12, 14, 16).

- El material escogido marcará en gran medida las anteriores variables. Para el caso del precalentador se elige acero al carbono ya que los fluidos que circulan por carcasa y tubos están compuestos mayoritariamente por agua con ppm de ácido sulfhídrico y amoníaco disueltos.
- El pitch define la disposición de los tubos en cuanto a la distancia entre centros y geometría. Los tipos de disposición mas corrientes son los siguientes:

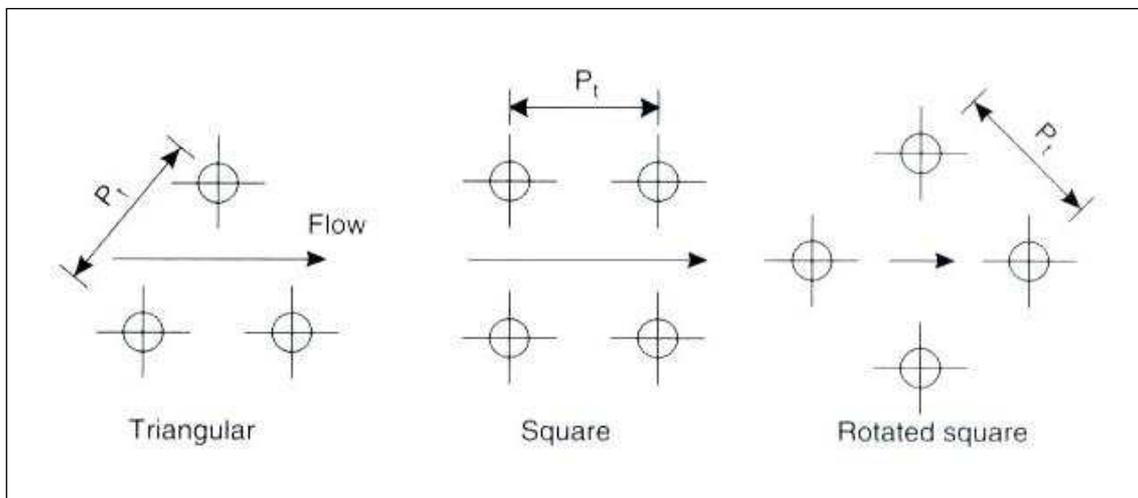


Figura 3.2: Tipos de disposición de los tubos

La tabla siguiente permite seleccionar la disposición de tubos más adecuada al proyecto:

Pitch	Triangular	Cuadrada	Cuadrada rotada
Angulo de ataque	60 °	90°	30°
Perdida de carga	Alta	Baja	Media
Transferencia calor en carcasa	Alta	Baja	Media
Limpieza externa de los tubos	No	Sí	No

Aunque la disposición triangular permite instalar un 15% más de área en la misma carcasa, se selecciona un tipo de paso cuadrado que proporciona menor pérdida de carga y mayor facilidad en la limpieza.

Respecto al valor del pitch, el paso debe ser al menos 1,25 el valor del diámetro de tubo. Los más comunes son:

- Paso de 1" para diámetros de tubo de ¾"
- Paso de 1 ¼" para diámetros de tubo de 1"

Para este diseño, al tener seleccionado un diámetro de tubo de ¾", se tomará un paso de 1".

A continuación, se resumen las variables más importantes en el diseño de los tubos:

<b>Material</b>	<i>Acero al carbono</i>	
<b>Longitud</b>	20 ft	6,1m
<b>Diametro ext</b>	¾"	19,1 mm
<b>Diametro int</b>	0,667"	17 mm
<b>Espesor BWG 14</b>	0,083"	2,1 mm
<b>Pitch</b>	1"	25,4 mm
<b>Tipo de paso</b>	<i>Cuadrado</i>	

### 3.11.1 Cálculo del número de tubos ( $N_{\text{tubos}}$ ):

A partir de la siguiente fórmula, se calcula el número de tubos necesarios para llevar a cabo el intercambio de caudal de calor calculado.

$$N_{\text{tubos}} = \frac{A}{(L - 0,1525) \cdot d_o \cdot \pi}$$

Donde:

A : Área de intercambio;  $A = 125 \text{ m}^2$

L : Longitud del tubo normalizado;  $L = 6,1 \text{ m}$

$d_o$  : Diámetro exterior tubos;  $d_o = 19,1 \text{ mm}$ .

$$N_{\text{tubos}} = \frac{125}{(6,1 - 0,1525) \cdot 0,0191 \cdot \pi} \approx 350$$

El intercambiador utilizado es de dos pasos por carcasa y por tanto, de 4 pasos de tubo por carcasa. A partir de la tabla del Anexo 3.3, considerando el tipo y valor del pitch, el valor recomendado para 4 pasos es de 26" de diámetro de carcasa y 402 tubos.

Diámetro de carcasa = 26"

$$N_{\text{tubos}} = 402$$

Utilizamos esta estimación para recalcular el coeficiente U utilizado en primer caso ( $1100 \text{ W/}^\circ\text{C} \cdot \text{m}^2$ ) y el área de transmisión de calor:

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{350}{402} = 1100 \cdot \frac{350}{402}$$

$$U_2 = 950 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

Recalculando el área con el nuevo valor de U:

$$A = \frac{Q}{U \cdot MTD} = \frac{5055737,5 \cdot \frac{1000}{3600}}{950 \cdot 10,43} = 141 \text{ m}^2$$

### 3.12 Cálculo de los coeficientes individuales de transferencia de calor

A continuación se realiza el cálculo de los coeficientes de transferencia en el lado de tubo y de carcasa para comprobar que el valor supuesto de U, es válido para el área calculada.

#### 3.12.1 Cálculo del coeficiente del lado de tubos ( $h_t$ ):

Se calcula el coeficiente del lado de tubos a partir de la siguiente ecuación:

$$\frac{h_t \cdot d_i}{k_t} = j_h \cdot \text{Re} \cdot \text{Pr}^{0,33} \cdot \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14}$$

Donde:

$h_t$  : Coeficiente transferencia calor lado tubos ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ )

$d_i$  : Diámetro interior;  $d_i = 0,017 \text{ m}$

$k_t$  : Conductividad lado tubos;  $k_t = 0,650 \text{ W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$

$\text{Re}$  : Número Reynolds

$\text{Pr}$  : Número Prandt

$\mu$  : Viscosidad lado tubos;  $\mu = 0,452 \text{ Cp}$

$\mu_w$  : Viscosidad agua a  $32^\circ\text{C}$ ;  $\mu_w = 0,32 \text{ Cp}$

$j_h$  : Factor de transferencia de calor

#### 3.12.1.1 Cálculo del área de paso por tubo ( $A_{pt}$ ):

Se multiplicará el área de la sección del tubo por el número de tubos.

$$A_{pt} = N_{tp} \cdot A_{sección}$$

Donde:

$N_{tp}$ : Número de tubos por paso de carcasa;  $N_{tp} = 101$

$A_{sección}$ : Área de la sección del tubo

$$A_{sección} = \frac{\pi}{4} \cdot d_i^2 = \frac{\pi}{4} \cdot 0,017^2 = 0,00027 m^2$$

$$A_{pt} = N_{tp} \cdot A_{sección} = 101 \cdot 0,00027 = 0,0229 m^2$$

3.12.1.2 Cálculo de la velocidad por tubos ( $v_t$ ):

$$v_t = \frac{Q_v}{A_{pt}}$$

Siendo  $Q_v$  el caudal volumétrico calculado a partir de  $m_t$  y la densidad del fluido;  
 $Q_v = 0,00626 m^3/s$

$$v_t = \frac{Q_v}{A_{pt}} = \frac{0,00626}{0,0229} = 0,27 m/s$$

3.12.1.3 Cálculo del número de Reynolds en el lado de tubos (Re):

$$Re = \frac{\rho \cdot v_t \cdot d_i}{\mu}$$

Donde;

$\rho$  : Densidad del fluido;  $\rho = 983 \text{ Kg/m}^3$

$\mu$  : Viscosidad lado tubos;  $\mu = 0,452 \cdot 10^{-3} \text{ Kg/m}\cdot\text{s}$

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot v_t \cdot d_i}{\mu} = \frac{983 \cdot 0,27 \cdot 0,017}{0,452 \cdot 10^{-3}} = 10138$$

#### 3.12.1.4 Cálculo del número de Prandt (Pr):

$$\text{Pr} = \frac{C_p \cdot \mu}{k_t} = \frac{4,15 \cdot 10^3 \cdot 0,452 \cdot 10^{-3}}{0,65} = 2,87$$

#### 3.12.1.5 Cálculo del factor de transferencia de calor ( $j_h$ ):

Se obtiene a partir de la gráfica incluida en el Anexo 3.4, con los valores de Re y el cociente L/d<sub>i</sub>,

$$\frac{L}{d_i} = \frac{6100}{17} = 360$$

Y para un valor de Re = 10138, y la gráfica, se obtiene un valor de  $j_h = 0,004$ .  
Volviendo a la ecuación inicial, obtenemos el valor de  $h_t$ :

$$\frac{h_t \cdot d_i}{k_t} = j_h \cdot \text{Re} \cdot \text{Pr}^{0,33} \cdot \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14}$$

$$h_t = 0,004 \cdot 10138 \cdot 2,87^{0,33} \cdot \left( \frac{0,452}{0,32} \right)^{0,14} \cdot \frac{0,65}{0,017}$$

$$h_t = 2305 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} = 1161,7 \frac{\text{Kcal}}{\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$

3.12.2 Cálculo del coeficiente del lado de carcasa ( $h_c$ ):

Para el cálculo de este coeficiente se emplea el método de Kern. A continuación se calculan una serie de parámetros necesarios para el cálculo posterior del coeficiente:

3.12.2.1 Cálculo del diámetro del haz tubular ( $d_b$ ):

Para estimar el diámetro del haz tubular se utiliza la siguiente ecuación empírica:

$$d_b = d_o \left( \frac{N_{tubos}}{k_i} \right)^{\frac{1}{n_i}}$$

Donde:

$d_o$  : Diámetro externo tubos;  $d_o = 19,1$  mm.

$n_i$  : Constante Anexo 3.5;  $n_i = 2,263$

$k_i$  : Constante Anexo 3.5;  $k_i = 0,158$

Los valores de  $n_i$  y  $k_i$  utilizados en la ecuación anterior se obtienen de la tabla del Anexo 3.5 dependiendo del valor de pitch y el número de pasos por carcasa.

$$d_b = 0,0191 \cdot \left( \frac{402}{0,158} \right)^{\frac{1}{2,263}} = 0,612m$$

3.12.2.2 Cálculo del espaciado entre baffles ( $l_B$ ):

$$l_B = \frac{D_c}{5} = \frac{660}{5} = 132mm$$

Donde:

$l_B$  : Distancia entre baffles

$D_c$  : Diámetro de carcasa;  $D_c = 26'' = 660$  mm.

### 3.12.2.3 Cálculo de la sección de paso por carcasa ( $A_s$ ):

Para el cálculo del área de paso del fluido por carcasa se emplea:

$$A_s = \frac{(p_t - d_o)}{p_t} \cdot D_c \cdot l_B$$

Donde:

$p_t$  : Pitch;  $p_t = 0,0254$  m

$D_c$  : Diámetro de carcasa;  $D_c = 0,66$  m

$d_o$  : Diámetro exterior tubo;  $d_o = 0,0191$  m

$l_B$  : Espaciado entre baffles;  $l_B = 0,132$  m

$$A_s = \frac{(0,0254 - 0,0191)}{0,0191} \cdot 0,66 \cdot 0,132 = 0,0216 m^2$$

### 3.12.2.4 Cálculo de la velocidad másica del lado de carcasa ( $G_c$ ):

$$G_c = \frac{m_c}{A_s} = \frac{6,07}{0,0216} = 285 \frac{Kg}{s \cdot m^2}$$

Donde:

$m_c$  : Caudal másico lado carcasa;  $m_c = 21852$  Kg/h = 6,07 Kg/s

3.12.2.5 Cálculo del diámetro equivalente ( $d_e$ ):

Para el caso de un tipo de paso cuadrado, la formula que se utiliza es la siguiente:

$$d_e = \frac{1,27}{d_o} \cdot (p_t^2 - 0,785 \cdot d_o^2)$$

$$d_e = \frac{1,27}{0,0191} \cdot (0,0254^2 - 0,785 \cdot 0,0191^2) = 23,85 \text{ mm}$$

3.12.2.6 Cálculo del número de Reynolds en el lado de carcasa (Re):

$$\text{Re} = \frac{G_c \cdot d_e}{\mu}$$

Donde:

$G_c$  : Velocidad másica lado carcasa;  $G_c = 285 \text{ Kg/s} \cdot \text{m}^2$

$d_e$  : Diámetro equivalente;  $d_e = 0,02385 \text{ m}$

$\mu$  : Viscosidad;  $\mu = 0,354 \cdot 10^{-3} \text{ Kg/m} \cdot \text{s}$

$$\text{Re} = \frac{G_c \cdot d_e}{\mu} = \frac{285 \cdot 0,02385}{0,354 \cdot 10^{-3}} = 19200$$

3.12.2.7 Cálculo del número de Prandt (Pr):

Con los datos de la tabla de propiedades físico-químicas para el lado de carcasa:

$$\text{Pr} = \frac{C_p \cdot \mu}{k_c} = \frac{4,20 \cdot 10^3 \cdot 0,354 \cdot 10^{-3}}{0,67} = 2,87$$

3.12.2.8 Cálculo del factor de transferencia de calor ( $j_h$ ):

Al igual que en el lado de tubos, a partir del Reynolds y la figura correspondiente al lado de carcasa contenida en el Anexo 3.6, se obtiene el valor del factor de transferencia de calor. En este caso, se necesita el corte de baffle, que se estima en un 25%:

$$j_h = 0,005$$

Una vez reunidos todos los parámetros, se aplica la siguiente ecuación:

$$\frac{h_c \cdot d_i}{k_c} = j_{hc} \cdot \text{Re}_c \cdot \text{Pr}_c^{0,33}$$

$$h_c = 0,005 \cdot 19200 \cdot 2,87^{0,33} \cdot \frac{0,67}{0,017}$$

$$h_c = 4923 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} = 2481 \frac{Kcal}{h \cdot m^2 \cdot ^\circ C}$$

3.13 Cálculo de los coeficientes globales de transferencia de calor:3.13.1 Coeficiente global limpio ( $U_L$ ):

Se emplea la siguiente ecuación con los términos calculados anteriormente:

$$U_L = \frac{h_t \cdot h_c}{h_t + h_c} \text{ en unidades } Kcal/h \cdot m^2 \cdot ^\circ C$$

$$U_L = \frac{1161,7 \cdot 2481}{1161,7 + 2481} = 790,9 \frac{Kcal}{h \cdot m^2 \cdot ^\circ C}$$

### 3.13.2 Coeficiente global sucio ( $U_C$ ):

Se emplea la expresión:

$$\frac{1}{U_C} = \frac{1}{U_L} + F_S$$

Donde  $F_S$  es el factor de ensuciamiento global que se obtiene a partir de:

$$F_S = \frac{d_i}{d_o} \cdot F_{St} + F_{Sc}$$

Los datos de los factores de ensuciamiento son suministrados por CEPSA:

$F_{St}$  : Factor de ensuciamiento lado tubos;  $F_{St} = 0,0004 \text{ h}\cdot\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}/\text{Kcal}$

$F_{Sc}$  : Factor de ensuciamiento lado carcasa;  $F_{Sc} = 0,0004 \text{ h}\cdot\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}/\text{Kcal}$

$$F_S = \frac{0,017}{0,0191} \cdot 0,0004 + 0,0004 = 7,56 \cdot 10^{-4} \frac{\text{h}\cdot\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}}{\text{Kcal}}$$

Así pues, el coeficiente global sucio queda:

$$\frac{1}{U_C} = \frac{1}{U_L} + F_S = \frac{1}{790,9} + 7,56 \cdot 10^{-4}$$

$$U_C = 496 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}\cdot\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}} = 985 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}}$$

El valor calculado ( $U_C = 985$ ), corrobora que el valor de coeficiente global asumido en los cálculos del área de intercambio ( $U = 950$ ), es correcto. Por tanto, se puede continuar el diseño del precalentador con los cálculos de pérdidas de carga.

### 3.14 Cálculo de pérdidas de carga

#### 3.14.1 Cálculo de las pérdidas de carga en el lado de tubos:

La pérdida de carga global en el lado de tubos se puede estimar a partir de la siguiente expresión:

$$\Delta P_{tubos} = N_{pasos} \left[ 8 \cdot j_{fi} \cdot \left( \frac{L}{d_i} \right) + 2,5 \right] \cdot \frac{\rho \cdot v_t^2}{2}$$

Donde:

$N_{pasos}$  : Número de pasos de los tubos por carcasa;  $N_{pasos} = 4$

$L$  : Longitud de tubo;  $L = 6,1$  m

$d_i$  : Diámetro interior de tubo;  $d_i = 0,017$  m

$v_t$  : Velocidad por tubos;  $v_t = 0,27$  m/s

$\rho$  : Densidad fluido;  $\rho = 983$  Kg/m<sup>3</sup>

El factor  $j_{fi}$  corresponde a las pérdidas por fricción y se obtiene de la gráfica del Anexo 3.7 y el número de Reynolds. Su valor en este caso es de 0,0048.

$$\Delta P_{tubos} = 4 \cdot \left[ 8 \cdot 0,0048 \cdot \left( \frac{6,1}{0,017} \right) + 2,5 \right] \cdot \frac{983 \cdot 0,27^2}{2} = 8641 \frac{N}{m^2}$$

$$\Delta P_{tubos} = 8,6 KPa = 0,084 atm = 1,3 psi$$

#### 3.14.2 Cálculo de las pérdidas de carga en el lado de la carcasa:

La pérdida de carga global en el lado de la carcasa se puede estimar a partir de la siguiente expresión:

$$\Delta P_{carcasa} = 8 \cdot j_{fc} \cdot \left( \frac{D_c}{d_e} \right) \cdot \left( \frac{L}{l_B} \right) \cdot \frac{\rho \cdot v_c^2}{2}$$

Donde:

$D_c$  : Diámetro carcasa;  $D_c = 0,66$  m

$L$  : Longitud de tubo;  $L = 6,1$  m

$d_e$  : Diámetro equivalente;  $d_e = 0,02385$  m

$l_B$  : Espaciado entre baffles;  $l_B = 0,132$  m

$\rho$  : Densidad fluido;  $\rho = 970$  Kg/m<sup>3</sup>

Para el cálculo de la velocidad linear por carcasa ( $v_c$ ) se recurre a la velocidad másica en carcasa ( $G_c = 285$  Kg/s·m<sup>2</sup>):

$$v_c = \frac{G_c}{\rho} = \frac{285}{970} = 0,294 \text{ m/s}$$

El factor  $j_{fc}$  corresponde a las pérdidas por fricción y se obtiene de la figura en el Anexo 3.8 y el Reynolds. Su valor en este caso es de 0,046.

$$\Delta P_{carcasa} = 8 \cdot 0,046 \cdot \left( \frac{0,66}{0,02385} \right) \cdot \left( \frac{6,1}{0,132} \right) \cdot \frac{970 \cdot 0,294^2}{2} = 19728 \frac{N}{m^2}$$

$$\Delta P_{tubos} = 19,7 \text{ KPa} = 0,194 \text{ atm} = 3,08 \text{ psi}$$

### 3.15 Configuración de la carcasa del precalentador

Por último, se calcula el número de baffles que lleva el precalentador y su disposición. Se fija la presión de 300 psig. Se definen las siguientes variables:

$D_c$  : Diámetro carcasa;  $D_c = 26''$

$l_B$  : Espaciado entre baffles;  $l_B = 0,132$  m = 5,2''

$L$  : Longitud de tubo;  $L = 20$  ft

D1 : Distancia baffle de entrada

D2 : Distancia baffle de salida

DE : Diámetro del embranque de la carcasa; DE = 6" (fijado por fabricante)

D<sub>f1</sub>: Factor distancia baffle entrada; D<sub>f1</sub> = 9,5" (a partir del Anexo 3.9)

D<sub>f2</sub>: Factor distancia baffle salida; D<sub>f2</sub> = 14,5" (a partir del Anexo 3.10)

### 3.15.1 Cálculo del baffle de entrada (D1):

Se debe cumplir:

$$D1 > D_{f1} + DE$$

Para el cálculo de D1:

$$D1 = D_c + D_{f1} = 26 + 9,5 = 35,5"$$

$$35,5 > 9,5 + 6 = 15,5 \text{ (se cumple)}$$

### 3.15.2 Cálculo del baffle de salida (D2):

Para el cálculo de D2:

$$D2 = D_c + D_{f2} = 26 + 14,5 = 40,5"$$

### 3.15.3 Cálculo del número de baffles:

$$N_{baffles} = \frac{12 \cdot (L - 0,5) - D1 - D2}{l_B} + 1$$

$$N_{baffles} = \frac{12 \cdot (20 - 0,5) - 35,5 - 40,5}{5,2} + 1$$

$$N_{baffles} = 32$$

## 4. REBOILER

### 4.1 Características de las corrientes

Los datos de caudales de los fluidos que circulan por carcasa y tubos son:

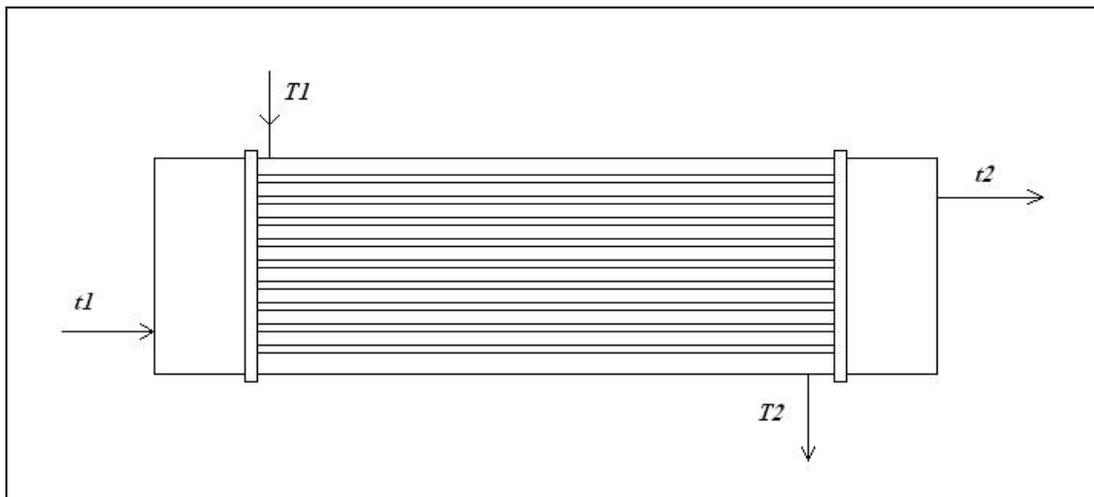
TUBOS: % a calcular	147,1°C	hasta	144°C
CARCASA: 24037 Kg/h	109,3°C	hasta	110°C

Del vapor que se necesita que vuelva a la columna, ya se realizó el balance de materia, quedando las corrientes como siguen:

Vapor de retorno: 2185 Kg/h

Líquido de fondo: 21852 Kg/h

La disposición de los fluidos en el precalentador será:



Donde:

$T_1$  : Agua desorbida (carcasa)

$T_2$  : Vapor de stripping (carcasa)

$t_1$  : Vapor de baja (tubos)

$t_2$  : Condensado de baja (tubos)

#### 4.2 Balance de energía

Para establecer el calor total intercambiado con vistas al cálculo del área del reboiler, es necesario realizar un balance de energía a la unidad. Se establecerán las entalpías de las corrientes y posteriormente se irán calculando los calores que intervienen en el proceso.

##### 4.2.1 Cálculo de las entalpías:

Para el cálculo del calor transferido dentro del reboiler, se supondrá que los dos fluidos son agua. En un caso tenemos vapor de agua por tubos, y en el otro, el agua desorbida por carcasa, con porcentajes de amoníaco y sulfhídrico pero en pequeñas cantidades (ppm). Así pues, a partir de datos de bibliografía, se obtienen los datos de entalpía de cada fluido en estado líquido y vapor a las temperaturas en las que se van a manejar.

Las entalpías utilizadas quedan reflejadas en el siguiente cuadro:

<b>Temperatura</b>	°C	109,3	110	147
<b>Vapor</b>	KJ/Kg	2690,3	2691,4	2741,9
<b>Líquido</b>	KJ/Kg	458,4	461,3	619,6

#### 4.2.2 Cálculo del calor de calentamiento ( $q_{cal}$ ):

Antes de que parte de la corriente pase a estado vapor, se necesita llevar hasta la temperatura de ebullición. El salto térmico es pequeño pero al ser una corriente de caudal considerable, se considerará como significativo. Este calor, será la diferencia entre la entalpía en estado líquido a 109,3°C y a 110°C:

$$q_{cal} = m_{total} \cdot (H_L(110^\circ C) - H_L(109,3))$$

Donde:

$m_{total}$  : Caudal másico que entra al reboiler;  $m_{total} = 24037 \text{ Kg/h}$

$$q_{cal} = 24037 \cdot (461,3 - 458,4) = 69707,3 \text{ KJ/h}$$

#### 4.2.3 Cálculo del calor de vaporización ( $q_{vap}$ ):

El calor de vaporización corresponde a la energía que posee la masa que es vaporizada ( $m_v$ ) en estado líquido, hasta la energía que tiene en estado vapor. La temperatura de vaporización se establece en 110°C.

$$q_{vap} = m_v \cdot (H_v(110^\circ C) - H_L(110^\circ C))$$

Donde:

$m_v$  : Caudal másico de vapor producido;  $m_v = 2185 \text{ Kg/h}$

$$q_{vap} = 2185 \cdot (2691,4 - 461,3) = 4872768,5 \text{ KJ/h}$$

#### 4.2.4 Cálculo del calor total intercambiado ( $Q_{total}$ ):

La suma del calor de vaporización y del calor necesario para calentar la corriente nos da el calor total que tendrá que aportar la corriente de vapor de baja presión que circula por tubos y procede de refinería:

$$Q_{total} = q_{cal} + q_{vap}$$

$$Q_{total} = 69707,3 + 4872769 = 4942475,8 \text{ KJ / h}$$

A lo largo del diseño del reboiler, se necesitará de nuevo estos caudales de calor intercambiado y en distintas unidades. Por ello, se adjunta a continuación, un cuadro resumen con estos valores, en las unidades utilizadas, más importantes:

Unidades	q <sub>cal</sub>	q <sub>vap</sub>	Q <sub>total</sub>
KJ/h	69707,3	4872769	4942475,8
KW	19,4	1353,5	1372,9
Kcal/h	9759	682187	691946

#### 4.2.5 Cálculo del caudal de vapor de baja presión:

Con el calor total de intercambio, y las entalpías del vapor y el líquido a 147°C, se puede obtener el caudal másico de vapor necesario para obtener los caudales necesarios para la columna, según la siguiente ecuación:

$$Q_{total} = m_{vapor} \cdot (H_V(147^\circ C) - H_L(147^\circ C))$$

$$4942475,8 = m_{vapor} \cdot (2741,9 - 619,6)$$

$$m_{vapor} = 2330 \text{ Kg / h}$$

#### 4.3 Cálculo de la temperatura media logarítmica

La expresión para la temperatura media logarítmica, en este caso, responde a la forma:

$$LMTD = \frac{(t_2 - t_1)}{\ln\left(\frac{T_{sat} - t_1}{T_{sat} - t_2}\right)}$$

Donde:

$T_{sat}$  : Temperatura de saturación del vapor de baja;  $T_{sat} = 147 \text{ }^\circ\text{C}$

$t_1$  : Temperatura entrada carcasa;  $T_1 = 109.3 \text{ }^\circ\text{C}$

$t_2$  : Temperatura salida carcasa;  $T_1 = 110 \text{ }^\circ\text{C}$

Sustituyendo los valores de cada temperatura:

$$LMTD = \frac{(110 - 109,3)}{\ln\left(\frac{147,1 - 109,3}{147,1 - 110}\right)} = 37,4^\circ\text{C}$$

Se emplea un valor de Fc de 0,98.

#### 4.4 Cálculo de las propiedades fisico-químicas:

Como ya se ha comentado anteriormente, las propiedades físico-químicas necesarias para el cálculo de los coeficientes individuales, se obtienen para unas temperaturas determinadas denominadas calóricas. En este caso, el salto en tubos no es apreciable y en carcasa, tampoco es demasiado, por lo que las propiedades se tomarán a una temperatura intermedia. Se establece  $147 \text{ }^\circ\text{C}$  para los tubos y  $109,6 \text{ }^\circ\text{C}$  para la carcasa.

A continuación se recopilan estas propiedades:

	<b>Caudal</b>	<b>Temp.</b>	<b>Densidad</b>	<b>Viscosidad</b>	<b>Cp</b>	<b>K</b>
	Kg/h	°C	Kg/m <sup>3</sup>	Pa·s	KJ/Kg*°C	W/m*°C
<b>Tubos</b>	2330	147	2,395	0,000014	2,37	0,135
<b>Carcasa</b>	24037	109,6	952	0,00026	4,22	0,602

#### 4.4.1 Cálculo de la densidad media del fluido ( $\rho_m$ ):

Para estimar la densidad del fluido que circula por carcasa y tubos, hay que considerar que estarán en estado líquido y en estado vapor. Para el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor, esto supone un handicap, porque las densidades en los dos estados son muy diferentes. Se opta por establecer el cálculo de la densidad media del fluido y aplicar esta densidad al cálculo de los coeficientes.

##### 4.4.1.1 Cálculo del volumen de vapor:

$$V_{vapor} = \frac{m_{vapor}}{\rho_{vapor}}$$

Donde:

$m_{vapor}$  : Caudal másico de vapor;  $m_{vapor} : 2185 \text{ Kg/h} = 0,607 \text{ Kg/s}$

$\rho_{vapor}$  : Densidad del vapor;  $\rho_{vapor} = 2,3 \text{ Kg/m}^3$

Sustituyendo:

$$V_{vapor} = \frac{m_{vapor}}{\rho_{vapor}} = \frac{0,607}{2,3} = 0,253 \text{ m}^3$$

4.4.1.2 Cálculo del volumen de líquido:

$$V_{\text{líquido}} = \frac{m_{\text{líquido}}}{\rho_{\text{líquido}}}$$

Donde:

$m_{\text{líquido}}$  : Caudal másico de vapor;  $m_{\text{líquido}} : 21852 \text{ Kg/h} = 6,07 \text{ Kg/s}$

$\rho_{\text{líquido}}$  : Densidad del vapor;  $\rho_{\text{líquido}} = 952 \text{ Kg/m}^3$

Sustituyendo:

$$V_{\text{líquido}} = \frac{m_{\text{líquido}}}{\rho_{\text{líquido}}} = \frac{6,07}{952} = 0,00638 \text{ m}^3$$

4.4.1.3 Cálculo del volumen total:

$$V_{\text{total}} = V_{\text{líquido}} + V_{\text{vapor}} = 0,00638 + 0,253 = 0,25938 \text{ m}^3$$

4.4.1.4 Cálculo de la densidad media:

$$\rho_m = \frac{m_{\text{total}}}{V_{\text{total}}} = \frac{6,07 + 0,607}{0,25938} = 25,74 \text{ Kg / m}^3$$

4.5 Cálculo del flujo de calor:

Los reboilers de tipo termosifón, pueden sufrir inestabilidades en sus caudales si están usando flujos de calor demasiado altos. Se define el flujo de calor intercambiado como la cantidad de energía transferida por unidad de área. Los caudales de líquido y

vapor en los tubos tienen la tendencia a ser pulsantes y cuando ocurre esto, a altos flujos de calor, las pulsaciones pueden llegar a ser tan grandes que causen el bloqueo del vapor.

Por ello, normalmente se utilizan algún dispositivo para restringir el flujo de la línea de entrada, como válvulas o platos perforados, de forma que la resistencia al flujo, pueda ser ajustada en el caso de que una situación parecida se produjera.

Según la bibliografía consultada, para reboilers tipo termosifón horizontal, el máximo flujo de calor permitido es de  $56500 \text{ W/m}^2$  para diámetros interiores de tubo de 25 mm, y no más de  $47300 \text{ W/m}^2$  si los tubos son de 20 mm. En este caso, los tubos seleccionados serán de 25 mm.

#### 4.6 Cálculo del área de intercambio (A):

Al tener calculado el calor total intercambiado y conocer el máximo flujo de calor permitido, podemos estimar el área de transferencia del reboiler diseñado:

$$A = \frac{Q_{total}}{H}$$

Donde:

$Q_{total}$  : Calor total intercambiado;  $Q_{total} = 1372900 \text{ W}$

H : Flujo de calor máximo;  $H = 56500 \text{ W/m}^2$

$$A = \frac{1372900}{56500} = 25 \text{ m}^2$$

La longitud de los tubos del reboiler de tipo termosifón, suelen variar desde los 6 a los 12 pies para operaciones a presión. Los diámetros internos también suelen ser mayores que en el caso de un intercambiador carcasa – tubo. El resto de parámetros son bastante parecidos a los ya analizados para el precalentador. A continuación se resumen las características principales de los tubos del reboiler:

<b>Material</b>	<i>Acero al carbono</i>	
<b>Longitud</b>	10 ft	3,048 m
<b>Diametro ext</b>	1,082"	27,5 mm
<b>Diametro int</b>	1"	25,4 mm
<b>Espesor BWG 14</b>	0,083"	2,1 mm
<b>Pitch</b>	1 ¼"	34 mm
<b>Tipo de paso</b>	<i>Cuadrado</i>	

#### 4.6.1 Otras consideraciones:

- Se debe de cumplir que:

$$L > 5 \cdot D_c$$

$$D_c < 730 \text{ mm}$$

- Pueden usarse deflectores segmentados para aumentar la turbulencia en la carcasa, pero no es lo usual. Los tubos se protegen de pandearse con placas de soporte verticales.
- El diámetro del reboiler termosifón es mayor que el correspondiente a un intercambiador carcasa tubo convencional, debido al espacio libre que debe tener en la parte superior para permitir que la mezcla ligera de vapor-líquido tenga un fácil acceso a la boquilla de salida. Por ello, si en un diseño para un carcasa y tubo, la superficie se distribuye en una carcasa de "x" de diámetro, los tubos de un reboiler serían recolocados en una de "x+2", con el mismo paso de tubo para dejar un espacio mayor en la parte superior.

#### 4.7 Cálculo del número de tubos:

Para calcular el número de tubos del reboiler, se estimará el área de paso de un solo tubo y después se calculan cuantos son necesarios para compensar el área total de intercambio de calor.

El área de un solo tubo se calcula a continuación:

$$A_{tubo} = \pi \cdot d_i \cdot L$$

Donde:

$d_i$  : Diámetro interior de tubo

$L$  : Longitud del tubo

$$A_{tubo} = \pi \cdot 0,0254 \cdot 3,048 = 0,243m^2$$

Con la siguiente ecuación, se puede calcular el número de tubos totales:

$$N_{tubos} = \frac{A_{total}}{A_{tubo}} = \frac{25}{0,243} = 103$$

Siguiendo el criterio de las tablas del Anexo 4.2 para paso cuadrado, lo reglamentario son 122 tubos y una carcasa de 21 ¼". Como ya se ha nombrado en la memoria descriptiva, la carcasa del reboiler debe ser 2" superior a la que corresponde a un intercambiador carcasa-tubo, debido a que es necesario un espacio adicional en la parte superior para la salida de los vapores. El diámetro final de carcasa será, por tanto, de 23 ¼".

$$H_2 = H_1 \cdot \frac{103}{122} = 56500 \cdot \frac{103}{122}$$

$$H_2 = 43400 \frac{W}{m^2}$$

Recalculando el área:

$$A = \frac{1372900}{43400} = 32m^2$$

Se comprueba que se cumplen las limitaciones establecidas para el diámetro de carcasa y longitud de tubos:

$$\begin{array}{ll} D_c < 730 \text{ mm} & \mathbf{590 < 730} \\ L > 5 \cdot D_c & \mathbf{3048 > 5 \cdot 590 = 2\ 950} \end{array}$$

Una vez calculada el área del reboiler, según la clasificación del código TEMA, se puede realizar la elección del tipo de intercambiador que se diseñará:

#### 1. *Carcasa:*

Se emplea una carcasa integrada (casquete), recomendada para reboilers empleados en columnas de destilación. Corresponde con la carcasa tipo B.

#### 2. *Distribuidor:*

Siguiendo de nuevo recomendaciones de la bibliografía, para este tipo de equipos, el uso más extendido es una carcasa con flujo dividido o de tipo J.

#### 3. *Cabezal de salida:*

Al considerarse tubos en “U” para el diseño, el tipo de cabezal adecuado es el U, que corresponde al de un haz de tubos de este tipo.

Así pues, el reboiler será un intercambiador del tipo “BJU”, según TEMA.

#### 4.8 Cálculo de los coeficientes individuales de transmisión de calor:

Los termosifones horizontales operan según el principio de flujo dividido en el que la mitad del fluido que entra se divide a cada lado del deflector longitudinal y vuelve a juntarse encima de él. La liberación de vapor y líquido tiene lugar en la columna y el reboiler puede conectarse según la figura del Anexo 4.3.

En primer lugar todo el líquido del plato inferior se conduce al reboiler. La cantidad de alimentación es la cantidad de fondos por unidad de tiempo.

En el segundo dibujo, se conecta a la parte inferior de la columna, cuyos fondos circulan libremente a un flujo tal, que la caída de presión por fricción en el reboiler y otros conductos del circuito balanceen la diferencia de carga hidrostática entre el líquido y los niveles de líquido-vapor. Sin embargo, la carga hidrostática disponible en este último arreglo, es menor que en la disposición para un solo paso aun cuando para la recirculación se requiere mayor carga. La carga se provee subiendo el nivel de líquido de fondos de la columna o elevando la columna en sí.

Cuando un líquido se evapora en un reboiler de tipo termosifón horizontal, se asemeja a los reboiler tipo marmita o piscina donde la velocidad del líquido sobre la superficie de transferencia es muy pequeña. A estas bajas velocidades, el coeficiente de película para ebullición es independiente de la velocidad y sólo depende de la diferencia de temperatura entre la pared del tubo y la temperatura de saturación del líquido que ebulle. Esta relación se representa en la gráfica del Anexo 4.4. Esto no permite el uso de grandes diferencias de temperatura en equipos de circulación natural. Los coeficientes usados para los termosifones son los mismos que para los de marmita o piscina.

Los termosifones horizontales, por tanto, operan en condiciones casi isotérmicas, particularmente cuando se emplean en el fondo de una columna de destilación para soluciones acuosas. La carga total de calor se divide en calor sensible y calor latente, y la superficie requerida para cada fracción se calcula separadamente a sus respectivas ebulliciones o coeficientes sensibles. En la práctica, sin embargo, se utiliza un método empírico para calcular coeficientes comparables a aquellos obtenidos en la práctica.

Aunque el flujo no es a contracorriente, normalmente no se desvía de él, debido a que uno o ambos fluidos son prácticamente isotérmicos. Al ser el medio calefactor, vapor de agua, se aplican directamente, las diferencias de temperatura a contracorriente. Puesto que las diferencias de temperatura para calentamiento sensible y vaporización son las mismas, no hay diferencia balanceada de temperatura. Pero el calor sensible  $q_s$  (que en este proyecto se nombra como  $q_{cal}$ ), es transferido con un coeficiente de convección libre  $h_s$ , y el calor latente  $q_{vap}$ , se transfiere con el coeficiente  $h_v$

considerablemente mayor. Para obtener un solo factor, que permita establecer un índice de funcionamiento, el coeficiente balanceado puede obtenerse como sigue:

$$q = h_c \cdot A \cdot \Delta T$$

$$A_{cal} \cdot (\Delta T)_{cal} = \frac{q_{cal}}{h_s}$$

$$A_{vap} \cdot (\Delta T)_{vap} = \frac{q_{vap}}{h_v}$$

$$h_c = \frac{Q}{\frac{q_{cal}}{h_s} + \frac{q_{vap}}{h_v}}$$

La elección de un reboiler conectado para un solo paso o para una operación de circulación no será consecuencia de estos cálculos, ya que ni  $h_s$  ni  $h_v$  son influidos por la velocidad a través del reboiler.

A continuación se resuelven los coeficientes individuales de transmisión de calor para estimar el global y ver si hemos supuesto un flujo de calor suficiente. Los fundamentos del cálculo ya se han expuesto anteriormente, por lo que simplemente se hará una simplificación de la metodología de cálculo empleada.

El objetivo de los cálculos de los coeficientes individuales, es calcular el coeficiente global y comprobar que el valor supuesto al determinar el flujo de calor, es suficiente para la transferencia de calor necesaria. Para ello, se necesitan los coeficientes individuales del lado de tubos y de carcasa. En el lado donde se produce la ebullición, debemos aplicar las ecuaciones estipuladas en los fundamentos de cálculo, donde se calculan los coeficientes de calor sensible y latente. En este caso se supondrá un valor de  $h_c$  (carcasa), y luego se comprobará mediante los valores aportados por el Anexo 4.4 y estas ecuaciones:

1. Cálculo del coeficiente individual del lado de tubos
2. Cálculo del coeficiente individual del lado de carcasa (valor provisional)
3. Cálculo de la temperatura de pared
4. Obtención de los coeficientes  $h_s$  y  $h_v$
5. Comprobar que el valor supuesto  $h_c$  coincide con el calculado mediante los coeficientes.
6. Obtención del coeficiente global U.

#### 4.8.1 Cálculo del coeficiente individual del lado de tubos ( $h_t$ ):

Se calcula el coeficiente del lado de tubos a partir de la siguiente ecuación:

$$\frac{h_t \cdot d_i}{k_t} = j_h \cdot \text{Re} \cdot \text{Pr}^{0,33}$$

Donde:

$h_t$  : Coeficiente transferencia calor lado tubos ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ )

$d_i$  : Diámetro interior;  $d_i = 0,017$  m

$k_t$  : Conductividad lado tubos;  $k_t = 0,650$   $\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$

Re : Número de Reynolds

Pr : Número de Prandt

$j_h$  : Factor de transferencia de calor

#### 4.8.1.1 Cálculo de la velocidad por tubos:

La velocidad del fluido por tubos se calcula según la expresión ya vista:

$$v_t = \frac{Q_v}{A_{pt}} = \frac{Q_v}{\frac{\pi}{4} \cdot d_i^2 \cdot N_{tc}}$$

Siendo  $Q_v$  el caudal volumétrico calculado a partir de  $m_t$  y la densidad del fluido;  
 $Q_v = 0,2696 \text{ m}^3/\text{s}$

$$v_i = \frac{Q_v}{\frac{\pi}{4} \cdot d_i^2 \cdot N_{tc}} = \frac{0,2696}{\frac{\pi}{4} \cdot 0,0254^2 \cdot 56} = 5,28 \text{ m/s}$$

#### 4.8.1.2 Cálculo del número de Reynolds (Re):

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot v \cdot d_i}{\mu}$$

Donde;

$\rho$  : Densidad del fluido;  $\rho = 25,74 \text{ Kg/m}^3$

$\mu$  : Viscosidad lado tubos;  $\mu = 1,22 \cdot 10^{-4} \text{ Kg/m}\cdot\text{s}$

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot v_i \cdot d_i}{\mu} = \frac{25,74 \cdot 5,28 \cdot 0,0254}{1,22 \cdot 10^{-4}} = 28450$$

#### 4.8.1.3 Cálculo del número de Prandt (Pr):

$$\text{Pr} = \frac{C_p \cdot \mu}{k_t} = \frac{2,37 \cdot 10^3 \cdot 1,22 \cdot 10^{-4}}{0,135} = 2,1$$

#### 4.8.1.4 Cálculo del factor de transferencia de calor ( $j_h$ ):

Se emplea la misma gráfica que para el precalentador de carga que se encuentra en el Anexo 3.4, junto con los valores de Re y el cociente  $L/d_i$ .

$$\frac{L}{d_i} = \frac{3,048}{25,4} = 120$$

Y para un valor de  $Re = 28450$ , y la gráfica, se obtiene un valor de  $j_h = 0,004$ .

Volviendo a la ecuación inicial, obtenemos el valor de  $h_t$ :

$$\frac{h_t \cdot d_i}{k_t} = j_h \cdot Re \cdot Pr^{0,33}$$

$$h_t = 0,004 \cdot 28450 \cdot 2,1^{0,33} \cdot \frac{0,135}{0,0254}$$

$$h_t = 1946 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} = 980 \frac{Kcal}{h \cdot m^2 \cdot ^\circ C}$$

#### 4.8.2 Cálculo del coeficiente individual del lado de carcasa ( $h_c$ ):

El reboiler no lleva baffles, pero si una serie de soportes que sujetan el haz de tubos. En el cálculo del coeficiente, se va suponer que se esta tratando con un intercambiador carcasa – tubo corriente, con lo cual se supondrán en los cálculos los datos del espaciado de baffles para el desarrollo del método.

##### 4.8.2.1 Espaciado entre baffles ( $l_B$ ):

El espaciado entre baffles se toma de forma genérica como la quinta parte del diámetro de la carcasa, ya conocido.

$$l_B = \frac{D_c}{5} = \frac{590}{5} = 118mm$$

Donde:

$D_c$  : Diámetro de carcasa;  $D_c = 23 \frac{1}{4}'' = 590 \text{ mm}$ .

4.8.2.2 Cálculo de la sección de paso por carcasa ( $A_c$ ):

$$A_c = \frac{(p_t - d_o)}{p_t} \cdot D_c \cdot l_B$$

Donde:

$p_t$  : Pitch;  $p_t = 0,034 \text{ m}$

$D_c$  : Diámetro de carcasa;  $D_c = 0,590 \text{ m}$

$d_o$  : Diámetro exterior tubo;  $d_o = 0,027 \text{ m}$

$l_B$  : Espaciado entre baffles;  $l_B = 0,118 \text{ m}$

$$A_c = \frac{(0,034 - 0,027)}{0,027} \cdot 0,590 \cdot 0,118 = 0,011 \text{ m}^2$$

4.8.2.3 Velocidad másica lado carcasa ( $G_c$ ):

$$G_c = \frac{m_c}{A_c} = \frac{6,67}{0,011} = 667 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

Donde:

$m_c$  : Caudal másico lado carcasa;  $m_c = 24037 \text{ Kg/h} = 6,67 \text{ Kg/s}$

4.8.2.4 Cálculo del diámetro equivalente ( $d_e$ ):

Para el caso de un tipo de paso cuadrado, la formula que se utiliza es la siguiente:

$$d_e = \frac{1,27}{d_o} \cdot (p_i^2 - 0,785 \cdot d_o^2) = \frac{1,27}{0,027} \cdot (0,034^2 - 0,785 \cdot 0,027^2) = 20,45mm$$

4.8.2.5 Cálculo del número de Reynolds (Re):

$$Re = \frac{G_c \cdot d_e}{\mu}$$

Donde:

$G_c$  : Velocidad másica lado carcasa;  $G_c = 667 \text{ Kg/s}\cdot\text{m}^2$

$d_e$  : Diámetro equivalente;  $d_e = 0,02045 \text{ m}$

$\mu$  : Viscosidad;  $\mu = 0,256 \cdot 10^{-3} \text{ Kg/m}\cdot\text{s}$

$$Re = \frac{G_c \cdot d_e}{\mu} = \frac{667 \cdot 0,02045}{0,256 \cdot 10^{-3}} = 53280$$

4.8.2.6 Cálculo del número de Prandt (Pr):

Con los datos de la tabla de propiedades físico-químicas para el lado de carcasa:

$$Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{k_c} = \frac{4,22 \cdot 10^3 \cdot 0,256 \cdot 10^{-3}}{0,602} = 1,79$$

Al igual que en el lado de tubos, a partir del Reynolds y la figura correspondiente al lado de carcasa en el Anexo 3.6, se obtiene el valor del factor de transferencia de calor. En este caso, se necesita el corte de baffle, que se estima en un 25%:

$$j_{hc} = 0,003$$

Se aplica la siguiente ecuación para el cálculo final del coeficiente del lado de carcasa, donde se conocen todos los parámetros:

$$\frac{h_c \cdot d_i}{k_c} = j_{hc} \cdot \text{Re}_c \cdot \text{Pr}_c^{0,33}$$

$$h_c = 0,003 \cdot 53280 \cdot 1,79^{0,33} \cdot \frac{0,602}{0,0254}$$

$$h_c = 4590 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} = 2314 \frac{Kcal}{h \cdot m^2 \cdot ^\circ C}$$

Este es el valor supuesto de coeficiente de carcasa.

#### 4.8.3 Cálculo de la temperatura de pared ( $T_w$ ):

Lo que se calcula realmente es el incremento de temperatura entre la pared y la carcasa. Para ello se emplea la siguiente formula:

$$\Delta T_w = t_w - t_c = \frac{h_i'}{h_i' + h_c} \cdot (T_c - t_c)$$

Para poder resolverla, hay que establecer una serie de rectificaciones y cambio de unidades. En primer lugar, se aplica la siguiente expresión al coeficiente del lado de tubos para obtener:

$$h_i' = h_i \cdot \frac{d_i}{d_o} = 1946 \cdot \frac{25,4}{27}$$

$$h_i' = 1802 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} = 908 \frac{Kcal}{h \cdot m^2 \cdot ^\circ C}$$

Una vez, que se tienen todos los valores calculados se pasarán a unidades del sistema británico, ya que la gráfica que es necesario utilizar, está en estas unidades:

$$t_c = 109,6^\circ C = 228,8^\circ F$$

$$T_c = 147,1^\circ C = 290,8^\circ F$$

$$h_t' = 1802 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} = 318,4 \frac{Btu}{h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F}$$

$$h_c = 4590 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} = 810,9 \frac{Btu}{h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F}$$

Sustituyendo en la expresión anterior, se tiene el intervalo de temperaturas deseado:

$$\Delta T_w = \frac{318,4}{318,4 + 810,9} \cdot (290,8 - 228,8) = 16,4^\circ F$$

#### 4.8.4 Estimación de los coeficientes $h_s$ y $h_v$ :

Con el Anexo 4.4, y este dato de temperatura, se obtiene el valor de los coeficientes de calor sensible ( $h_s$ ) y calor latente ( $h_v$ ):

$$h_v = 500 \frac{Btu}{h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F} = 2830 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} = 1427 \frac{Kcal}{h \cdot m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$h_s = 40 \frac{Btu}{h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F} = 227 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} = 115 \frac{Kcal}{h \cdot m^2 \cdot ^\circ C}$$

4.8.5 Comprobación del coeficiente individual del lado de carcasa:

Según la fórmula ya nombrada en los fundamentos para el cálculo del coeficiente en carcasa:

$$h_c = \frac{Q}{\frac{q_s}{h_s} + \frac{q_{vap}}{h_{vap}}}$$

Se estiman en primer lugar los cocientes del denominador para luego resolver la ecuación:

$$\frac{q_v}{h_v} = \frac{682187}{1427} = 478$$

$$\frac{q_s}{h_s} = \frac{9759}{115} = 85,1$$

$$h_c = \frac{Q}{\frac{q_s}{h_s} + \frac{q_{vap}}{h_{vap}}} = \frac{691946}{478 + 85,1} = 2228 \frac{Kcal}{h \cdot m^2 \cdot ^\circ C}$$

De esta forma, el coeficiente  $h_c$  queda con un valor de:

$$h_c = 2228 \frac{Kcal}{h \cdot m^2 \cdot ^\circ C} = 4420 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

Este dato, no está alejado de los 4590 W/m<sup>2</sup>·°C, que se habían supuesto inicialmente, por lo que lo damos como válido.

4.8.6 Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor (U):

A partir del flujo de calor y con el dato de temperatura media logarítmica, se obtiene el valor del coeficiente global que se ha supuesto desde el principio:

$$U_{\text{supuesto}} = \frac{H}{\Delta T \cdot F_c} = \frac{43400}{37,4 \cdot 0,98} = 1184 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$U_{\text{supuesto}} = 1184 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} = 596,8 \frac{Kcal}{h \cdot m^2 \cdot ^\circ C}$$

Para el cálculo del coeficiente global que se emplea, se sigue la expresión siguiente:

$$U_L = \frac{h_t \cdot h_c}{h_t + h_c} \text{ en unidades } Kcal/h \cdot m^2 \cdot ^\circ C$$

$$U_L = \frac{908 \cdot 2228}{908 + 2228} = 645 \frac{Kcal}{h \cdot m^2 \cdot ^\circ C}$$

Se muestra, que el valor supuesto inicialmente para la transferencia de calor, es suficiente comparado con el real.

#### 4.9 Cálculo de las pérdidas de carga

Se debe mantener la caída de presión a través del termosifón tan pequeña como sea posible, de forma que el retorno por gravedad a la columna se haga a la menor altura posible para la columna.

Para reboilers que vaporizan una pequeña fracción del líquido que le entra, la elevación requerida es mayor, ya que la línea de regreso a la columna contiene líquido en mayor medida que vapor, y la diferencia de densidades de las corrientes que entran y salen es pequeña.

Generalmente se permite una caída de presión de 0,05 atm.

4.9.1 Cálculo de las pérdidas de carga en el lado de tubos:

La pérdida de carga global en el lado de tubos se puede estimar a partir de la siguiente expresión:

$$\Delta P_{tubos} = N_{pasos} \left[ 8 \cdot j_{ft} \cdot \left( \frac{L}{d_i} \right) + 2,5 \right] \cdot \frac{\rho \cdot v_t^2}{2}$$

Donde:

$N_{pasos}$  : Número de pasos de los tubos por carcasa;  $N_{pasos} = 2$

$L$  : Longitud de tubo;  $L = 3,048$  m

$d_i$  : Diámetro interior de tubo;  $d_i = 0,0254$  m

$v_t$  : Velocidad por tubos;  $v_t = 5,8$  m/s

$\rho$  : Densidad fluido;  $\rho = 2,39$  Kg/m<sup>3</sup>

El factor  $j_{ft}$  corresponde a las pérdidas por fricción y se obtiene de la misma figura que en el precalentador, y el Reynolds. Su valor en este caso es de 0,0038, obtenido a partir del Anexo 3.7.

$$\Delta P_{tubos} = 2 \cdot \left[ 8 \cdot 0,0038 \cdot \left( \frac{3,048}{0,0254} \right) + 2,5 \right] \cdot \frac{2,39 \cdot 5,8^2}{2} = 494,3 \frac{N}{m^2}$$

$$\Delta P_{tubos} = 0,5 KPa = 0,005 atm = 0,07 psi$$

4.9.2 Cálculo de las pérdidas de carga en el lado de la carcasa:

La pérdida de carga global en el lado de la carcasa se puede estimar a partir de la siguiente expresión:

$$\Delta P_{carcasa} = 8 \cdot j_{fc} \cdot \left( \frac{D_c}{d_e} \right) \cdot \left( \frac{L}{l_B} \right) \cdot \frac{\rho \cdot v_c^2}{2}$$

Donde:

$D_c$  : Diámetro carcasa;  $D_c = 0,590$  m

$L$  : Longitud de tubo;  $L = 3,048$  m

$d_e$  : Diámetro equivalente;  $d_e = 0,02045$  m

$l_B$  : Espaciado entre baffles;  $l_B = 0,118$  m

$\rho$  : Densidad fluido;  $\rho_m = 25,74$  Kg/m<sup>3</sup>

Para el cálculo de la velocidad linear por carcasa ( $v_c$ ) se recurre a la velocidad másica en carcasa ( $G_c = 667$  Kg/s·m<sup>2</sup>):

$$v_c = \frac{G_c}{\rho} = \frac{667}{952} = 0,7 \text{ m/s}$$

El factor  $j_{fc}$  corresponde a las pérdidas por fricción y se obtiene del Anexo 3.8 y el número de Reynolds. Su valor en este caso es de 0,04.

$$\Delta P_{carcasa} = 8 \cdot 0,04 \cdot \left( \frac{0,590}{0,02045} \right) \cdot \left( \frac{3,048}{0,118} \right) \cdot \frac{25,74 \cdot 0,7^2}{2} = 1503,9 \frac{N}{m^2}$$

$$\Delta P_{tubos} = 1,5 \text{ KPa} = 0,014 \text{ atm} = 0,22 \text{ psi}$$

No se superan las 0,05 atm. de pérdida que se habían supuesto.

## **5. AEROREFRIGERANTE**

Lo primero a la hora de abordar los cálculos justificativos de este equipo es seleccionar el modo de operación global que emplea, tiro natural o mecánico y dentro de este último seleccionar tiro forzado o inducido.

Los equipos de tiro natural se descartan debido a su gran tamaño. Dada la función a la que se destina el aero y las características que debe cumplir, en refinería se opta por una configuración horizontal de tiro forzado. La ventaja del tiro forzado frente al inducido, es que produce mayor flujo másico de aire para un mismo ventilador y además tiene una eficacia de enfriamiento mayor. Además, el mantenimiento de los ventiladores y de los reductores es más sencillo y las palas de los ventiladores pueden ser de plástico puesto que no hay riesgo de que se alcancen temperaturas críticas para el material.

### **5.1 Datos de la corriente del equipo**

El objetivo del aerorefrigerante es enfriar y condensar la corriente de vapor que se obtiene mediante extracción lateral del 7º plato de la columna de stripping. Esta corriente, una vez condensada, se utilizará para enfriar la cabeza de la columna y favorecer la transferencia de materia.

- Corriente entrada = 1880 Kg/h
- Presión = 1,34 ATA
- Temperatura entrada = 105 °C
- Temperatura salida = 70 °C

A continuación se muestra un cuadro resumen con el balance de materia que ya ha sido calculado previamente:

	ENTRADA			SALIDA (LIQUIDA)			SALIDA (VAPOR)		
	Xi	Kg/h	Kmol/h	Xi	Kg/h	Kmol/h	Xi	Kg/h	Kmol/h
<b>H2O</b>	0,8995	1619,1	89,95	0,9635	1585,9	88,11	0,2147	33,12	1,84
<b>H2S</b>	0,0531	180,54	5,31	0,0005	2,04	0,06	0,6147	178,5	5,25
<b>NH3</b>	0,047	80,58	4,74	0,0359	55,93	3,29	0,1704	24,65	1,45
<b>Total</b>	-	1880,22	100	-	1643,9	91,46	-	1880,22	8,54

### 5.2 Balance de energía de la corriente:

El objetivo es conocer el calor intercambiado entre el fluido y el aire, que será el mismo que se desprende al enfriar la corriente y condensar parte de ella. Este calor será necesario para obtener el dato de área de intercambio de calor y diseñar el equipo.

Se necesitan datos de calor latente para cada componente ( $\lambda$ ) y datos de Cp en cada fase. Para los casos de amoníaco y sulfhídrico solo se considera la fase vapor. Los datos de Cp, se han obtenido de correlaciones empíricas en función de la temperatura (Base de datos NIST):

Cp	105 °C		70 °C	
	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor
<b>H2O</b>	76,1	33,5	75,45	33,2
<b>H2S</b>	35,2		34,71	
<b>NH3</b>	38,04		36,94	

Los datos de calor latente de vaporización/condensación para cada componente son:

$$\lambda (\text{H}_2\text{O}) = 40680 \text{ J/mol}$$

$$\lambda (\text{H}_2\text{S}) = 18670 \text{ J/mol}$$

$$\lambda (\text{NH}_3) = 23273 \text{ J/mol}$$

5.2.1 Cálculo de entalpías:

A la temperatura de 105°C:

$$H_{\text{liquido}} = \sum x_i \cdot Cp_{i_{\text{liquido}}} \cdot (105 - 25) = 5976,7 J / mol$$

$$H_{\text{vapor}} = \sum x_i \cdot \left( Cp_{i_{\text{vapor}}} \cdot (105 - 25) + \lambda_i \right) = 41380 J / mol$$

A la temperatura de 70°C:

$$H_{\text{liquido}} = \sum x_i \cdot Cp_{i_{\text{liquido}}} \cdot (70 - 25) = 3331,9 J / mol$$

$$H_{\text{vapor}} = \sum x_i \cdot \left( Cp_{i_{\text{vapor}}} \cdot (70 - 25) + \lambda_i \right) = 25795 J / mol$$

Donde:

$x_i$  : Composición de cada componente

$Cp_i$  : Poder calorífico de cada componente (estado líquido o vapor)

$\lambda_i$  : Calor latente de vaporización de cada componente.

Recopilando, se tienen las entalpías del líquido y del vapor a las distintas temperaturas:

<i>KJ/Kmol</i>	<b>105 °C</b>	<b>70 °C</b>
<b>LIQUIDO</b>	5976,7	3331,9
<b>VAPOR</b>	41380	25795

5.2.2 Cálculo del calor de condensación:

Se considera que el vapor entra a la temperatura de vaporización (105°C), por lo que para el cálculo del calor desprendido en la condensación se procede de la siguiente forma: la entalpía en estado vapor de la masa que condensará, menos la entalpía en estado líquido de dicha masa.

$$Q_{\text{condensación}} = m_C \cdot (H_V(105^\circ C) - H_L(105^\circ C))$$

$m_C$  : masa condensada;  $m_C = 9146 \text{ Kmol/h}$

$$Q_{\text{condensación}} = 91,46 \cdot (41380 - 5976,7) = 3237985,8 \text{ KJ / h}$$

### 5.2.3 Cálculo del calor de enfriamiento del líquido:

El líquido que se enfría hasta los  $70^\circ\text{C}$  corresponde al líquido que ha sido condensado, por tanto este parámetro coincide con el anterior cálculo. Se establece la diferencia entre la entalpía de este líquido a  $105^\circ\text{C}$  y la que tendría a  $70^\circ\text{C}$ , para obtener que calor se desprende al enfriarse.

$$Q_{\text{enfL}} = m_C \cdot (H_L(105^\circ C) - H_L(70^\circ C))$$

$m_C$  : masa condensada;  $m_C = 9146 \text{ Kmol/h}$

$$Q_{\text{enfL}} = 91,46 \cdot (5976,7 - 3331,9) = 241893,4 \text{ KJ / h}$$

### 5.2.4 Cálculo del calor de enfriamiento del vapor:

Se procede igual que en el enfriamiento del líquido pero en este caso empleando la masa que no ha condensado y las entalpías correspondientes del vapor para las dos temperaturas en estudio.

$$Q_{\text{enfV}} = m_{\text{NC}} \cdot (H_V(105^\circ C) - H_V(70^\circ C))$$

$m_{\text{NC}}$  : masa no condensada;  $m_{\text{NC}} = 8,54 \text{ Kmol/h}$

$$Q_{\text{enfV}} = 8,54 \cdot (41380 - 25795) = 133095,9 \text{ KJ / h}$$

### 5.2.5 Cálculo del calor total intercambiado:

Para establecer el total de calor intercambiado, sumamos los tres calores calculados previamente: calor de condensación, de enfriamiento del líquido y de enfriamiento del vapor:

$$Q_T = 3237985,8 + 241893,4 + 133095,9$$

$$Q_T = 3612975,1 \text{ KJ/h} = 867114 \text{ Kcal/h}$$

### 5.3 Determinación salto térmico y MLDT:

Para estimar la temperatura de diseño del aire, se selecciona una temperatura que no se excede en el lugar de localización de la planta en el 94 – 96 % de las horas de operación anuales. En este caso se supone una temperatura de 36°C.

El salto térmico deberá ser determinado por el diseñador. Esta selección puede hacerse mediante un proceso de optimización, en el que pueden intervenir algunas o todas las variables geométricas y físicas que definen el equipo, o bien puede asignarse un salto térmico arbitrario, aunque basándose en datos recomendados por el uso. Esta última opción será la utilizada en este proyecto. Se estipula la temperatura de salida del aire en 50°C obteniendo un salto térmico de 14°C.

$$T_{\text{entrada aire}} = 36 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{salida aire}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$$

Como ya se ha comentado anteriormente, se necesitan conocer las 4 temperaturas terminales, dos para el fluido de tubos y las dos para el aire. Como estas temperaturas varían continuamente a medida que los fluidos se desplazan, la diferencia de temperatura entre ambas varía de un punto a otro. Por ello es preciso obtener la temperatura media logarítmica:

$$LMTD = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln\left(\frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}\right)}$$

Donde:

$T_1$  : Temperatura entrada tubos;  $T_1 = 105$  °C

$T_2$  : Temperatura salida tubos;  $T_2 = 70$  °C

$t_1$  : Temperatura entrada aire;  $T_1 = 36$  °C

$t_2$  : Temperatura salida aire;  $T_1 = 50$  °C

Sustituyendo los valores de cada temperatura:

$$LMTD = \frac{(105 - 50) - (70 - 36)}{\ln\left(\frac{105 - 50}{70 - 36}\right)} = 43,66^\circ C$$

Para el cálculo de la temperatura media logarítmica corregida (MTD) se debe tener en cuenta que en un aerorefrigerante las dos corrientes (aire y fluido de proceso) circulan cruzándose entre sí, pero sin llegar a mezclarse, lo que se conoce como flujo cruzado o “*cross-flow*”.

Utilizando de nuevo las expresiones para R y P, y la gráfica del Anexo 5.2, se obtiene el factor de corrección Fc:

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = \frac{105 - 70}{50 - 36} = 2,5$$

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} = \frac{50 - 36}{105 - 36} = 0,202$$

El valor de Fc obtenido es 0,96. El valor de MTD quedará de multiplicar la temperatura media logarítmica por este factor:

$$MTD = Fc \times LMTD = 0,96 \times 43,66 = 41,92^\circ C$$

#### 5.4 Determinación de las temperaturas calóricas:

Como ya se definió en el apartado dedicado al precalentador de carga, es necesario estipular unas temperaturas calóricas a las que se lleva a cabo el intercambio, en los casos donde las temperaturas de los fluidos a lo largo del equipo vayan cambiando constantemente. Para el aero, se utilizan las expresiones:

$$T_{aire} = t_1 \times Fc \times (t_2 - t_1)$$

$$T_{tubos} = T_2 \times Fc \times (T_1 - T_2)$$

El valor de Fc suele estar comprendido entre 0,3 – 0,5. Tomamos según bibliografía, un valor intermedio de 0,4.

$$T_{aire} = 36 \times 0,4 \times (50 - 36) = 41,6^\circ C$$

$$T_{tubos} = 70 \times 0,4 \times (105 - 70) = 84^\circ C$$

#### 5.5 Cálculo de la superficie de intercambio (A):

Para el cálculo del área de transferencia de calor en el aero utilizamos la expresión ya conocida:

$$Q = U \cdot A \cdot MTD$$

Q : Cantidad de calor intercambiado; Q = 867114 Kcal/h

A : Superficie de intercambio de calor (m<sup>2</sup>)

MTD: Temperatura media logarítmica; MTD = 41,92 °C

U : Coeficiente global de transferencia de calor

Con la ayuda de la tabla del Anexo 3.2 y recomendaciones basadas en datos experimentales cedidos por CEPSA, se supone un valor de U inicial:

$$U \approx 225 \frac{\text{Kcal}}{\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$

Con ello, el valor del área resulta:

$$A_{prov} = \frac{Q}{U \cdot MTD} = \frac{867114}{225 \cdot 41,92} = 91,94 \text{m}^2$$

### 5.6 Dimensionamiento de la superficie del aéreo

Se calculará a continuación, el número de tubos, número de pasos, número de haces y demás parámetros de diseño del aero. Para el dimensionamiento, ha de considerarse que se han escogido tubos con las siguientes características:

Material: Acero inoxidable (debido a la naturaleza corrosiva del fluido que circula)

Material de las aletas: Aluminio tipo "L"

L : Longitud = 30 ft

d<sub>o</sub> : Diámetro exterior = 1" = 25,4 mm.

d<sub>i</sub> : Diámetro interior = 0,89" = 22,63 mm.

Espesor : 12 BWG = 2,77 mm.

d<sub>f</sub> : Diámetro de las aletas = 57 mm.

e<sub>f</sub> : Espesor de las aletas = 0,016" = 0,4 mm.

N<sub>f</sub> : Número aletas / pulgada = 9

#### 5.6.1 Cálculo del número de tubos (N<sub>tubos</sub>):

Para el cálculo del número de tubos se utiliza la ecuación que se expone a continuación:

$$N_{tubos} = \frac{A}{S_b \cdot (L - 0,15)}$$

$N_{tubos}$  : Número de tubos

$S_b$  : Superficie específica tubo base ( $m^2/m$ )

$A$  : Superficie de intercambio de calor

$L$  : Longitud de los tubos

En la ecuación se aprecia que la “longitud efectiva” de los tubos se ha considerado como la longitud total  $L$  menos 0,15 ft, para tener en cuenta la parte de tubo que a efectos prácticos no interviene en la transmisión debido a que están introducidas en las placas de tubos o son partes iniciales sin aletas.

La superficie específica del tubo base ( $m^2/m$ ) se define como:

$$S_b = \pi \cdot d_o \cdot (1 - (39,4 \cdot N_f \cdot e_f))$$

Donde:

$d_o$  : Diámetro exterior;  $d_o = 0,0254$  m.

$e_f$  : Espesor de las aletas;  $e_f = 0,0004$  mm.

$N_f$  : Número aletas / pulgada;  $N_f = 9$

Sustituyendo en la ecuación:

$$S_b = \pi \cdot 0,0254 \cdot (1 - (39,4 \cdot 9 \cdot 0,0004)) = 0,0685 m^2 / m$$

Con este valor y sustituyendo en la ecuación expuesta anteriormente, se obtiene el número de tubos del aerorefrigerante:

$$N_{tubos} = \frac{91,94}{0,0685 \cdot (30 - 0,15)} \approx 150$$

### 5.6.2 Disposición de los tubos

Se ha considerado que los tubos se dispongan en los vértices de un triángulo equilátero (paso triangular), al ser la disposición más extendida y de mayor frecuencia de uso. El pitch o distancia entre tubos (P), se denomina cuantía de paso. P debe ser tal que las aletas no se toquen entre si. Para ello se dejan al menos, unos 10 mm. Por tanto, P debe cumplir la siguiente relación:

$$P \geq d_f + 10$$

$d_f$  : Diámetro de las aletas de los tubos;  $d_f = 57$  mm

$$P \geq d_f + 10 = 57 + 10 = 67mm$$

### 5.6.3 Cálculo del número de tubos por fila y haz:

Seguiremos la siguiente metodología:

1. Suponer un número de haces, que en nuestro caso, observando otros ejemplos parecidos, determinaremos en dos haces.
2. Calcular el número de tubos por haz, dividiendo el número de tubos por el número de haces;

$$N_{th} = \frac{N_{tubos}}{N_{haces}} = \frac{150}{2} = 75 \text{ tubos por haz.}$$

3. Calcular el número de tubos por fila y haz. Para ello debemos suponer un número de filas. Este también suele ser un parámetro que se deduce en el proceso de optimización del equipo. El número de filas de tubos influye en la velocidad del aire y por tanto en la potencia de los ventiladores. Con determinado número de tubos, cuanto más juntos

estén (mayor número de filas), menos espacio en planta (menos área de paso de aire) y más camino a recorrer por el aire.

En este caso se utilizará un número de filas basado en datos experimentales. En el Anexo 5.3 se sugiere el criterio a seguir obteniéndose  $N_{\text{filas}} = 6$ .

Por tanto el número de tubos por fila y haz:

$$N_{\text{fth}} = \frac{N_{\text{th}}}{N_{\text{filas}}} = \frac{75}{6} = 12,5 \approx 13$$

4. Cálculo del número de secciones: En este tipo de equipos cada sección suele estar constituida por 2 haces por sección, con lo que en este caso solo se tiene una sección.

5. Recalcular el número total de tubos: Una vez calculado todos los parámetros correspondientes al número de tubos y su disposición, se vuelven a realizar los cálculos pero en sentido inverso para obtener el número real de tubos. Esto es debido a que en cada paso hemos ido redondeando los resultados:

$$N_{\text{tubos totales}} = N_{\text{sección}} \cdot N_{\text{haces}} \cdot N_{\text{filas}} \cdot N_{\text{tubos / fila}}$$

$$N_{\text{tubos totales}} = 1 \cdot 2 \cdot 6 \cdot 13 = 156$$

Con todo lo anterior, las características del aerorefrigerante respecto a la disposición de los tubos quedan como a continuación:

Número tubos totales:	156
Número de tubos por fila y haz:	13
Número de filas:	6
Número de haces:	2
Número de secciones:	1

### 5.6.4 Dimensiones del haz, de la sección y de la unidad

Una vez fijados el paso y número de filas de tubos, podremos determinar las dimensiones del haz, de la sección y de la unidad:

#### 5.6.4.1 Cálculo de la anchura mínima cabezal ( $a_c$ ):

La anchura mínima del cabezal del aero responde a la siguiente expresión:

$$a_c = (N_{\text{fila/haz}} - 1) \cdot P + 0,5 \cdot P + d_f + 0,2$$

Donde:

$N_{\text{fila/haz}}$  : Número de tubos por fila y haz;  $N_{\text{fila/haz}} = 13$

$a_c$  : Anchura mínima del haz

$d_f$  : Diámetro de las aletas de los tubos;  $d_f = 0,057$  m

$P$  : Paso de los tubos;  $P = 0,067$  m

El factor de 0,2 sumado al final de la ecuación, tiene en cuenta el espesor de las paredes del cabezal y las holguras mínimas necesarias entre tubo y la pared del cabezal.

$$a_c = (13 - 1) \cdot 0,067 + 0,5 \cdot 0,067 + 0,057 + 0,2 = 1,10m$$

#### 5.6.4.2 Cálculo de la anchura total del haz ( $a_h$ ):

Para el cálculo de la anchura total del haz, tendremos en cuenta la anchura mínima del cabezal más una parte constructiva ejemplarizada en el factor 0,2 que se suma, al igual que en la ecuación anterior.

$$a_h = a_c + 0,2 = 1,1 + 0,2 = 1,3m$$

5.6.4.3 Cálculo de la altura del cabezal ( $b_c$ ):

La altura del cabezal vendrá dada por la expresión:

$$b_c = [(N_f - 1) \cdot 0,866 \cdot P] + d_f + 0,2$$

$N_{\text{filas}}$  : Número de filas;  $N_{\text{filas}} = 6$

$d_f$  : Diámetro de las aletas de los tubos;  $d_f = 0,057$  m

$P$  : Paso de los tubos;  $P = 0,067$  m

$$b_c = [(6 - 1) \cdot 0,866 \cdot 0,067] + 0,057 + 0,2 = 0,55m$$

5.6.4.4 Cálculo de la anchura de la sección ( $a_s$ ):

Para el cálculo de la anchura de la sección, se emplea:

$$a_s = (a_h + 0,04) \cdot N_{\text{haz/sección}} + 0,06$$

$a_h$  : anchura del haz;  $a_h = 1,3$  m

$N_{\text{haz/sección}}$  : Número haces por sección;  $N_{\text{haz/sección}} = 2$

$$a_s = (1,3 + 0,04) \cdot 2 + 0,06 = 2,74m$$

5.6.4.5 Cálculo de la anchura del aéreo:

La anchura de la unidad será la anchura de la sección por el número de secciones de que disponga. En este caso solo existe una sección por lo que la anchura del aero coincide con la de la sección:

$$a_u = a_s = 2,74m$$

#### 5.6.4.6 Cálculo de la longitud de los haces y la sección:

La longitud de los haces y la sección será la de los tubos más la profundidad de los cabezales, que dependerá a su vez del diámetro de las tubuladuras que deben usarse. Si se supone una profundidad standard de 0,5 m:

$$L_h = L + 0,5 = 9,1 + 0,5 = 9,6m$$

Siendo  $L_h$  la longitud del haz.

#### 5.6.4.7 Cálculo del área de la planta:

Una vez calculadas la anchura del aéreo y la longitud del haz, se puede calcular el área que tendrá la planta:

$$A_{planta} = a_u \cdot L_h$$

Donde:

$a_u$  : Anchura del aero;  $a_u = 2,74$  m

$L_h$  : Longitud del haz;  $L_h = 9,6$  m

$$A_{planta} = 2,74 \cdot 9,6 = 26,3m^2$$

### 5.7 Diseño del lado del aire

Puesto que el aire es uno de los fluidos que intervienen en el aerorefrigerante, es esencial un buen conocimiento de sus propiedades.

Es evidente que la presencia de vapor de agua en la masa de aire alterará estas propiedades, aunque la influencia final en los valores de  $C_p$ ,  $\mu$  y  $K$  para el aire seco no será normalmente de entidad suficiente para el fin que se pretende y podrán tomarse, sin error apreciable, los valores correspondientes de estas propiedades para aire seco. No obstante si se desea tener en cuenta la influencia del vapor de agua en los valores de  $C_p$ ,  $\mu$  y  $K$  podrán obtenerse los valores para el vapor y luego ponderarlos con los del aire seco. La influencia de la humedad en la densidad si puede ser apreciable y en este caso conviene tenerla en cuenta.

En general, para obtener las propiedades del aire húmedo, deben ponderarse las propiedades del aire seco y del vapor de agua en función de las fracciones molares de los dos componentes de la mezcla aire-vapor. En este caso, se han obtenido datos bibliográficos de las propiedades del aire húmedo, por lo que no es necesario el cálculo.

Se exponen a continuación:

M	: Peso molecular	= 28,27
$C_p$	: Capacidad calorífica	= 0,249 Kcal/Kg·°C
K	: Conductividad térmica	= 0,0232 Kcal/h·m <sup>2</sup> ·°C
$\rho$	: Densidad	= 1,089 Kg/m <sup>3</sup>
$\mu$	: Viscosidad	= 0,067 Kg/h·m

### 5.7.1 Cálculo del área frontal de paso del aire (AF):

El área frontal de paso del aire se define como la sección mínima de paso de aire o espacio libre entre tubos de una fila. Se puede expresar como:

$$AF = N_{haces} \cdot [L_{ef} \cdot a_c - N_{fila/haz} \cdot (d_o + (d_f - d_o) \cdot e_f \cdot N_f \cdot 39,4)]$$

$N_{haces}$  : Número de haces;  $N_{haces} = 2$

$N_{fila/haz}$  : Número tubos por fila y haz;  $N_{fila/haz} = 13$

$L_{ef}$  : Longitud eficaz de los tubos;  $L_{ef} = (L - 0,15) \text{ ft} = 30 - 0,15 = 8,99 \text{ m}$

$a_c$  : Anchura del cabezal;  $a_c = 1,1$  m

$d_o$  : Diámetro exterior de los tubos;  $d_o = 0,0254$  m

$d_f$  : Diámetro de las aletas;  $d_f = 0,057$  m

$e_f$  : Espesor de las aletas;  $e_f = 0,0004$  m

$N_f$  : Número de aletas por pulgada;  $N_f = 9$

$$AF = 2 \cdot [8,99 \cdot 1,1 - 13 \cdot (0,0254 + (0,057 - 0,0254) \cdot 0,0004 \cdot 9 \cdot 39,4)] = 22,48 \text{ m}^2$$

$$AF = 22,48 \text{ m}^2$$

### 5.7.2 Cálculo del diámetro equivalente ( $D_e$ ):

El diámetro equivalente se define como:

$$D_e = \frac{2 \cdot (S_b + S_f)}{\pi \cdot [39,4 \cdot N_f \cdot (2 \cdot H_f - e_f) + 1]}$$

Donde el único parámetro que desconocemos es  $S_f$  que puede calcularse a partir de:

$$S_f = 61,84 \cdot (d_f^2 - d_o^2) \cdot N_f$$

$$S_f = 61,84 \cdot (0,057^2 - 0,0254^2) \cdot 9 = 1,44 \text{ m}^2 / \text{m}$$

El resto de parámetros son conocidos o se calculan fácilmente:

$S_b$  : Superficie específica tubo base;  $S_b = 0,0685 \text{ m}^2/\text{m}$

$$H_f = \frac{(d_f - d_o)}{2} = 0,0158 \text{ m}$$

Con todos los datos, se sustituye en la ecuación para obtener el diámetro equivalente:

$$D_e = \frac{2 \cdot (0,0685 + 1,44)}{\pi \cdot [39,4 \cdot 9 \cdot (2 \cdot 0,0158 - 0,0004) + 1]} = 0,08m$$

### 5.7.3 Cálculo del diámetro volumétrico equivalente ( $D_v$ ):

Para describir el diámetro volumétrico equivalente se recurre a la siguiente expresión:

$$D_v = \frac{4 \cdot 0,0866 \cdot P^2 - \pi \cdot [d_o^2 + (d_f^2 - d_o^2) \cdot 39,4 \cdot N_f \cdot e_f]}{2 \cdot (S_b + S_f)}$$

Donde:

P : Paso de tubos; P = 0,067 m

$d_o$  : Diámetro exterior de los tubos;  $d_o = 0,0254$  m

$d_f$  : Diámetro de las aletas;  $d_f = 0,057$  m

$e_f$  : Espesor de las aletas;  $e_f = 0,0004$  m

$N_f$  : Número de aletas por pulgada;  $N_f = 9$

$S_b$  : Superficie específica tubo base;  $S_b = 0,0685$  m<sup>2</sup>/m

$S_f$  : Superficie específica (calculada en el apartado anterior);  $S_f = 1,44$  m<sup>2</sup>/m

Sustituyendo todo en la fórmula anterior se tiene un valor de:

$$D_v = 0,0041m$$

### 5.7.4 Cálculo del caudal de aire:

El caudal de aire,  $m_a$ , requerido para eliminar una carga térmica Q, mediante el salto térmico estipulado de 14°C, será:

$$m_a = \frac{Q}{C_p \cdot \Delta T}$$

Q : Carga térmica; Q = 867114 Kcal/h

C<sub>p</sub> : Capacidad calorífica del aire; C<sub>p</sub> = 0,249 Kcal/Kg °C

ΔT : Salto de temperatura del aire; ΔT = 14 °C

$$m_a = \frac{867114}{0,249 \cdot 14} = 248750 \approx 250000 \text{ Kg/h}$$

### 5.7.5 Cálculo de la velocidad másica del aire (G<sub>a</sub>):

Se emplea la ecuación:

$$G_a = \frac{m_a}{AF}$$

AF : Área frontal de paso; AF = 22,48 m<sup>2</sup>

m<sub>a</sub> : Caudal másico de aire; m<sub>a</sub> = 250000 Kg/h

$$G_a = \frac{250000}{22,48} = 11120 \frac{\text{Kg}}{\text{h} \cdot \text{m}^2}$$

### 5.8 Cálculo de las pérdidas de carga

Se calcularán las caídas de presión tanto en el lado del aire, como en el lado de tubos.

#### 5.8.1 Cálculo de las pérdidas de carga del aire:

La correlación empleada en este cálculo tiene la forma:

$$\Delta P_a = 0,866 \cdot \frac{f_a \cdot G_a^2 \cdot N_{filas}}{g \cdot \rho_a \cdot \phi_a} \cdot \frac{P^{0,6}}{D_v^{0,6}}$$

$G_a$  : Caudal másico de aire;  $G_a = 250000$  Kg/h

$g$  : Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )

$f_a$  : Factor de fricción

$P$  : Paso de tubos;  $P = 0,067$  m

$D_v$  : Diámetro volumétrico equivalente;  $D_v = 0,0041$  m

$\rho_a$  : Densidad del aire húmedo;  $\rho_a = 1,089$  Kg/m<sup>3</sup>

$\phi_a$  : Factor de viscosidad

El factor de viscosidad  $\phi_a$ , toma el valor de 0,963. Para el cálculo del factor de fricción se debe calcular el número de Reynolds.

Para el cálculo del número de Reynolds:

$$Re_a = \frac{G_a \cdot D_v}{\mu_a}$$

$$Re_a = \frac{11120 \cdot 0,0041}{0,067} = 700$$

Con la gráfica correspondiente del Anexo se observa que  $f_a$  toma un valor de 0,3.

$$\Delta P_a = 0,866 \cdot \frac{0,3 \cdot 11120^2 \cdot 6}{1,27 \cdot 10^8 \cdot 1,089 \cdot 0,963} \cdot \frac{0,068^{0,6}}{0,0041^{0,6}} = 8,54 \text{ Kg} / m^2$$

$$\Delta P_a = 0,0008 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$$

### 5.8.2 Cálculo de la pérdida de carga en tubos:

El cálculo de la caída de presión en el lado de tubos se puede obtener a partir de las condiciones del vapor a condensar, con la siguiente fórmula:

$$\Delta P_f = \frac{f_t \cdot G_t^2 \cdot N_{pasos} \cdot L}{g \cdot \rho \cdot d_i}$$

Donde:

$G_t$  : Velocidad másica en el interior de los tubos (Kg/h·m<sup>2</sup>)

$g$  : Aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>)

$f_t$  : Factor de fricción del lado de tubos

$L$  : Longitud de los tubos (m)

$d_i$  : Diámetro interior de tubos

$\rho$  : Densidad del fluido que circula por tubos;  $\rho_a = 1,089 \text{ Kg/m}^3$

$N_p$  : Número de pasos por tubos

También se debe tener en cuenta la caída de presión debido al cambio brusco de dirección que sufre el fluido circulante por los tubos al producirse el cambio de paso. Esta pérdida de carga se calcula mediante:

$$\Delta P_r = \frac{2 \cdot G_t^2 \cdot N_{pasos}}{g \cdot \rho}$$

La suma de estos dos parámetros dará la pérdida de carga total en los tubos, ya que se desprecian las pérdidas por fricción en las conexiones de entrada y salida debido a su pequeña longitud.

Para las condiciones del gas, se obtiene la velocidad másica y el número de Reynolds:

$$G_t = \frac{m_{condensables} + m_{incondensables}}{a_t}$$

$G_t$  : Velocidad másica

$m_{condensables}$  : Masa condensada;  $m_c = 237 \text{ Kg/h}$

$m_{incondensables}$  : Masa no condensada;  $m_i = 1644 \text{ Kg/h}$

El factor que falta se calcula a partir de:

$$a_t = \frac{\pi \cdot d_o^2 \cdot NT}{4 \cdot N_{pasos}} = \frac{\pi \cdot 0,0254^2 \cdot 156}{4 \cdot 2}$$

$$a_t = 0,04m^2$$

Así pues, la velocidad másica queda tal como a continuación:

$$G_t = \frac{237 + 1644}{0,04} = 47025 \frac{Kg}{h \cdot m^2}$$

Y el número de Reynolds se calcula igual que en anteriores ocasiones:

$$Re = \frac{d_o \cdot G_t}{\mu} = \frac{0,0254 \cdot 47025}{0,02} = 59722$$

Del Anexo 3.7 se obtiene el factor de fricción del lado de tubos  $f_t = 0,003$ . Se calculan los dos términos de pérdida de carga:

$$\Delta P_f = \frac{0,003 \cdot 47025^2 \cdot 2 \cdot 9,1}{1,27 \cdot 10^8 \cdot 1,5 \cdot 0,02263} = 126 \frac{Kg}{m^2}$$

$$\Delta P_r = \frac{2 \cdot 47025^2 \cdot 2}{1,27 \cdot 10^8 \cdot 1,5} = 46,43 \frac{Kg}{m^2}$$

$$\Delta P_{total} = \Delta P_f + \Delta P_r = 126 + 46,43 = 172,43 Kg / m^2$$

La pérdida de carga total a la entrada será:

$$\Delta P_{total} = 0,017 \frac{Kg}{cm^2}$$

La pérdida de carga en los tubos es admisible ya que está por debajo del valor de  $0,14 \text{ Kg/cm}^2$  supuesto inicialmente.

### 5.9 Elección de los ventiladores

Para el diseño de los ventiladores, se debe, en primer lugar, seleccionar el tipo de ventilador a emplear, que número de palas posee, de que material son, etc. La elección se realiza de acuerdo con los requerimientos básicos del usuario. En este caso tenemos:

- Palas de aluminio
- 4 palas por ventilador
- 2 ventiladores por sección
- Regulación automática

#### 5.9.1 Cálculo del diámetro del ventilador:

El diámetro adecuado para los ventiladores vendrá dado por dos exigencias principales:

- Por un lado, el ventilador deberá barrer un área tal que no se formen “zonas muertas” en los haces. Para ello, se suelen dimensionar los haces de modo que la zona servida por el ventilador sea lo más cuadrada posible. Además, se busca que el diámetro del ventilador sea tal que el área servida ( $a_s \cdot L/2$ ), no sea superior a 1,2 – 1,5 veces el área barrida.

Todo esto puede expresarse tal que así:

$$a_s \cdot \frac{L}{2} = 1,3 \cdot \left( \frac{\pi \cdot \varphi_v^2}{4} \right)$$

$a_s$  : Anchura de la sección;  $a_s = 2,74 \text{ m}^2$

$\varphi_v$  : Diámetro del ventilador

$L$  : Longitud de los tubos;  $L = 9,1 \text{ m}$

$$\varphi_v = 0,7 \cdot (a_s \cdot L)^{1/2}$$

Sustituyendo tendremos un diámetro de ventilador igual a:

$$\varphi_v = 0,7 \cdot (2,74 \cdot 9,1)^{1/2} = 3,50 \text{ m} = 11,5 \text{ ft}$$

Los diámetros de ventiladores están normalizados. Para aerorefrigerantes, la gama comprende desde los 4 a los 16 ft. En este caso, se tomará un valor normalizado de:

$$\varphi_v = 12 \text{ ft}$$

- Por otro lado, el ventilador elegido deberá dar el caudal requerido para el servicio con un rendimiento aceptable. Deberá cumplir además, otros requisitos impuestos, como no sobrepasar cierto valor de velocidad periférica, o cumplir con las límites para el nivel sonoro. Todos estos datos serán dados por el fabricante.

## **6. BOMBAS**

### **6.1 Cálculo de bombas**

A continuación se van definiendo los parámetros necesarios para realizar el diseño adecuado de una bomba. En general, los datos más importantes a la hora de seleccionar estos equipos, son el caudal que deben impulsar y la carga total o altura que son capaces de alcanzar.

Aunque todos los cálculos se realicen para una bomba según la corriente que impulse, se debe recordar que en el diseño final de la planta, cada corriente tiene asociadas dos bombas (A y B) que permiten una mayor capacidad y un manejo más amplio de la instalación.

### **6.2 Procedimiento de cálculo**

#### **6.2.1 Cálculo de la altura útil**

La altura útil es la energía neta que la bomba transmite al fluido. El cálculo se realiza aplicando la ecuación de Bernoulli entre dos puntos, uno en la parte de aspiración (punto 1) y otro en la parte de descarga de la bomba (punto 2):

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + H = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + z_2 + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + hf$$

De la cual puede despejarse H o altura útil:

$$H = \frac{P_2 - P_1}{\rho \cdot g} + (z_2 - z_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot g} + hf$$

Donde los términos corresponden a:

$\frac{P_2 - P_1}{\rho \cdot g}$  : Diferencia de presiones entre la impulsión y la aspiración.

$z_2 - z_1$  : Diferencia de altura de los puntos considerados.

$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot g}$  : Diferencia de velocidad entre los dos puntos considerados.

$h_f$  : Pérdidas de carga totales externas a la bomba.

### 6.2.2 Cálculo de la potencia de la bomba

La potencia útil,  $W$ , es la potencia neta que transmite la bomba al fluido, es decir, representa la potencia invertida en impulsar el caudal en cuestión a la altura útil. Esta es calculable mediante la siguiente expresión:

$$W_{\text{util}} = Q \cdot \eta \cdot g \cdot H$$

Donde:

$Q$  : Caudal que proporciona la bomba ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$\rho$  : Densidad del fluido ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )

$H$  : Altura útil (m)

### 6.2.3 Rendimiento de la bomba

Establece la relación entre la potencia hidráulica suministrada por la bomba y la potencia absorbida en el eje. Si se necesita una bomba que suministre una altura  $H$ ,

tendremos que tener en cuenta el rendimiento de la bomba a la hora de seleccionarla, puesto que no trabajará al 100%.

La potencia suministrada a una bomba siempre es superior a su potencia desarrollada, debido a las pérdidas de fricción ocasionadas en su interior, a las pérdidas de carga, etc.

El rendimiento de las bombas ( $\eta$ ) dependerá de distintos parámetros. Se tomará un valor Standard de 52%, sugerido por CEPSA.

$$W_{real} = \frac{W_{util}}{\eta}$$

#### 6.2.4 Cálculo de las pérdidas de carga

A la hora de calcular la pérdidas de carga que se deben de tener en cuenta, se consideran las correspondientes a los tramos de tubería recta, y a la pérdida de carga que viene impuesta por los accesorios, como pueden ser, codos de distintos ángulos, accesorios en tipo T, distintos tipos de válvulas, o los mismos equipos por los que tiene que pasar el fluido (precalentador, aerorefrigerante).

Se pueden estimar estas pérdidas de carga según la siguiente expresión:

$$\Delta P = f \cdot \frac{L_{eq}}{d_i} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \text{ en m.}$$

Es una ecuación similar a la expuesta para las pérdidas de carga en tuberías. Las diferencias se salvan en la utilización de un gráfico diferente para estudiar el factor de fricción (Anexo 6.1).

El procedimiento dicta que se calculen las pérdidas de carga para la tubería recta, y se sumen a las de los accesorios. El diseño de piping completo de la planta, incluyendo todo tipo de accesorios, queda fuera del alcance del proyecto. Por ese

motivo, se estimarán unos 200 metros de longitud equivalente, que incluya la tubería recta y los accesorios, y se estimará la pérdida para este dato. En un posterior desarrollo de la ingeniería de detalle, estos datos serían revisitados y recalculados de manera adecuada.

#### 6.2.5 Carga neta positiva de aspiración (NPSH)

Siempre que la presión a la que se somete un líquido sea inferior a su presión de vapor, a la temperatura en la que se encuentre, se producirá el correspondiente cambio de fase al estado vapor. Si esto ocurre en el interior de la bomba, las burbujas generadas, se impulsan a un punto de mayor presión, donde súbitamente, se produce el colapso de dichas burbujas. Es lo que se conoce como cavitación de la bomba, la cual tiene efectos negativos en su funcionamiento y su mantenimiento, pues causa daños en la zona de succión, paletas del rodete, etc.

Para evitar esto se debe mantener la carga neta positiva de aspiración requerida. Corresponde a la carga total equivalente en el centro de la bomba menos la presión de vapor. Cada fabricante hace públicas sus propias curvas de variación de NPSH con la capacidad y velocidad de funcionamiento de cada una de las bombas.

Cuando se diseña la instalación de una bomba, se debe tener en cuenta la carga neta positiva de aspiración disponible, y que esta sea mayor que la requerida, para la capacidad de funcionamiento deseada.

La carga neta positiva de aspiración disponible se puede calcular de esta forma:

$$NPSH_{disponible} = \frac{P_1 - P_v}{\rho} + H - \Delta P_{fricción}$$

Donde:

$P_1$  : Presión en la zona de aspiración de la bomba

$P_v$  : Presión de vapor del líquido

$\rho$  : Densidad del fluido a la temperatura considerada

$H$  : Carga total de la bomba

### 6.3 Bombas de la planta

Las bombas del equipo se identifican del siguiente modo:

B<sub>1</sub> : Bomba de impulsión de la carga de alimentación hacia el stripper.

B<sub>2</sub> : Bomba de impulsión de los fondos del stripper hacia tratamiento de aguas.

B<sub>3</sub> : Bomba de impulsión del agua procedente del aerorefrigerante hacia cabeza de columna.

Las alturas de elevación del fluido, se han tomado según lo dispuesto en los planos. La entrada de la alimentación de aguas ácidas al stripper, se lleva a cabo a una altura aproximada de 16 m. La elevación que sufre la corriente de extracción es de 5 m. Y por último, la bomba de fondos, no se conoce la elevación que necesita, se estima un metro para los cálculos pero debe ser revisado en la ingeniería de detalle. Los datos de presión de vapor se han tomado de las tablas del Anexo 5.1.

Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

<b>BOMBAS</b>				
<b>Propiedades</b>	<b>Unid.</b>	<b>B<sub>1</sub></b>	<b>B<sub>2</sub></b>	<b>B<sub>3</sub></b>
<b>Temperatura</b>	<b>°C</b>	50	60	70
<b>Caudal</b>	<b>m<sup>3</sup>/h</b>	22,41	23,26	2
<b>Diámetro interno</b>	<b>mm</b>	73,6	62,7	33,96
<b>Densidad, ρ</b>	<b>Kg/m<sup>3</sup></b>	988,25	980,45	972,5
<b>Factor de fricción, f</b>	-	0,018	0,022	0,023
<b>Reynolds</b>	-	210045	250034	73075
<b>Presión de succión</b>	<b>Kg/cm<sup>2</sup></b>	1,38	1,78	1,38
<b>Presión de descarga</b>	<b>Kg/cm<sup>2</sup></b>	6,62	8,12	5,8
<b>ΔP</b>	<b>Kg/cm<sup>2</sup></b>	5,24	6,34	4,42
<b>Presión de vapor</b>	<b>Kg/cm<sup>2</sup></b>	0,1217	0,1952	0,3055
<b>Altura elevación</b>	<b>m</b>	16	1	5
<b>Pérdida carga fricción</b>	<b>m</b>	11,81	30,4	27,5
<b>Carga total H</b>	<b>m</b>	52,4	63,4	44,2
<b>Rendimiento</b>	<b>%</b>	52	52	52
<b>Trabajo</b>	<b>KW</b>	3,9	4,5	0,4
<b>NPSH</b>	-	15	15	10

## **7. TUBERÍAS Y ACCESORIOS**

### **7.1 Consideraciones previas**

Para hablar de un sistema de tuberías, se deben de nombrar las partes más importantes que se encuentran agrupadas en: tuberías, accesorios, bridas y válvulas.

Los sistemas de tuberías representan, aproximadamente un tercio del coste del material de una planta de proceso. Requieren entre un 30 y un 40% del trabajo de montaje y consumen un 45% de las horas-hombre de ingeniería, ocupando un 60% del volumen de material.

Los únicos cálculos realizados en los anteriores elementos pertenecen a las tuberías y la elección del diámetro y el espesor necesario en cada conducción. El resto, tanto brida como accesorios y válvulas, quedan seleccionados en la memoria descriptiva.

### **7.2 Normalización de las tuberías**

El Standard de tuberías más importantes y de uso más frecuente es el Código para tuberías a Presión ANSI B.3.1.1.8. Este código es una guía de los mínimos requerimientos para el diseño que requieren las tuberías.

Estas normas establecen para cada diámetro nominal (en pulgadas), diferentes espesores normalizados, siendo idéntico el diámetro exterior. El diámetro interno por tanto, varía junto con el espesor para cada valor normalizado.

Para tuberías de acero al carbono, las normas más usuales de dimensiones, tolerancias y clasificaciones son: ANSI B.36.10, API 5L y API 5LX. Para el caso de acero inoxidable, corresponden: ANSI B.38.19 y API 5LS.

Los espesores se pueden clasificar en:

- Standard (STD)
- Extra fuerte (XS)
- Doble extrafuerte (XXS)

También pueden clasificarse por el número de Schedule. Son números arbitrarios a los que corresponde un espesor según el tamaño nominal. La serie va desde el 5 a 160, a distintos intervalos. Pueden verse en los anexos.

Para los aceros al carbono, los Schedules más comunes son el 40 (equivalente al STD), el 80 (o XS), y el 160 (algo inferior al XXS). Para diámetros nominales superiores a 10", también se usan los números 10 y 20. En acero inoxidable, los más usados son 10, 20 y 40.

### 7.3 Cálculo de las tuberías

La elección del diámetro de tubería vendrá en función de una serie de parámetros:

- Si el fluido debe ser bombeado a través de la tubería, el tamaño seleccionado será aquel que obtenga un coste anual de operación menor.
- Si el fluido no es bombeado y la impulsión del flujo por gravedad es suficiente, el tamaño del diámetro será el menor que requiera el caudal que se esté utilizando.

Hay distintas correlaciones para estimar la velocidad del fluido, ya sea en función del diámetro utilizado, o de la densidad del fluido. Para fluidos bombeados, la velocidad estará entre 1 y 3 m/s y para gases y vapores entre 15-30 m/s.

Las pérdidas de carga admisibles para unos 100 metros de tuberías se encuentran tabuladas como sigue:

1. Aspiración de bombas  $0,4 \text{ Kg/cm}^2$ .
2. Impulsión de bombas
  - Caudal de  $0-60 \text{ m}^3/\text{h} = 0,6-0,8 \text{ Kg/cm}^2$ .
  - Caudal de  $0-160 \text{ m}^3/\text{h} = 0,4-0,7 \text{ Kg/cm}^2$ .
3. Línea de gases y vapores
  - Presión inferior a  $1 \text{ Kg/cm}^2 = 0,05-0,2 \text{ Kg/cm}^2$ .
  - Presión superior a  $1 \text{ Kg/cm}^2 = 0,005-0,1 \text{ Kg/cm}^2$ .

### 7.3.1 Cálculo del diámetro optimo de tuberías

Aunque el coste de una tubería aumenta con su diámetro, también es cierto que los costes de impulsión mediante una bomba, serán menores cuanto menores sean los diámetros. Así pues, hay que llegar a un compromiso en los casos en los que se tenga impulsión mediante bombas e intentar minimizar en todo momento el coste global del *piping* de la planta.

El procedimiento para la elección de los diámetros óptimos será el siguiente:

*Paso 1:*

Para el cálculo de este diámetro, se debe suponer un diámetro de partida para cada una de las tuberías.

Se ha tomado, para obtener la primera aproximación, las siguientes expresiones para flujo turbulento:

Acero al carbono:

$$d_{\text{optimo}} = 293 \cdot m^{0,53} \cdot \rho^{-0,37}$$

Acero inoxidable

$$d_{\text{optimo}} = 260 \cdot m^{0,52} \cdot \rho^{-0,37}$$

Donde se considera “m”, como el caudal másico en unidades de Kg/s, y la densidad en unidades del SI (Kg/m<sup>3</sup>).

*Paso 2:*

A partir del diámetro calculado, con la utilización de los valores de las tablas del Anexo 7.1, se elegirá un diámetro normalizado con el que continuar los cálculos.

*Paso 3:*

Se calcularán las pérdidas de carga de cada tubería en base al diámetro supuesto. En primer lugar se calculará el Reynolds, se obtendrá el factor de fricción y se despejará la siguiente ecuación:

$$\Delta P = 8 \cdot f \cdot \frac{L}{d_i} \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \text{ en N/m}^2$$

Donde:

f : Factor de fricción

L : Longitud de tubería (se supondrá una pérdida de carga para 100 m de tubería)

d<sub>i</sub> : Diámetro interior (tabulado en las tablas del Anexo 7.1)

ρ : Densidad del fluido

v : Velocidad del fluido en la tubería

Para obtener el factor de fricción, se estima la rugosidad de la tubería ( $e$ ) que será 0,046 mm. para aceros comerciales. Calculando el factor  $e/d_i$  y con el número de Reynolds, se utiliza la gráfica del Anexo 7.2.

*Paso 4:*

Una vez calculadas las pérdidas de carga, se comparan con las admisibles, enumeradas anteriormente. Si fuese una pérdida de carga mayor, se tendría que tomar un diámetro también mayor.

### 7.3.2 Líneas principales de la planta

Se identifican a continuación las líneas principales de la unidad, enumeradas por la letra T junto al servicio que prestan. Su ubicación se puede observar en el dibujo:

- T<sub>1</sub> = Alimentación de aguas ácidas al precalentador de carga.
- T<sub>2</sub> = Alimentación caliente de aguas ácidas al stripper.
- T<sub>3</sub> = Extracción lateral del stripper hacia el aerorefrigerante.
- T<sub>4</sub> = Reciclo frío hacia cabeza del stripper.
- T<sub>5</sub> = Corriente de gas ácido de cabeza.
- T<sub>6</sub> = Alimentación de agua tratada al reboiler.
- T<sub>7</sub> = Vapor de baja presión.
- T<sub>8</sub> = Corriente procedente del reboiler hacia el stripper.
- T<sub>9</sub> = Corriente de fondo del stripper hacia precalentador.
- T<sub>10</sub> = Agua desorbida que abandona el precalentador hacia tratamiento.

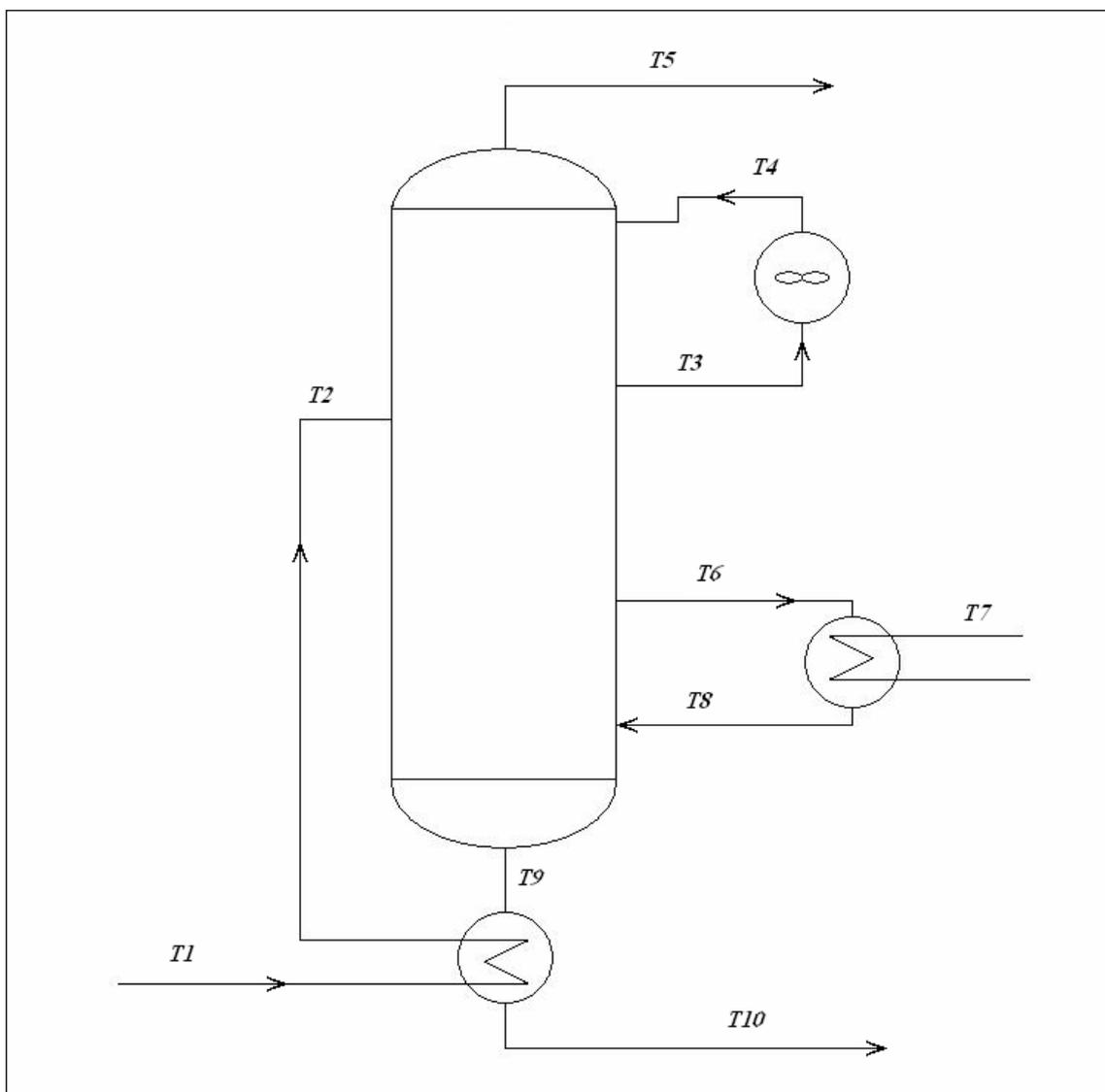


Figura 7.1: Líneas de la unidad

### 7.3.3 Resultados de los diámetros de las tuberías

Los resultados obtenidos para estas corrientes se muestran a continuación:

#### Corriente 1:

Corresponde a las aguas ácidas procedentes del botellón de carga, que se dirigen al precalentador de carga y pasan por tubos. Las características de la corriente son:

- Fase de la corriente: Líquido
- Caudal másico: 22150 Kg / h
- Caudal volumétrico: 22,41 m<sup>3</sup> / h
- Densidad: 988,25 Kg / m<sup>3</sup>
- Viscosidad: 0,5 Cp
- Tubo: 3" Sch 80
- Material: Acero al carbono
- Diámetro interior: 73,66 mm.
- Reynolds: 212705
- Factor de fricción: 0,002
- Pérdida de carga: 0,2245 Kg/cm<sup>2</sup>.

#### Corriente 2:

Corresponde a la extracción lateral de vapor que se dirige al aerorefrigerante para ser condensada. Las características de la corriente son:

- Fase de la corriente: Líquido
- Caudal másico: 22150 Kg / h
- Caudal volumétrico: 23,26 m<sup>3</sup> / h
- Densidad: 952,1 Kg / m<sup>3</sup>

- Viscosidad: 0,3 Cp
- Tubo: 3" Sch 80
- Material: Acero al carbono
- Diámetro interior: 73,66 mm.
- Reynolds: 354510
- Factor de fricción: 0,0023
- Pérdida de carga: 0,268 Kg/cm<sup>2</sup>.

Corriente 3:

Corresponde a las aguas ácidas procedentes del botellón de carga, que se dirigen al precalentador de carga y pasan por tubos. Las características de la corriente son:

- Fase de la corriente: Vapor
- Caudal másico: 1880,2 Kg / h
- Caudal volumétrico: 2530 m<sup>3</sup> / h
- Densidad: 0,743 Kg / m<sup>3</sup>
- Viscosidad: 0,01 Cp
- Tubo: 10" Sch 160
- Material: Acero inoxidable
- Diámetro interior: 215,9 mm.
- Reynolds: 308008
- Factor de fricción: 0,002
- Pérdida de carga: 0,01 Kg/cm<sup>2</sup>.

Corriente 4:

Corresponde a la corriente procedente del aerorefrigerante y que se recircula por cabeza del stripper. Las características de la corriente son:

- Fase de la corriente: Mezcla
- Caudal másico: 1880,2 Kg / h
- Caudal volumétrico: 1,93 m<sup>3</sup> / h
- Densidad: 972,5 Kg / m<sup>3</sup>
- Viscosidad: 0,4 Cp
- Tubo: 1 ½" Sch 160
- Material: Acero inoxidable
- Diámetro interior: 33,96 mm.
- Reynolds: 48953
- Factor de fricción: 0,0028
- Pérdida de carga: 0,110 Kg/cm<sup>2</sup>.

Corriente 5:

Corresponde al gas ácido que se extrae por cabeza de columna y que va directamente a las plantas de azufre. Las características de la corriente son:

- Fase de la corriente: Vapor
- Caudal másico: 297,95 Kg / h
- Caudal volumétrico: 297,56 m<sup>3</sup> / h
- Densidad: 1,002 Kg / m<sup>3</sup>
- Viscosidad: 0,01 Cp
- Tubo: 3" Sch 80
- Material: Acero inoxidable
- Diámetro interior: 73,66 mm.
- Reynolds: 143060
- Factor de fricción: 0,0022
- Pérdida de carga: 0,045 Kg/cm<sup>2</sup>.

**Corriente 6:**

Corresponde a la corriente de fondo que se dirige al reboiler. Las características de la corriente son:

- Fase de la corriente: Líquido
- Caudal másico: 24037 Kg / h
- Caudal volumétrico: 25,58 m<sup>3</sup> / h
- Densidad: 939,5 Kg / m<sup>3</sup>
- Viscosidad: 0,25 Cp
- Tubo: 3" Sch 40
- Material: Acero al carbono
- Diámetro interior: 77,92 mm.
- Reynolds: 436414
- Factor de fricción: 0,002
- Pérdida de carga: 0,210 Kg/cm<sup>2</sup>.

**Corriente 7:**

Corresponde a la corriente de vapor de baja presión que alimenta el reboiler. Las características de la corriente son:

- Fase de la corriente: Vapor
- Caudal másico: 2330 Kg / h
- Caudal volumétrico: 970,83 m<sup>3</sup> / h
- Densidad: 2,4 Kg / m<sup>3</sup>
- Viscosidad: 0,01 Cp
- Tubo: 8" Sch 40
- Material: Acero al carbono
- Diámetro interior: 202,71 mm.
- Reynolds: 406525

- Factor de fricción: 0,0019
- Pérdida de carga: 0,006 Kg/cm<sup>2</sup>.

**Corriente 8:**

Corresponde a la mezcla de líquido con el vapor que van desde el reboiler hasta el fondo del stripper. Las características de la corriente son:

- Fase de la corriente: Mezcla
- Caudal másico: 24037 Kg / h
- Caudal volumétrico: 933,84 m<sup>3</sup> / h
- Densidad: 25,74 Kg / m<sup>3</sup>
- Viscosidad: 0,2 Cp
- Tubo: 8" Sch 40
- Material: Acero al carbono
- Diámetro interior: 254,5 mm.
- Reynolds: 167020
- Factor de fricción: 0,002
- Pérdida de carga: 0,021 Kg/cm<sup>2</sup>.

**Corriente 9:**

Corresponde a la corriente de agua desorbida que abandona el stripper y se dirige hacia el precalentador de carga, por el lado de carcasa. Las características de la corriente son:

- Fase de la corriente: Líquido
- Caudal másico: 21852 Kg / h
- Caudal volumétrico: 23,26 m<sup>3</sup> / h
- Densidad: 939,5 Kg / m<sup>3</sup>
- Viscosidad: 0,25 Cp

- Tubo: 2 ½" Sch 40
- Material: Acero al carbono
- Diámetro interior: 62,71 mm.
- Reynolds: 492970
- Factor de fricción: 0,0022
- Pérdida de carga: 0,578 Kg/cm<sup>2</sup>.

Corriente 10:

Corresponde a la corriente de agua desorbida que abandona el precalentador y va a planta de tratamiento. Las características de la corriente son:

- Fase de la corriente: Líquido
- Caudal másico: 21852 Kg / h
- Caudal volumétrico: 22,29 m<sup>3</sup> / h
- Densidad: 980,5 Kg / m<sup>3</sup>
- Viscosidad: 0,5 Cp
- Tubo: 2 ½" Sch 40
- Material: Acero al carbono
- Diámetro interior: 62,71 mm.
- Reynolds: 246485
- Factor de fricción: 0,002
- Pérdida de carga: 0,492 Kg/cm<sup>2</sup>.

A continuación se adjunta un cuadro resumen con las características de cada línea y los datos correspondientes al cálculo del número de Reynolds:

<b>Cálculo de las Pérdidas de Carga</b>											
Prop.	Unid.	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>7</sub>	T <sub>8</sub>	T <sub>9</sub>	T <sub>10</sub>
Fase	-	Líquida	Líquida	Vapor	Mezcla	Vapor	Líquida	Vapor	Mezcla	Líquida	Líquida
Caudal m.	Kg/h	22150	22150	1880,22	1880,22	297,95	24037	2330	24037	21852	21852
Caudal v.	m <sup>3</sup> /h	22,41	23,26	2530,58	1,93	297,56	25,58	970,83	933,84	23,26	22,29
ρ	Kg/m <sup>3</sup>	988,25	952,10	0,74	972,50	1,001	939,50	2,40	25,74	939,50	980,45
μ	Cp	0,5	0,3	0,01	0,4	0,01	0,25	0,01	0,2	0,25	0,5
d. calc.	mm.	59,84	60,67	207,02	14,55	71,13	63,67	168,29	240,97	60,53	59,58
Tipo tubo	-	3" - 80	3" - 80	10" - 160	1 1/2" - 160	3" - 80	3" - 40	8" - 40	10" - 40	2 1/2" - 40	2 1/2" - 40
Material	-	A.C.	A.C.	A. I	A. I	A. I	A.C.	A.C.	A.C.	A.C.	A.C.
d. interior	mm.	73,66	73,66	215,90	33,96	73,66	77,92	202,71	254,50	62,71	62,71
ΔP	Kg/cm <sup>2</sup>	0,225	0,268	0,010	0,110	0,045	0,210	0,006	0,021	0,578	0,492

<b>Cálculo del Reynolds</b>											
Prop.	Unid.	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>7</sub>	T <sub>8</sub>	T <sub>9</sub>	T <sub>10</sub>
ρ	Kg/m <sup>3</sup>	988,25	952,10	0,74	972,50	1,001	939,50	2,40	25,74	939,50	980,45
μ	Cp	0,50	0,30	0,01	0,40	0,01	0,25	0,01	0,20	0,25	0,50
A paso	m <sup>2</sup>	0,0043	0,0043	0,0366	0,0009	0,0043	0,0048	0,0323	0,0509	0,0031	0,0031
v	m/s	1,46	1,52	19,20	0,59	19,40	1,49	8,36	5,10	2,09	2,00
f	-	0,0020	0,0023	0,0020	0,0028	0,0023	0,0020	0,0019	0,0020	0,0023	0,0020
Re	-	212705	354509	308008	48954	143060	436413	406525	167020	492971	246485

#### 7.3.4 Comprobación de los espesores de las tuberías

La sección de código aplicable en la mayoría de las plantas de proceso es ANSI B.31.3, referente a tuberías de Refinerías de Petróleos. Se emplea la siguiente fórmula para comprobar que los espesores estimados, son adecuados para las condiciones de cada tubería:

$$e = \frac{d_e \cdot P \cdot M}{2 \cdot S} + C.A. \cdot M$$

Donde:

$e$  : Espesor de la tubería (pulgadas)

$P$  : Presión interna de diseño (psi) =  $1,1 \cdot P_{op}$

$S$  : Tensión máxima admitida para el material a la temperatura de diseño (psi)

$M$  : Tolerancia de fabricación;  $M = 1,125$  para tubos de acero

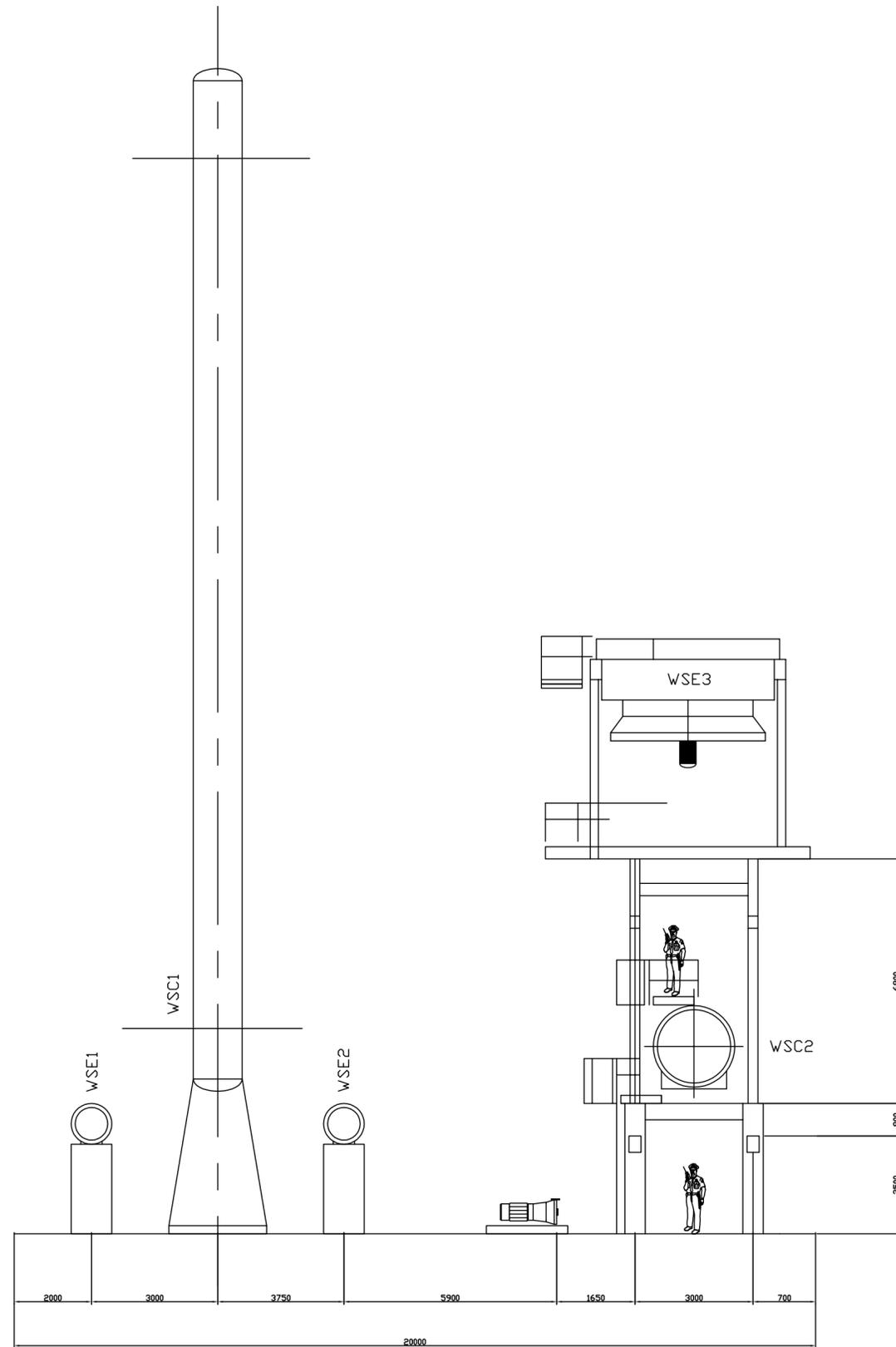
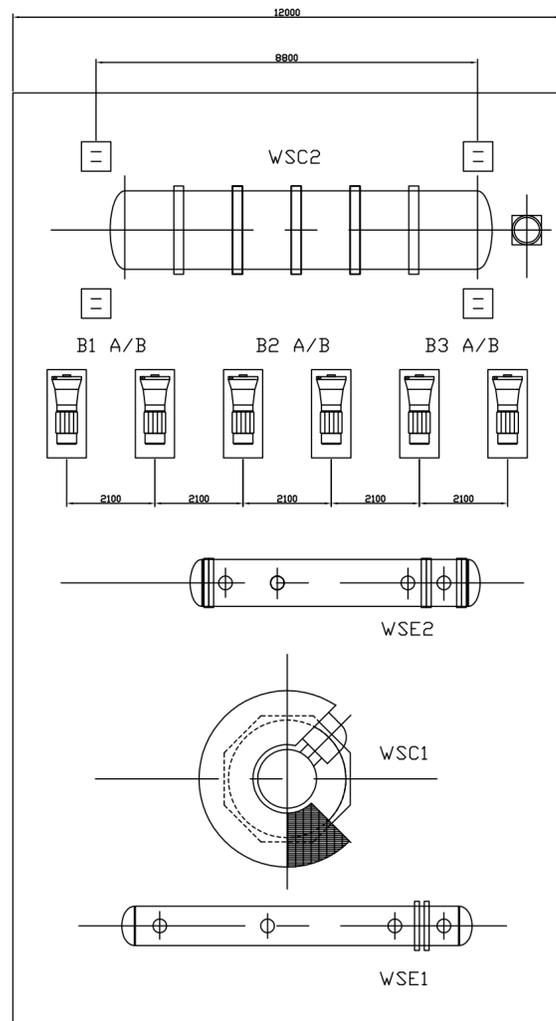
$d_e$  : Diámetro exterior de la tubería (pulgadas)

C.A : Sobreespesor de corrosión (pulgadas); C.A. = 0,118" (3 mm)

El valor de tensión máxima admitida para el material ( $S$ ), que depende de la temperatura de diseño, será constante para los aceros empleados en las tuberías en el intervalo de temperaturas en que se trabaja. Este valor es de  $790 \text{ Kg/cm}^2$ .

A continuación, se muestran los espesores mínimos calculados para las tuberías y comparados con los espesores mínimos que dan las tuberías seleccionadas, comprobándose en todos los casos que se ha seleccionado correctamente. Se emplearán para los cálculos, las tablas correspondientes para aceros del anexo:

<b>Comprobación de espesores</b>											
<b>Prop.</b>	<b>Unid.</b>	<b>T<sub>1</sub></b>	<b>T<sub>2</sub></b>	<b>T<sub>3</sub></b>	<b>T<sub>4</sub></b>	<b>T<sub>5</sub></b>	<b>T<sub>6</sub></b>	<b>T<sub>7</sub></b>	<b>T<sub>8</sub></b>	<b>T<sub>9</sub></b>	<b>T<sub>10</sub></b>
<b>T</b>	<b>°C</b>	40	95	105	70	75	109,3	147	110	110	60
<b>P</b>	<b>psi</b>	20,12	18,89	17,95	20,9	17,17	21,66	74,28	21,35	21,66	18,72
<b>S</b>	<b>psi</b>	11600	11600	11600	11600	11600	11600	11600	11600	11600	11600
<b>d ext.</b>	<b>in</b>	3	3	10	1,25	3	3	8	10	2,5	2,5
<b>Esp calc.</b>	<b>in</b>	0,136	0,136	0,142	0,134	0,135	0,136	0,164	0,144	0,136	0,135
<b>Esp real</b>	<b>in</b>	0,3	0,3	1,125	0,38	0,3	0,21	0,32	0,365	0,2	0,2

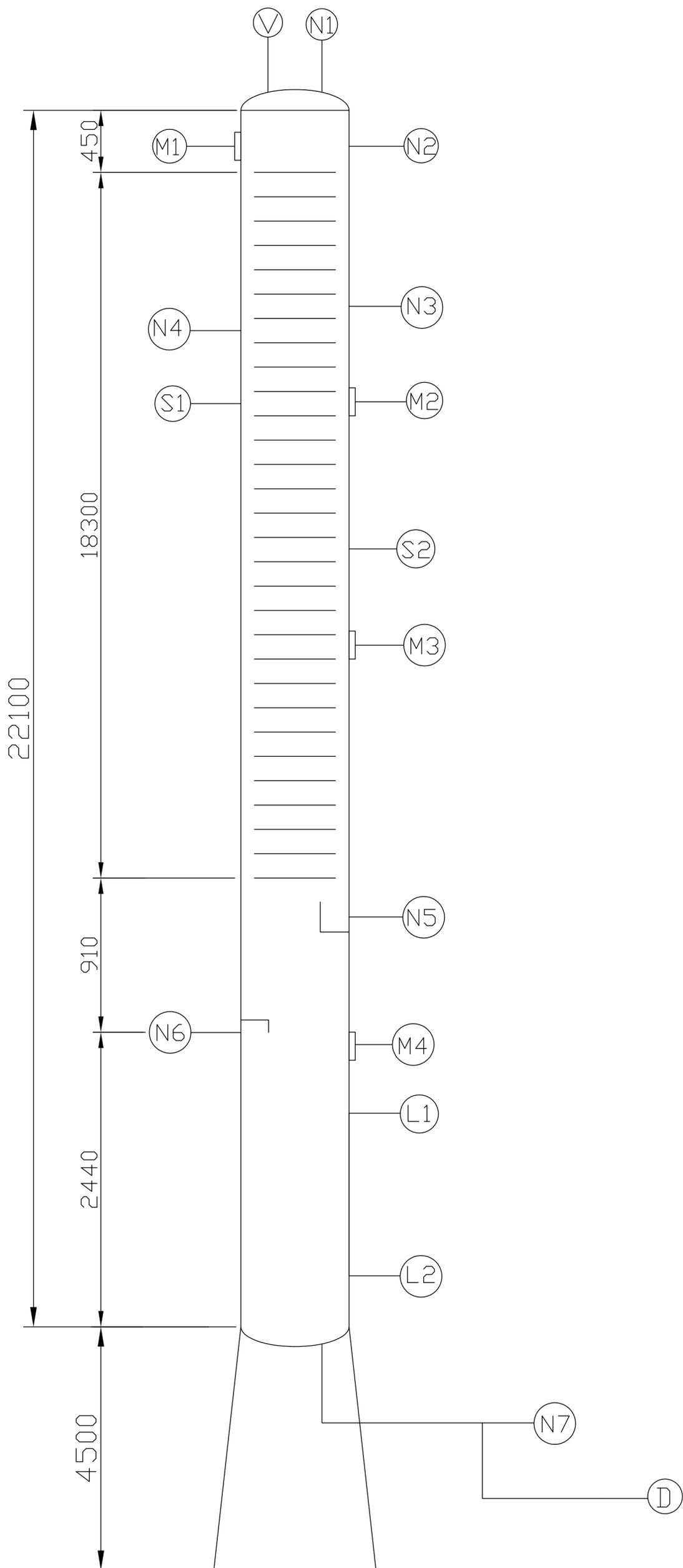


# LEYENDA

WSC1	Stripper aguas ácidas
WSC2	Botellón de carga
WSE1	Precalentador de carga
WSE2	Reboiler
WSE3	Aéreo
B1 A/B	Bombas de carga
B2 A/B	Bombas de fondo
B3 A/B	Bombas de reflujó

Todas las cotas en mm.

Diseño de una unidad de aguas ácidas	Proyecto fin de carrera
Plano de implantación	Plano 1/5
21-9-2007	Manuel Macías Pérez



## LEYENDA

N1	Gás ácido
N2	Reflujo
N3	Extracción lateral
N4	Alimentación
N5	Agua hacia el reboiler
N6	Corriente desde reboiler
N7	Agua desorbida
V	Venteo
M1-4	Bocas de Hombre
S1-2	Inyección de sosa
L1-2	Toma de nivel
D	Drenaje

Todas las cotas en mm.

Diseño de una  
unidad de  
aguas ácidas

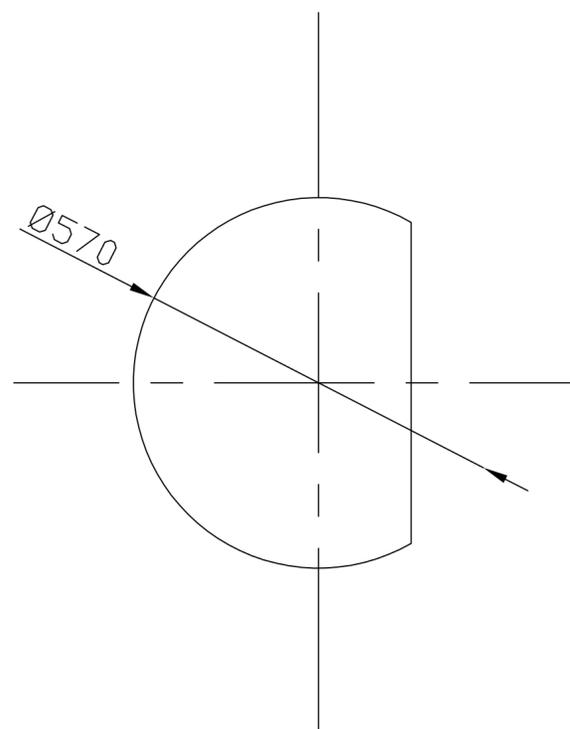
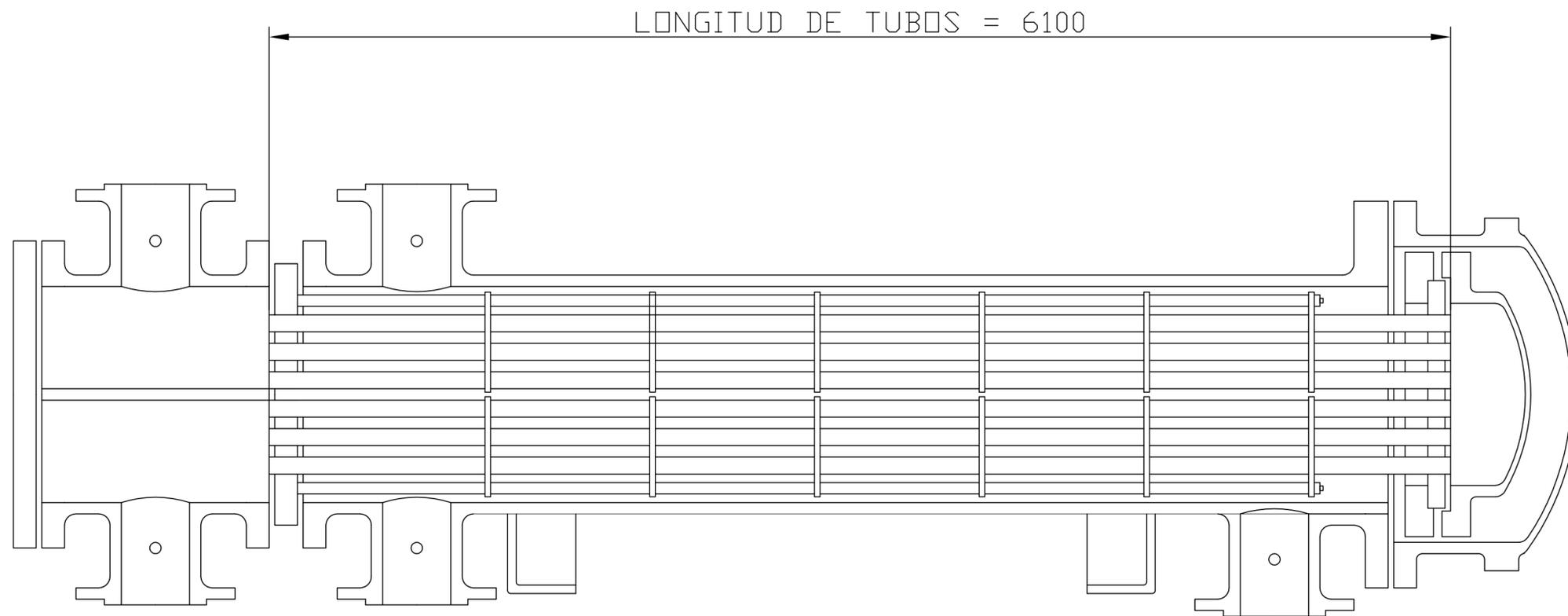
Proyecto fin  
de carrera

Stripper de  
aguas ácidas

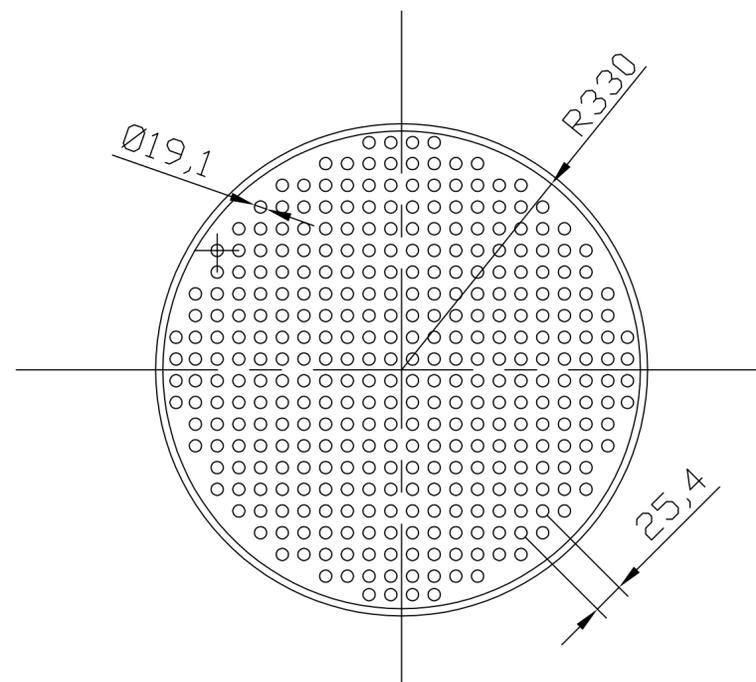
Plano 2/5

21-9-2007

Manuel  
Macías Pérez



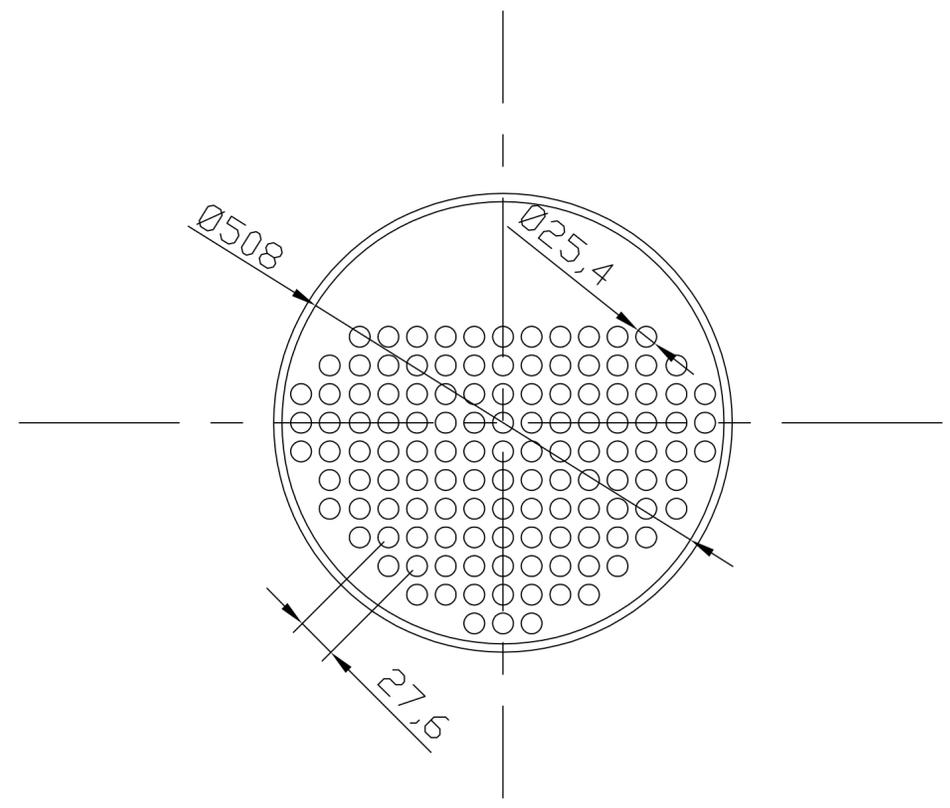
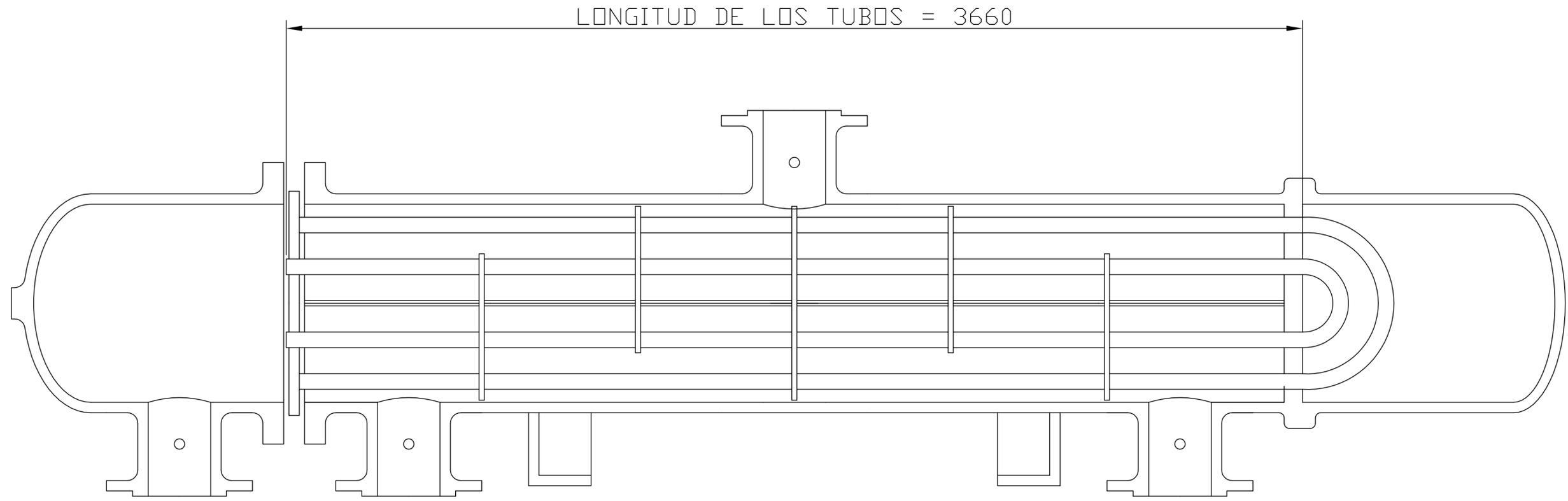
DEFLECTOR



HAZ TUBULAR

Todas las cotas en mm.

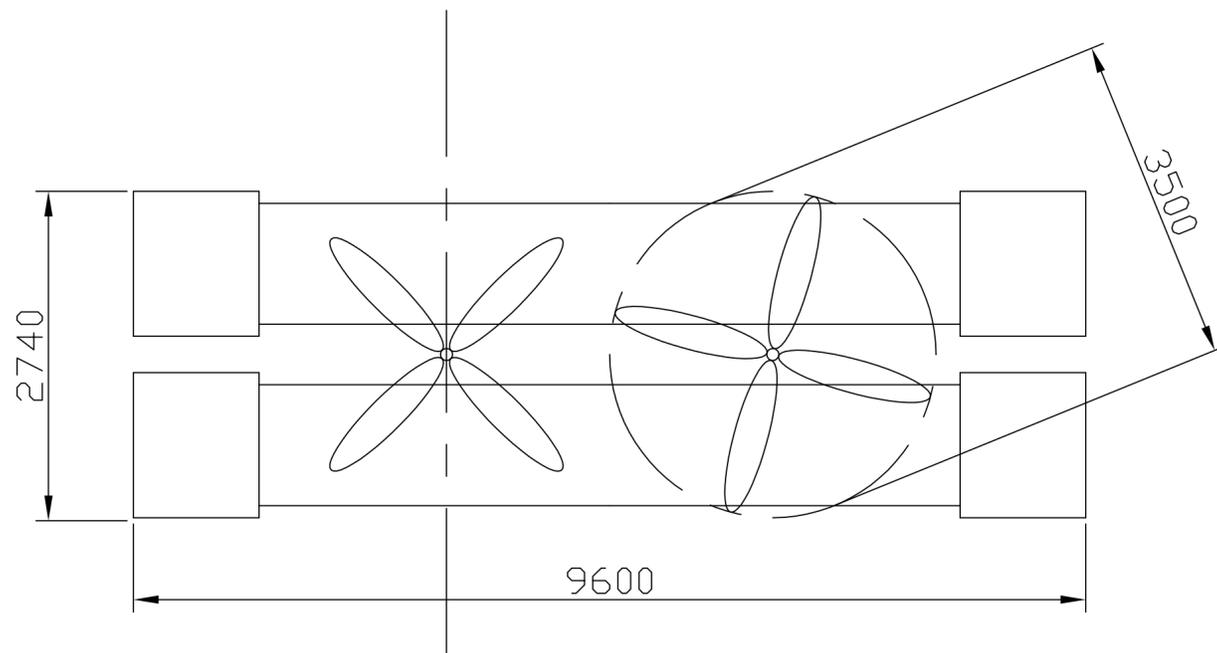
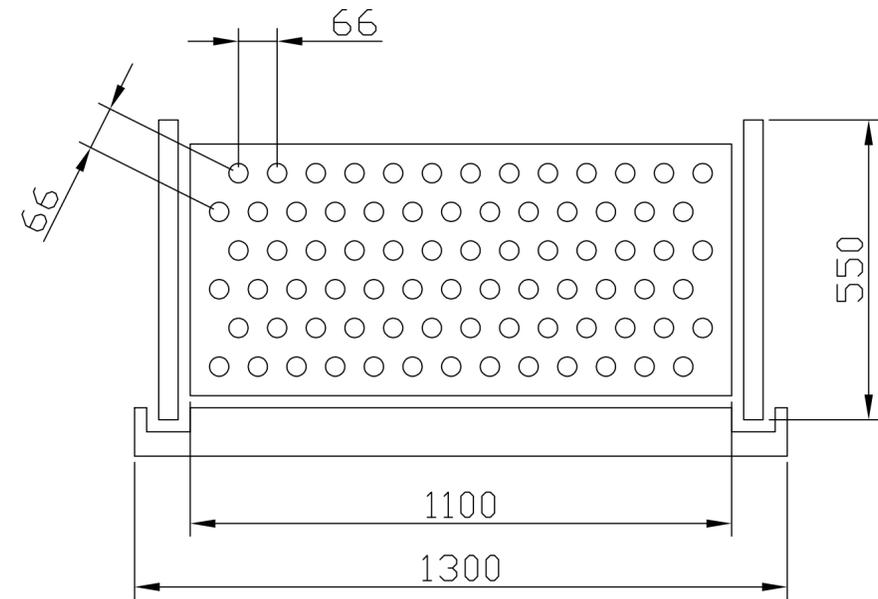
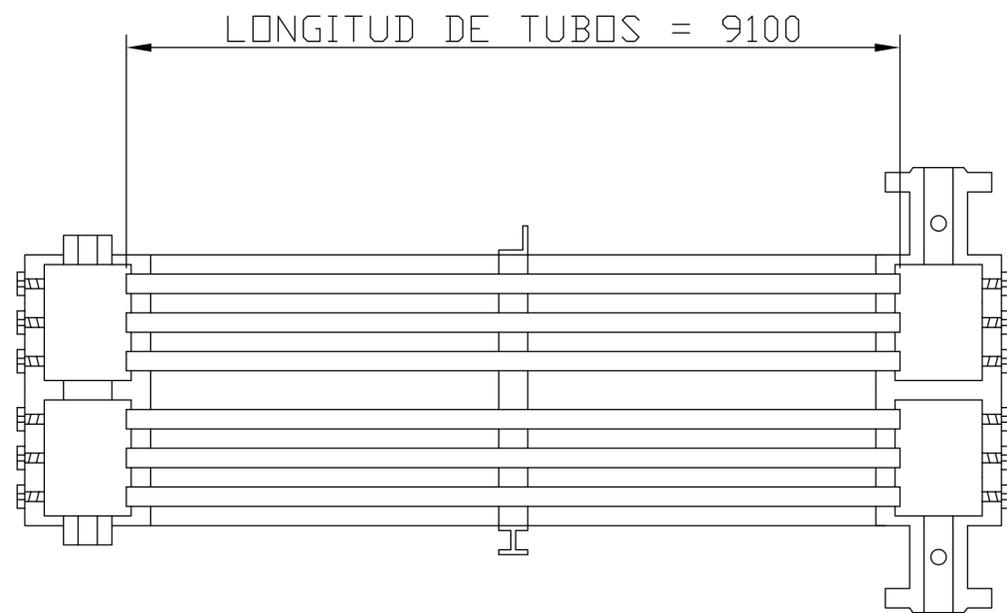
Diseño de una unidad de aguas ácidas	Proyecto fin de carrera
Precalentador de carga	Plano 3/5
21-9-2007	Manuel Macías Pérez



HAZ TUBULAR

Todas las cotas en mm.

Diseño de una unidad de aguas ácidas	Proyecto fin de carrera
Reboiler	Plano 4/5
21-9-2007	Manuel Macías Pérez



Todas las cotas en mm.

Diseño de una unidad de aguas ácidas	Proyecto fin de carrera
Aéreo	Plano 5/5
21-9-2007	Manuel Macías Pérez

## **0. ÍNDICE DEL PLIEGO DE CONDICIONES**

### ***0.ÍNDICE DEL DOCUMENTO***

#### ***1. OBJETIVO***

#### ***2. PLIEGO DE CONDICIONES GENERALES***

*2.1 Contradicciones, omisiones o errores*

*2.2 Trabajos preparatorios*

*2.2.1 Comprobación del replanteo*

*2.2.2 Fijación de los puntos de replanteo*

*2.2.3 Programación de los trabajos*

*2.3 Plazos de ejecución*

*2.4 Desarrollo y control de los trabajos*

*2.4.1 Equipos de maquinaria*

*2.4.2 Ensayos*

*2.4.3 Materiales*

*2.4.3.1 Manipulación de materiales*

*2.4.3.2 Inspección en planta*

*2.4.3.3 Inspección de los materiales*

*2.4.3.4 Materiales defectuosos*

*2.4.4 Acopios*

*2.4.5 Trabajos nocturnos*

*2.4.6 Accidentes de trabajo*

*2.4.7 Descanso en días festivos*

*2.4.8 Trabajos defectuosos o no autorizados*

*2.4.9 Señalización de las obras*

*2.4.10 Precauciones especiales*

*2.4.10.1 Lluvias*

*2.4.10.2 Incendios*

- 2.4.11 *Personal técnico*
- 2.5 *Medición de obras*
- 2.6 *Certificaciones*
  - 2.6.1 *Precio unitario*
  - 2.6.2 *Partidas alzadas*
  - 2.6.3 *Instalaciones y equipos de maquinaria*
- 2.7 *Legislación social*
- 2.8 *Gastos de cuenta del contratista*
- 2.9 *Ingeniero director de obras. Funciones*
- 2.10 *Recepciones, garantías y obligaciones del contratista*
  - 2.10.1 *Recepción provisional*
  - 2.10.2 *Plazo de garantía*
  - 2.10.3 *Recepción definitiva*
  - 2.10.4 *Prescripciones particulares*

### **3. CONDICIONES DE LOS MATERIALES Y EQUIPOS**

- 3.1 *Referencias y normativas*
- 3.2 *Condiciones para los materiales*
  - 3.2.1 *Condiciones generales para los materiales*
  - 3.2.2 *Condiciones para las tuberías de los intercambiadores y el aéreo*
  - 3.2.3 *Condiciones para las bridas*
  - 3.2.4 *Condiciones para los accesorios soldables*
  - 3.2.5 *Condiciones para las válvulas*
  - 3.2.6 *Condiciones para las juntas*
  - 3.2.7 *Condiciones de las placas para la fabricación de los equipos*
  - 3.2.8 *Condiciones para las soldaduras*
- 3.3 *Condiciones para los equipos*
  - 3.3.1 *Condiciones para el aerorefrigerante y los intercambiadores*
  - 3.3.2 *Condiciones para las bombas*
  - 3.3.3 *Condiciones para los equipos reutilizados*
- 3.4 *Condiciones sobre instalaciones auxiliares*
  - 3.4.1 *Condiciones sobre pintura y preparación de superficies*
  - 3.4.2 *Condiciones para los aislamientos*

*3.4.3 Condiciones para las purgas y los venteos*

*3.4.4 Condiciones para la instrumentación*

#### **4. SEGURIDAD E HIGIENE**

*4.1 Protección y lucha contra incendios*

#### **5. PLIEGO DE CONDICIONES PARTICULARES**

*5.1 Referencias y normativas*

*5.2 Definiciones generales*

*5.2.1 Aparato sometido a presión*

*5.2.2 Tuberías*

*5.2.3 Definición de Sistema*

*5.2.4 Diseño mecánico*

*5.2.5 Ingeniería*

*5.2.6 Fabricante*

*5.2.7 Reparador*

*5.2.8 Instalador*

*5.2.9 Usuario*

*5.2.10 Inspector propio*

*5.2.11 Inspecciones y pruebas previas*

*5.2.12 Inspecciones y pruebas periódicas*

*5.2.13 Control de calidad*

*5.3 Definiciones de ámbito técnico*

*5.3.1 Presión de Diseño*

*5.3.2 Presión máxima de servicio*

*5.3.3 Presión de precinto*

*5.3.4 Presión de servicio*

*5.3.5 Presión de prueba*

*5.3.6 Temperatura de diseño*

*5.3.7 Temperatura máxima de servicio*

*5.3.8 Temperatura de servicio*

*5.4 Condiciones generales para todos los aparatos*

*5.4.1 Manual de diseño*

*5.4.2 Certificados*

*5.4.3 Proceso de fabricación*

*5.4.4 Legalización de aparatos a presión*

*5.4.5 Instalación*

*5.4.6 Inspecciones y pruebas*

*5.4.6.1 Inspecciones y pruebas oficiales*

*5.4.6.2 Inspecciones y pruebas en el taller del fabricante*

*5.4.6.3 Inspecciones y pruebas en el lugar de emplazamiento*

*5.4.7 Placas*

*5.4.8 Elementos de seguridad*

*5.5 Pruebas para las tuberías*

*5.6 Prueba de los sistemas antes de la puesta en marcha*

*5.6.1 Prueba hidrostática*

*5.6.2 Lavado del equipo*

*5.6.3 Comprobación de servicios auxiliares*

*5.6.3.1 Equipo eléctrico*

*5.6.3.2 Agua de refrigeración*

*5.6.3.3 Aire de instrumentos*

*5.6.3.4 Red contra incendios*

*5.6.3.5 Sistema de drenaje*

*5.6.3.6 Seguridad*

## **6. MEDICIÓN Y ABONO DE LAS OBRAS**

*6.1 Mediciones y valoraciones*

*6.2 Condiciones económicas*

*6.3 Condiciones de índole legal*

## **7. EJECUCIÓN DE LAS OBRAS**

*7.1 Ejecución en general*

*7.2 Replanteo*

*7.3 Orden de los trabajos*

*7.4 Marcha de las obras*

*7.5 Obra civil*

*7.6 Instalaciones varias*

*7.7 Responsabilidad de la contrata*

*7.8 Dirección de los trabajos*

*7.9 Legalización*

## **1. OBJETIVO**

El objetivo 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 proyecto del que forma parte. 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 pliego de condiciones constituye el documento más importante desde el punto de vista contractual.

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.

## **2. PLIEGO DE CONDICIONES GENERALES**

### **2.1 Contradicciones, omisiones o errores**

En el caso de contradicción entre los planos y el pliego de prescripciones técnicas, prevalecerá lo indicado en este último. Lo mencionado en el pliego de prescripciones técnicas y omitido en los planos o viceversa, habrá de ser aceptado como si estuviese expuesto en ambos documentos, siempre que, a juicio del director de obras, quede suficientemente definida la unidad de obra correspondiente y esta tenga precio en el contrato.

En todo caso, las contradicciones, omisiones o errores que se adviertan en estos documentos por el director o contratista deberán reflejarse en el acta de comprobación.

## **2.2 Trabajos preparatorios**

Los trabajos preparatorios para el inicio de las obras consistirán en:

- Comprobación del replanteo.
- Fijación y conservación de los puntos del replanteo.
- Programación de los equipos.

### **2.2.1 Comprobación del replanteo**

En el plazo de 15 días a partir de la adjudicación definitiva se comprobarán, en presencia del adjudicatario o de su representante, el 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 a 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.

### **2.2.2 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 de 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.

### 2.2.3 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 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.

### **2.3 Plazos de ejecución**

El contratista empezará las obras al día siguiente de la fecha del acta de comprobación de replanteo, debiendo quedar terminadas en la fecha acordada en dicho acta.

### **2.4 Desarrollo y control de los trabajos**

Para el mejor desarrollo y control de los trabajos, el adjudicatario seguirá las normas que se indican en los apartados siguientes:

#### **2.4.1 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.

#### **2.4.2 Ensayos**

En número de ensayos y su frecuencia, tanto sobre materiales como unidades de obras terminadas, será fijado por el ingeniero director, y se efectuarán con arreglo a las normas afectantes 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 a la 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 de cumplir las especificaciones.

Así, el contratista está obligado a disponer de los equipos necesarios para dichas mediciones y ensayos.

#### 2.4.3 Materiales

Todos los materiales que se utilicen en las obras deberán cumplir las condiciones que se establecen en el pliego de condiciones, pudiendo ser rechazados en caso contrario por el ingeniero director. Por ello, todos los materiales que se propongan ser utilizados en obra deben ser examinados y ensayados antes de su aceptación en primera instancia mediante el autocontrol del contratista y, eventualmente, con el control de dirección de obra.

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.

#### 2.4.3.1 Manipulación de materiales

Todos los materiales se manipularán con cuidado, y de tal modo que se mantengan su calidad y aptitud para la obra.

#### 2.4.3.2 Inspección en 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.

#### 2.4.3.3 Inspección de los materiales

Con objeto de facilitar la inspección y prueba de los materiales, el contratista notificará al ingeniero con dos semanas como mínima de antelación a la entrega.

#### 2.4.3.4 Materiales defectuosos

Todos los materiales que no se ajusten a los requisitos del pliego de condiciones se considerarán 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.

#### 2.4.4 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 defina 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.
- 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 almacenarán 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 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.

#### 2.4.5 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.

#### 2.4.6 Accidentes de trabajo

De conformidad con lo establecido en el artículo 71 del Reglamento de la Ley de Accidentes de Trabajo, el contratista está obligado a contratar, para su personal, el seguro contra riesgo por accidentes de trabajo.

El contratista y la dirección de obra fijarán de antemano las condiciones de seguridad en las que se llevarán 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 adicionales 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 las condiciones adecuadas de seguridad, tales como cascos, caretas, botas reforzadas, gafas de protección, etc.

Así mismo, 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.

#### 2.4.7 Descanso en días festivos

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.

#### 2.4.8 Trabajos defectuosos o no autorizados

Los trabajos defectuosos no serán de abono, debiendo ser demolidos por el contratista y reconstruidos en el plazo de acuerdo con las prescripciones del proyecto.

Si alguna obra no se hallase ejecutada con arreglo a las condiciones del contrato y fuera, sin embargo, admisible a juicio del ingeniero director de obras, podrá ser recibida provisionalmente, y definitivamente en su caso, quedando el adjudicatario obligado a conformarse, sin derecho a reclamación, con la rebaja económica que el ingeniero director estime, salvo en el caso de que el adjudicatario opte por la demolición a su costa y las rehaga con arreglo a las condiciones del contrato.

#### 2.4.9 Señalización de las obras

El contratista queda obligado a señalar a su costa las obras objeto del contrato, con arreglo a las instrucciones y uso de aparatos que prescriba el director.

#### 2.4.10 Precauciones especiales

##### 2.4.10.1 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.

#### 2.4.10.2 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, adoptará las medidas necesarias para evitar que se enciendan fuegos innecesarios, y será responsable de evitar la propagación de los que se requieran 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 el 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 soplete, etc).

#### 2.4.11 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 las obras y al frente de las mismas, deberá haber un ingeniero superior.

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, integridad o marcha de los trabajos.

El contratista podrá recurrir, si entendiéndose que no hay motivo fundado para dicha prohibición.

## **2.5 Medición de obras**

La forma de realizar la medición, y las unidades de medida a utilizar, serán definidas en el pliego de prescripciones técnicas para cada unidad de obra.

Todas las mediciones básicas para el abono deberán de ser conformadas por el director y el representante del contratista.

Las unidades que hayan de quedar ocultas o enterradas deberán ser medidas antes de su ocultación. Si la medición no se efectuó a su debido tiempo, serán de cuenta del contratista las operaciones para llevarlas a cabo.

## **2.6 Certificaciones**

El importe de los trabajos efectuados se acreditará mensualmente al contratista por medio de certificaciones expedidas por el director en la forma legalmente establecida.

### **2.6.1 Precio unitario**

Los precios unitarios fijados en el contrato para cada unidad de obra cubrirán todos los gastos efectuados para la ejecución material de la unidad correspondiente,

incluidos los trabajos auxiliares, mano de obra, materiales y medio auxiliares de cada unidad de obra, siempre que expresamente no se indique lo contrario en este pliego de prescripciones técnicas.

#### 2.6.2 Partidas alzadas

Las partidas alzadas a justificar se abonarán consignando las unidades de obra que comprenden los precios del contrato, o los precios aprobados si se trata de nuevas unidades.

#### 2.6.3 Instalaciones y equipos de maquinaria

Los gastos correspondientes a instalaciones y equipos de maquinaria se considerarán incluidos en los precios de las unidades correspondientes, y en consecuencia, no serán abonados separadamente.

### **2.7 Legislación social**

El contratista estará obligado al cumplimiento de lo establecido en la Ley sobre el Contrato del Trabajo y Reglamentaciones de Trabajo Regulatoras de Subsidio y Seguros Sociales vigentes.

### **2.8 Gastos de cuenta del contratista**

Serán de cuenta del contratista, siempre que en el contrato no se prevea explícitamente lo contrario, los siguientes gastos:

- Los gastos de construcción y retirada de toda clase de construcciones auxiliares.
- Los gastos de alquiler o adquisición de terreno para depósito de maquinaria y materiales.

- Los gastos de protección de acopios y de la propia obra contra todo deterioro, daño o incendio, cumpliendo los requisitos vigentes para almacenamiento de explosivos y carburantes.
- Los gastos de limpieza y evacuación de desperdicios de basuras.
- Los gastos de suministro, colocación y conservación de señales de tráfico, balizamiento y demás recursos necesarios para proporcionar seguridad dentro de las obras.
- Los gastos de montaje, conservación y retirada de instalaciones para el suministro del agua y la energía eléctrica necesarias para las obras.
- Los gastos de demolición y desmontaje de las instalaciones provisionales.
- Los gastos de retirada de materiales rechazados y corrección de las deficiencias observadas y puestas de manifiesto por los correspondientes ensayos y pruebas.

## **2.9 Ingeniero director de obras. Funciones**

El ingeniero director de obras será responsable de la inspección y vigilancia de la ejecución del contrato, y asumirá la representación de la administración o de la entidad pertinente frente al contratista.

Las funciones del ingeniero director de obras son las siguientes:

- Garantizar la ejecución de las obras con estricta sujeción al proyecto aprobado, o modificaciones debidamente autorizadas.
- Definir aquellas condiciones técnicas que en el presente pliego de condiciones se dejen a su decisión.
- Resolver todas las cuestiones técnicas que surgen respecto a la interpretación de los planos, condiciones de los materiales y de ejecución de unidades de obra, siempre que no se modifiquen las condiciones del contrato.
- Estudiar las incidencias o problemas planteados en las obras que impidan el normal cumplimiento del contrato o aconsejen su modificación, tramitando, en su caso, las propuestas correspondientes.

- Proponer las actuaciones procedentes para obtener, de los organismos oficiales y de los particulares, los permisos y autorizaciones necesarias para la ejecución de las obras y ocupaciones de los bienes afectados por ellas, y resolver los problemas planteados por los servicios y servidumbres relacionados con las mismas.
- Asumir personalmente bajo su responsabilidad, en casos de urgencia o gravedad, la dirección inmediata de determinadas operaciones o trabajos en curso, para lo cual, el contratista deberá poner a su disposición el personal y el material de la obra.
- Acreditar al contratista las obras realizadas conforme a lo dispuesto en los documentos del contrato.
- Participar en las recepciones provisionales y definitivas y redactar la liquidación de las obras conforme a las normas legales establecidas.

El contratista estará obligado a prestar su colaboración al ingeniero director para el normal cumplimiento de las funciones a éste encomendadas.

### **2.10 Recepciones, garantías y obligaciones del contratista**

El adjudicatario deberá obtener a su costa todos los permisos y licencias para la ejecución de las obras. Del mismo modo serán de su cuenta los gastos derivados de los permisos y tasas.

La recepción, garantías y obligaciones del contratista serán las siguientes:

- Recepción provisional
- Plazo de garantía
- Recepción definitiva

### 2.10.1 Recepción provisional

Una vez terminados los trabajos, se precederá al examen global por parte del director, el cuál, si los considera aptos para ser recibidos, extenderá un acta donde así lo haga constar, procediéndose inmediatamente a la puesta en marcha y entrada en normal funcionamiento de las instalaciones.

En ningún caso la recepción provisional tendrá lugar antes de las siguientes operaciones:

- Inspección visual de todos los equipos y líneas, así como de los equipos auxiliares.
- Prueba hidrostática de las áreas que así lo requieran.
- Lavado del equipo tal y como se expone en el apartado “aparatos a presión” del presente pliego de condiciones.
- Comprobación de servicios auxiliares

Teniendo en cuenta lo anterior, la obra no podrá ponerse en funcionamiento por partes desde su inicio, a menos que, a juicio del ingeniero director, no se perjudique la integridad de la instalación y no se interfiera en la normal operación de otras unidades o procesos adyacentes.

Si el ingeniero director apreciase en las obras defectos de calidad u otras imperfecciones que, a su juicio, pudieran resultar perjudiciales o poco convenientes, el contratista deberá reparar o sustituir, a su costa, dichas partes o elementos no satisfactorios.

### 2.10.2 Plazo de garantía

Será de un año, contado a partir de la fecha de recepción provisional, salvo indicación contraria expresa en el pliego de contratación de la obra. Durante dicho

periodo, las posibles obras de reparación, conservación y sustitución serán por cuenta del contratista, siendo este responsable de las faltas que puedan existir.

En caso de existir defectos o imperfecciones, no servirá de disculpa ni le dará derecho alguno al contratista el que el director o subalterno hayan examinado durante la construcción, reconocido sus materiales o hecho su valoración en las relaciones parciales. En consecuencia, si se observan vicios o imperfecciones antes de efectuarse la recepción, se dispondrá que el contratista demuela y reconstruya, o bien repare, de su cuenta, las partes defectuosas.

### 2.10.3 Recepción definitiva

Transcurrido el plazo de garantía, y previo a los trámites reglamentarios, se procederá a efectuar la recepción definitiva de las obras una vez realizado el oportuno reconocimiento de las mismas y en el supuesto de que todas ellas se encuentren en las condiciones debidas.

En caso de que, al proceder al reconocimiento de las obras, estas no se encontrasen en estado de ser recibidas, se aplazará su recepción hasta que estén en condiciones de serlo.

Al proceder a la recepción definitiva de las obras, se extenderá por cuadruplicado el acta correspondiente.

### 2.10.4 Prescripciones particulares

En todos aquellos casos en que, a juicio del director de obras, se haga aconsejable para la ejecución de los trabajos previstos la fijación de determinadas condiciones específicas, se procederá a la redacción por este del oportuno pliego de prescripciones particulares, que ha de ser aceptado por el contratista, quedando obligado a su cumplimiento.

### **3. CONDICIONES 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 proyecto, así como de los materiales que los constituyen.

#### **3.1 Referencias y normativas**

Se tendrán como de obligado cumplimiento las siguientes normas y standards:

1. 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 las juntas.
2. Standards of the Tubular Exchangers Manufacturers Association (TEMA). 6º Edición, 1986.
3. Norma API 610 para bombas de proceso en servicios de refino y petroquímica.
4. Norma ASME B.31.3 para diseño de sistemas de tuberías para el transporte de petróleo.
5. Norma ANSI B.36.10 para dimensiones de tuberías de acero al carbono y aleado soldadas y sin soldadura.
6. Norma ANSI B.16.5 para clasificación presión – temperatura, bridas, espárragos para bridas, válvulas bridadas y accesorios bridados de acero.
7. Norma ANSI B.18.2 para espárragos y tuercas.
8. Norma ANSI B.16.9 para accesorios de acero para soldar a tope.
9. Norma ANSI B.16.11 para accesorios de acero para soldar a enchufe y roscados.
10. Norma ANSI B.16.10 para la definición de dimensiones de válvulas bridadas.
11. Norma ANSI B.16.34 para válvulas para soldar a tope.
12. Norma API 600 para válvulas de compuerta.
13. Norma API 602 para válvulas de compuerta de pequeña dimensión.

14. Norma API 598 para inspección y prueba de válvulas.
15. Norma API RP 520 para el dimensionamiento de válvulas de seguridad para recipientes a presión.
16. Norma ASTM A-106 gr. B para tuberías de acero al carbono sin soldaduras.
17. Norma ASTM A-234 WPB para accesorios de acero al carbono obtenidos de tubos para soldar a tope.
18. Norma ASTM A-216 WCB para válvulas y accesorios bridados de acero al carbono fundido.
19. Norma ASTM A-105 para bridas, válvulas y accesorios de acero al carbono forjado roscados y para soldar a enchufe.
20. Norma ASTM A-193 B7 para espárragos.
21. Norma ASTM A-194 gr. 2H para tuercas.
22. Norma ASME SA-285 gr. C para cuerpos cilíndricos y fondos de recipientes.
23. Norma ASME SA-179 para tubos de intercambiadores de calor.
24. Norma ASME SA-212 gr. B para placas tubulares de intercambiadores de calor.

### **3.2 Condiciones para los materiales**

#### **3.2.1 Condiciones generales para los materiales**

Todos los materiales tendrán las condiciones técnicas que dictan las normas citadas en el subapartado “referencias y normativas” del presente documento del pliego de condiciones.

Las características de los mismos serán las expresadas en los subapartados 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.

### 3.2.2 Condiciones para las tuberías de los intercambiadores y el aéreo

Las tuberías serán de los diámetros especificados en el apartado correspondiente de la memoria de cálculo. Serán de sección circular, de espesor uniforme y sin costura. Se montarán a partir de cañas de 6 metros de longitud, 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, así como la línea de suministro de vapor, serán de acero al carbono ASTM – 106 gr. B.

Los tubos de intercambiador correspondientes al aerorefrigerantes serán de acero inoxidable y los de los intercambiadores serán de acero al carbono ASME SA-179, de 20 ft de longitud recta.

### 3.2.3 Condiciones para las bridas

Las bridas serán de acero al carbono forjado ASTM A-105, del tipo de cuello soldado (welding neck), con cara elevada y de 150 libras de presión primaria en servicio (bridas 150# - R.F – W.N.).

Los espárragos de unión estarán en consonancia con lo marcado por la norma ANSI B.16.5. Sus diámetros serán los correspondientes a la línea en la que vayan a ser instaladas.

El estriado de las bridas será de estrías concéntricas. No se aceptarán bridas con estrías en espiral (gramófono).

Estarán libres de defectos, irregularidades, rebabas, etc. que puedan dificultarse 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. Estos habrán de apretarse en cruz con llave dinamométrica para controlar el par de apriete.

#### 3.2.4 Condiciones para los accesorios soldables

Los accesorios soldables para las tuberías (codos, tes, reducciones, etc) serán de acero ASTM A-234 WPB para soldar a tope o ASTM A-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.

#### 3.2.5 Condiciones para las válvulas

Las válvulas serán del tipo que la dirección de la obra estime el más adecuado de cara a la línea y servicio en que vayan a ser instaladas.

Estarán libres de defectos, irregularidades, etc, que puedan dificultar su instalación o montaje, o que puedan afectar negativamente a su comportamiento durante el proceso.

Durante su instalación se tendrá especial cuidado de alinear correctamente los extremos con la tubería en la que vayan a ser instaladas.

El apriete de los espárragos se hará con llave dinamométrica previa introducción de las correspondientes juntas.

### 3.2.6 Condiciones para las juntas

Las juntas serán espirometálicas o de amianto encamisadas. Estarán libres de defectos, irregularidades, etc. que puedan dificultar su instalación o montaje, o que puedan afectar negativamente a su comportamiento durante el proceso.

### 3.2.7 Condiciones de las placas para la fabricación de los equipos

Las placas a partir de las cuales se fabriquen los nuevos equipos previstos estarán fabricadas en los siguientes materiales:

- Aerorefrigerante: SA-285 gr.
- Precalentador de carga: SA-285 gr.
- Reboiler: SA-285 gr.

Estarán libres de fisuras, grietas, poros, etc. que puedan disminuir sus resistencias o afectar a su comportamiento durante su funcionamiento dentro del proceso.

### 3.2.8 Condiciones para las soldaduras

En las partes de la instalación en que deban llevarse a cabo procesos de soldadura a tope, se instalarán durante el proceso de soldado, anillos de protección y se evitará en todo momento que penetren en el interior de las partes a soldar, cascarillas y salpicaduras de soldadura.

La soldadura se hará mediante cordones finos, limpiando e inspeccionando después de cada cordón, evitando así que los defectos de un cordón puedan ser enmascarados por el siguiente.

### **3.3 Condiciones para los equipos**

#### **3.3.1 Condiciones para el aerorefrigerante y los intercambiadores**

Las dimensiones del aéreo, del reboiler y del precalentador de carga, así como sus características geométricas (tipo según TEMA, número de tubos, longitud, diámetro y espaciado de los mismos, número de pasos, etc) serán los determinados en la memoria de cálculo.

Tanto si son trasladados al lugar de emplazamiento, montados, 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, serán almacenados bajo techado en un 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 estos 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 harán las comprobaciones y operaciones que aparecen en el apartado “equipos a presión” del presente pliego de condiciones.

### 3.3.2 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 diseñadas 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 será instalada 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 descriptivas de las bombas a emplear, acompañados de los correspondientes certificados de pruebas de sobrecarga, rodaje, etc, efectuadas en el taller de fabricante.

### 3.3.3 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.

## **3.4 Condiciones sobre instalaciones auxiliares**

### 3.4.1 Condiciones sobre pintura y preparación de superficies

Todas las superficies exteriores de equipos y tuberías recibirán, antes del pintado, el tratamiento de preparación siguiente:

1. 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.
2. Eliminación de depósitos de óxidos muy voluminosos mediante limpieza manual o mecánica. Esto puede hacerse mediante lijado o cepillado en dos direcciones.
3. Redondeado de aristas vivas y alisado mediante lijado de cordones y salpicaduras de soldadura.
4. Protección de zonas y anexos que no vayan a ser recubiertos.
5. Chorreado con abrasivo (granalla o arena silíceo).
6. Limpieza con aspirador o aire a presión de residuos abrasivos, polvo, y demás partículas extrañas y contaminantes.

Posteriormente, las superficies recibirán cuatro manos de pintura anticorrosión (pasivamente aniónica), como minino de plomo o cromato de zinc de aceite. Se controlará que, tras la capa definitiva, el espesor de la capa protectora de pintura sea de 150 micras como mínima.

#### 3.4.2 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 roca. Las mantas a utilizar no habrán tenido usos anteriores. Así mismo, 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 a calorifugar habrán recibido su correspondiente pintado, tal y como se describe en el subapartado “condiciones sobre pintura y preparación de superficies” del presente pliego de condiciones. Igualmente, si se encontrasen húmedas por el rocío o la lluvia, se dejarán secar antes de instalar el aislamiento. Si el pintado presenta desperfectos o suciedad adherida, se eliminarán estos antes de instalar el aislamiento. La pintura estará perfectamente seca. Con objeto de que el material aislante

no se empape de agua o humedad, no se efectuará el montaje del calorifugado si las condiciones ambientales atmosféricas son de lluvia o excesiva humedad, debiendo posponerse éste hasta que las condiciones lo permitan.

El calorifugado se sujetará a los equipos y líneas mediante pletinas, alambres o tornillos de metal, o mediante otro sistema que el instalador crea adecuado, y que el ingeniero director estime eficaz. Todo el conjunto se recubrirá de chapa de aluminio de 1 a 1,5 mm. de espesor, de primer uso, sujeta con remaches o tornillos autorroscantes. Las chapas dispondrán de solape suficiente. Igualmente, tras la instalación no deberán quedar esquinas levantadas o salientes que puedan causar heridas a los operarios de la planta al moverse entre los equipos.

#### 3.4.3 Condiciones para las purgas y los venteos

Las purgas y los venteos de las líneas y equipos principales serán de ¾" como mínimo, y dispondrán de válvulas de compuerta soldadas como elementos de cierre.

#### 3.4.4 Condiciones para la instrumentación

La válvula de control será la adecuada para las condiciones de proyecto, y se procurará que quede instalada siguiendo las recomendaciones de la norma API RP 550.

Los termómetros y manómetros a instalar serán de los tipos fabricados por Bourdon, Wika o similar. Se procurará que los márgenes de medición de temperatura en los que vaya a trabajar el aparato en condiciones normales queden en el tercio central de la escala.

#### **4. SEGURIDAD E HIGIENE**

El presente aparatado del pliego de condiciones tiene por objeto establecer, de forma muy general, las medidas que se deben seguir, desde el punto de vista de la seguridad y la higiene, una vez que la instalación se haya puesto en funcionamiento.

##### **4.1 Protección y lucha contra incendios**

Deberán seguirse las pautas impuestas por la refinería en la que serían instalados los equipos objeto del presente proyecto. Como medidas muy generales para la protección contra incendios cabe destacar las siguientes:

Los equipos de lucha contra incendio, tales como extintores, vapor de ahogo y líneas de agua deberán estar instalados y dispuestos para su inmediato acceso.

Los derrames de hidrocarburos serán lavados hacia el alcantarillado de agua aceitosa inmediatamente.

Los trabajos de soldadura en la zona requieren la toma de medidas extremas de precaución. En algunos casos, se deberá parar la unidad, vaciar los recipientes y vaporizar el equipo correspondiente. De ningún modo podrá un hombre entrar en un recipiente sin antes haber sido este aislado con bridas ciegas, vaporizado, aireado, comprobado su contenido en compuestos aromáticos y expedida la autorización para entrada por seguridad.

## **5. PLIEGO DE CONDICIONES PARTICULARES**

En general, se establecerán las bases 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.

### **5.1 Referencias y normativas**

Se tendrán como referencia y de obligado cumplimiento las siguientes disposiciones y normas:

- Reglamento de Aparatos a Presión del Ministerio de Industria y Energía (R/D 1244/1976 del 4 de abril, B.O.E. n° 128 del 29 de mayo) para todos los aparatos a presión en el ámbito de refinerías de petróleos y plantas petroquímicas.
- Instrucción Técnica Complementaria (ITC MIE AP6) sobre refinerías de petróleos y plantas petroquímicas (O. 30-8-1982, B.O.E. del 10 de septiembre de 1982), (O. 11-7-1983, B.O.E. del 22 de julio de 1983). Los aparatos incluidos en el campo de aplicación de esta ITC, instalados en refinerías de petróleos cumplirán, además, las especificaciones que se indican en el Real Decreto 3143/1975 del 31 de Octubre, referentes al Reglamento de Seguridad de refinerías de petróleos y parques de almacenamiento de productos petrolíferos.

### **5.2 Definiciones generales**

Con el fin de que la interpretación del presente pliego de condiciones sea clara e inequívoca, se proporcionan, de acuerdo con el Reglamento de Aparatos a presión del Ministerio de Industria y Energía, las siguientes definiciones:

### 5.2.1 Aparato sometido a presión

Aparato cuya presión máxima de servicio es superior a la atmosférica. Por lo que se refiere al presente proyecto esta definición se aplica a:

- Stripper de aguas ácidas
- Precalentador de carga
- Reboiler
- Aerorefrigerante
- Bombas B1, B2 y B3.

### 5.2.2 Tuberías

Líneas de conducción de fluidos a presión o a vacío, no sometidas a fuego directo. Por lo que se refiere al presente proyecto esta definición afecta a:

- Línea de vapor de la columna al aerorefrigerante.
- Línea del aerorefrigerante a la aspiración de las bombas de reflujo.
- Línea de impulsión de las bombas de reflujo.
- Línea de fondos de la columna.
- Línea de fondo desde precalentador de carga hasta aspiración de bombas de fondos.
- Línea de impulsión de las bombas de fondo.
- Línea de vapor de salida de la columna.
- Línea de alimentación a las bombas de carga.
- Línea de impulsión de las bombas de carga.
- Línea de alimentación al reboiler.
- Línea de retorno de vapor desde el reboiler.

### 5.2.3 Definición de Sistema

Conjunto de aparatos a presión, normalmente conectados en secuencia de proceso y susceptibles de ser probados a presión conjuntamente.

### 5.2.4 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, característica de los materiales utilizados, proceso de fabricación y control de calidad.

### 5.2.5 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.

### 5.2.6 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.

#### 5.2.7 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.

#### 5.2.8 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.

#### 5.2.9 Usuario

Persona física o jurídica propietaria o explotadora de la refinería de petróleo o planta petroquímica donde se instalan los aparatos a presión.

#### 5.2.10 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.

#### 5.2.11 Inspecciones y pruebas previas

Toda inspección anterior a la puesta en servicio o durante la misma de un aparato o sistema.

#### 5.2.12 Inspecciones y pruebas periódicas

Toda inspección y prueba posterior a la puesta en servicio de un aparato o sistema.

#### 5.2.13 Control de calidad

Se entiende como tal el de la ingeniería, fabricante o instalador, cuando una inspección o prueba previa se realiza bajo su competencia y responsabilidad.

### **5.3 Definiciones de ámbito técnico**

#### 5.3.1 Presión de Diseño

Se entiende como el valor de la presión que se toma para el cálculo del espesor del aparato, a la temperatura de diseño. La presión de diseño no podrá ser menor que la presión máxima de servicio.

#### 5.3.2 Presión máxima de servicio

Se entiende como la presión más alta que se puede dar en el aparato o sistema, en condiciones extremas de funcionamiento del proceso.

### 5.3.3 Presión de precinto

Se entiende como la presión a la que están tarados los elementos de seguridad que protegen el aparato o el sistema.

### 5.3.4 Presión de servicio

Se entiende como la presión normal de trabajo del aparato o sistema a la temperatura de servicio.

### 5.3.5 Presión de prueba

Se entiende como aquella presión a la que se somete el aparato o sistema para comprobar su resistencia a 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.

### 5.3.6 Temperatura de diseño

Es el valor de la temperatura que se toma para el cálculo del espesor del aparato.

### 5.3.7 Temperatura máxima de servicio

Es el máximo valor de la temperatura que se estima puede producirse en el interior del aparato o sistema, en condiciones extremas de funcionamiento.

### 5.3.8 Temperatura de servicio

Es el valor de la temperatura alcanzada en el interior del aparato o sistema en condiciones normales de funcionamiento a la presión de servicio.

#### **5.4 Condiciones generales para todos los aparatos**

Todas las prescripciones expresadas a continuación se aplicarán a los equipos de nueva instalación relacionados en el subapartado “aparato sometido a presión” del presente apartado del pliego de condiciones, y, entre ellas, las correspondientes a inspecciones y pruebas, al resto de los equipos disponibles.

##### 5.4.1 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:

- a) Identificación de la ingeniería
- b) Datos básicos del proceso necesarios para el diseño.
- c) 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.
- d) 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.
- e) Especificación de prueba a 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 que se destina.

##### 5.4.2 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 calificados bajo norma de reconocida solvencia técnica.

#### 5.4.3 Proceso de fabricación

Para el proceso de fabricación deberán utilizarse unas normas de construcción, control y pruebas acordes con el código de diseño.

#### 5.4.4 Legalización de aparatos a presión

- a) Número de inscripción en el libro de Registro de Fabricantes de la respectiva Delegación Provincial del Ministerio de Industria y Energía de la provincia donde se fabrique el aparato.
- b) Nombre, razón social y domicilio de la ingeniería
- c) 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.
- d) 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.
- e) Procedimientos de conformado, soldadura, tratamientos térmicos y controles, calificación de procedimientos de soldaduras y soldadores, todo lo aprobado por el control de calidad del fabricante, que puede ser propio o contratado a una ingeniería o entidad colaboradora.
- f) 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.

- g) 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 5 años como mínimo, a partir de la fecha de fabricación del aparato.
- h) Certificado de ensayos y pruebas realizados 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.
- i) Acta de la prueba a presión realizada por el fabricante y aprobada por el control de calidad del fabricante.
- j) 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 puntos g), h) e i) 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.

#### 5.4.5 Instalación

Por cada instalación, el instalador deberá elaborar un expediente de instalación acorde con los manuales de diseño y construcción, del cuál entregará copia al usuario. Este expediente comprenderá:

- a) 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.
- b) Nombre, razón social y domicilio tanto del fabricante como del instalador.
- c) Relación de aparatos a instalar.
- d) 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.

#### 5.4.6 Inspecciones y pruebas

##### 5.4.6.1 Inspecciones y pruebas oficiales

Todos los aparatos a presión especificados en el subapartado “aparato sometido a presión” deberán ser sometidos a las inspecciones y pruebas previas a la puesta en servicio ya citadas.

##### 5.4.6.2 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 con 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.

#### 5.4.6.3 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 confluyan 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 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:

$$P_p \geq 1,25 \cdot P_d \cdot \frac{S_p}{S_d}$$

Donde:

$P_p$  : Presión de prueba

$P_d$  : Presión de diseño

$S_p$  : Tensión máxima admisible del material a la temperatura de prueba

$S_d$  : Tensión máxima admisible del material 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.

#### 5.4.7 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.

#### 5.4.8 Elementos de seguridad

Todos los aparatos y sistemas comprendidos en el presente proyecto deben ir provistos de los elementos de seguridad que prescriban los códigos de diseño 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 y ajustarán para, a continuación probarlas y precintarlas.

### **5.5 Pruebas 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.

### **5.6 Prueba de los sistemas antes de la puesta en marcha**

#### **5.6.1 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.

### 5.6.2 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 destrozar 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 en los 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 el agua del sistema.

Por último, se instalarán las válvulas automáticas y las placas de orificio, verificándose su posición.

### 5.6.3 Comprobación de servicios auxiliares

#### 5.6.3.1 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.

#### 5.6.3.2 Agua de refrigeración

El sistema debe de ser comprobado antes de la puesta en marcha, atendiendo a la disponibilidad, presión y libre circulación.

#### 5.6.3.3 Aire de instrumentos

Los colectores deben de ser soplados para la eliminación de la posible suciedad. Toda red debe de ser comprobada bajo presión.

#### 5.6.3.4 Red contra incendios

Se comprobará la llegada de agua a los hidrantes, así como el libre y rápido acceso a los mismos.

#### 5.6.3.5 Sistema de drenaje

Se comprobará que todos los drenajes y arquetas desalojan adecuadamente.

#### 5.6.3.6 Seguridad

Se comprobará que todas las válvulas de seguridad estén instaladas sin discos ciegos ni cerrojos.

## **6. MEDICIÓN Y ABONO DE LAS OBRAS**

### **6.1 Mediciones y valoraciones**

Las mediciones de las obras concluidas se harán por el tipo de unidad fijada en el presupuesto. La valoración deberá obtenerse igualmente, aplicando a las unidades de obra el precio que tuviesen asignado en el presupuesto.

La valoración de las partidas no expresadas se verificará aplicando a cada una de ellas la medida más apropiada, en la forma y condiciones que estime el director de obra, multiplicando el resultado final de la medición por el precio correspondiente.

### **6.2 Condiciones económicas**

Las condiciones especiales que regirán esta obra para la liquidación y abono de la misma serán establecidas por la entidad contratante.

### **6.3 Condiciones de índole legal**

Regirán las condiciones contenidas en el anuncio de subasta y contrata de ejecución, las cuales se ajustarán a las establecidas por las Leyes Generales del Estado.

## **7. EJECUCIÓN DE LAS OBRAS**

### **7.1 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 la 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.

### **7.2 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.

### **7.3 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 cuanto se disponga sobre el particular.

### **7.4 Marcha de las obras**

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.

**7.5 Obra civil**

Se realizará con arreglo a las especificaciones de los restantes documentos del proyecto y a las ordenes que expresamente deberá solicitar el contratista al director de la obra.

**7.6 Instalaciones varias**

En todas las instalaciones, y como norma general, se seguirá exactamente todo lo indicado en la memoria y demás documentos del proyecto. En caso de duda, será competencia del director del proyecto decidir la solución a adoptar. Las instalaciones serán efectuadas conforme a los reglamentos vigentes que les afectan.

**7.7 Responsabilidad de la contrata**

La contrata será la única responsable de la ejecución de las obras, no teniendo derecho a indemnizaciones de ninguna clase por errores que pudiera cometer, y que serán de su cuenta y riesgo.

Aún después de la reopción provisional, la contrata está obligada a rectificar todas las deficiencias que sean advertidas por la dirección de obra. La demolición o reparación precisa será exclusivamente por cuenta de la contrata.

Así mismo, la contrata se responsabilizará ante los tribunales de los accidentes que puedan ocurrir durante la ejecución de las obras. Igualmente, estará obligada al cumplimiento de todos los preceptos legales establecidos o que se establezcan por disposiciones oficiales.

**7.8 Dirección de los trabajos**

El técnico encargado de las obras constituye la dirección técnica y, como tal, ejecutará todos los trabajos del desarrollo del proyecto, así como la dirección e inspección de los trabajos. Por lo tanto, la dirección técnica asumirá toda la responsabilidad en lo concerniente a planos e instrucciones técnicas.

**7.9 Legalización**

Para la recepción de las obras la contrata está obligada a la legalización de las obras e instalaciones ante los organismos oficiales competentes. Los gastos que estos ocasionen correrán por cuenta de la contrata.

## **0. ÍNDICE DEL PRESUPUESTO**

### ***0. ÍNDICE DEL PRESUPUESTO***

### ***1. ALCANCE DEL PRESUPUESTO***

### ***2. METODO DE CÁLCULO DEL PRESUPUESTO***

### ***3. EQUIPOS PRINCIPALES***

### ***4. COSTE DE LOS EQUIPOS PRINCIPALES***

#### *4.1 Coste del stripper*

##### *4.1.1 Coste de la columna*

##### *4.1.2 Coste de los platos*

#### *4.2 Coste de los Intercambiadores de calor*

##### *4.2.1 Coste del Precalentador de carga*

##### *4.2.2 Coste del Reboiler*

#### *4.3 Coste del Aerorefrigerante*

#### *4.4 Coste de las Bombas*

### ***5. CÁLCULO DEL COSTE DE ADQUISICIÓN DEL EQUIPO***

### ***6. COSTE DEL CAPITAL FIJO***

### ***7. CUADRO DE PRECIOS FINAL***

#### *7.1 Precio de ejecución por contrata*

#### *7.2 Impuesto sobre el valor añadido*

#### *7.3 Presupuesto total*

## **1. ALCANCE DEL PRESUPUESTO**

Una vez realizado el alcance técnico de la ingeniería básica se presenta el cálculo del presupuesto del proyecto. Se pretende disponer de una aproximación al coste real de la instalación una vez construida e instalada.

El presupuesto se agrupa en una serie de partidas que constituyen el coste real. Dichas partidas se han agrupado por equipos para un mejor seguimiento de los mismos. Para obtener la cantidad que debe ir en cada partida se parte del coste base de los equipos principales de la instalación. Este coste se calcula en base a gráficas aportadas por CEPSA.

## **2. METODO DE CÁLCULO DEL PRESUPUESTO**

El método utilizado para el cálculo del presupuesto esta particularizado en instalaciones de refinerías de petróleo. El presupuesto del proyecto se obtendrá del siguiente modo:

1. En primer lugar se calculará el coste de adquisición o construcción de los equipos de la planta y se estimará el total (PCE).
2. En segundo lugar se calculará el coste de capital fijo asociado a plantas de procesos de fluidos. Este capital estará dividido en una serie de partidas, cada una de las cuales influirá en distinta medida al coste de la instalación. En el método seleccionado, estos porcentajes, se aplican al coste total de adquisición de los equipos de la planta y no a cada uno de los equipos por separado para luego sumarlo y dar con el total. Al final, tendremos el coste de la planta (PPC).

Los porcentajes de cada partida se han obtenido de la bibliografía recomendada y de datos proporcionados por CEPSA. Se presentan en el Anexo P.1 del presupuesto.

Las partidas en las que se divide el costo asociados a la planta son:

- Montaje mecánico de los equipos: Incluye el montaje de los equipos, fabricados en el taller, en su emplazamiento así como de todo el material de tuberías y accesorios por contratas.
- Tubería o piping: Incluye todo el material de tuberías, válvulas y accesorios para el montaje de la unidad.
- Instrumentación: Incluye material y montaje de todos los instrumentos de medida y control de la planta, incluyendo la parte proporcional del panel central de control.
- Electricidad: Todo el material eléctrico para mandos de motores, celdas, cables, etc. con la mano de obra de su montaje. No incluye motores ni los edificios si los hubiera.
- Obra civil: Incluye hormigón, acero, encofrados, y mano de obra necesaria para cimentaciones y estructuras, tanto de hormigón como de acero, realizado por subcontrato de la obra, necesarias para el equipo. No incluye almacenes ni edificios complementarios.
- Utilities: Incluye el calorifugado y la pintura, tanto material como mano de obra por contratas.
- Almacenamiento: en el caso de que sea necesario.

Otros valores a considerar para el cálculo del capital fijo son:

- Diseño e ingeniería
- Contingencias

### **3. EQUIPOS PRINCIPALES**

Los equipos principales del proceso, en los que se basa el cálculo del importe total del que se calculará en función de las partidas que constituyen el presupuesto, el coste de capital fijo:

- Stripper de aguas ácidas
- Platos de la columna
- Precalentador de carga
- Reboiler
- Aerorefrigerante

### **4. COSTE DE LOS EQUIPOS PRINCIPALES**

#### **4.1 Coste del stripper**

Para estudiar el coste de la columna de stripping, el cálculo se ha dividido en dos partes. En primer lugar el coste de la columna o torre, y en segundo lugar, el costo de los platos del mismo.

##### **4.1.1 Coste de la columna**

Las características de la torre de stripping son las siguientes:

- Material: Acero al carbono
- Tensión máxima admisible de trabajo para la temperatura de diseño: 790 Kg/cm<sup>2</sup>.
- Presión de diseño: 3,50 Kg/cm<sup>2</sup>.
- Espesor: 12,7 mm.

- Diámetro: 1000 mm.
- Altura: 22100 mm.

Se emplea la gráfica del Anexo P.2 perteneciente a recipientes verticales a presión para obtener el precio base aproximado. La gráfica predice el precio del recipiente vertical incluido el casco y el fondo de la columna. Se empleará como parámetro de elección, la altura de la torre y el diámetro.

Al coste base hay que aplicarle una serie de factores de corrección para obtener el coste final de la estructura. Estos factores pertenecen al material empleado y a la presión de trabajo. Se pueden encontrar en las tablas junto a las gráficas incluidas en el Anexo del presupuesto.

En material se aplica el factor 1.0 perteneciente a acero al carbono y en la presión también 1.0 ya que se trabaja a presiones comprendidas entre 1 – 5 bares. El resultado final se aplica del siguiente modo:

Coste final del recipiente = Coste base x Factor Material x Factor Presión.

El coste base a partir de la gráfica utilizando un diámetro de 1 m, es de 30000 £. La ecuación no variará mucho el precio final:

$$\text{Coste final del recipiente} = 30000 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 30000 \text{ £}$$

Para hacer más exacto el cálculo, se añadirá el precio de las bocas de hombre al coste del recipiente. Según el diámetro (24”), el coste será el de la tabla del Anexo P.4:

Coste de las bocas de hombre = Número bocas de hombre x Precio unidad

$$\text{Coste de las bocas de hombre} = 4 \cdot 800 = 3200 \text{ £}$$

El coste del recipiente del stripper ascenderá a **33200 £**.

#### 4.1.2 Coste de los platos

Para los platos se sigue un método similar utilizando la gráfica correspondiente en el Anexo P.3. Las características de los platos de la columna son las siguientes:

- Número : 30 platos
- Material : Acero inoxidable 316L
- Diámetro : 1 m.
- Tipo: Válvula

Para obtener el coste base se debe elegir el diámetro de plato, que se ha calculado como 1 m. y el tipo de plato según la regla siguiente:

1. Perforado
2. Válvula
3. Campana de borboteo

También se aplicará en este caso, un factor de corrección respecto al material incluido también en el Anexo correspondiente.

En este caso se emplea el coeficiente 1.7 perteneciente al acero inoxidable. De la gráfica tal se obtiene un coste base de 300 £ / plato. Para el cálculo final se sigue la ecuación:

Coste final de los platos = Número platos x Coste de un plato x Factor de material

$$\text{Coste final de los platos} = 30 \cdot 300 \cdot 1,7 = \mathbf{15300 \text{ £}}$$

El conjunto de recipiente y platos dará el coste final del stripper = **48500 £**

#### 4.2 Coste de los Intercambiadores de calor

A continuación se realizará el cálculo del coste del precalentador de carga y del reboiler de la unidad. El procedimiento es prácticamente igual que en el caso anterior. Se empleará la gráfica del Anexo P.5.

##### 4.2.1 Coste del Precalentador de carga

El precalentador de carga es un intercambiador de carcasa y tubo con una superficie de intercambio de calor de 141 m<sup>2</sup>. El resto de características del precalentador se pueden consultar tanto en la memoria de cálculo como en la memoria descriptiva.

Para el cálculo del coste, se emplea el área de transferencia de materia y el material del que estén compuestos tanto carcasa como tubos, que en este equipo se trata de acero al carbono en ambos casos.

Siguiendo estos datos y la gráfica del Anexo P.5, se obtiene:

$$\text{Coste base del precalentador} = 25000 \text{ £}$$

De nuevo se aplican los coeficientes de corrección del anexo, pertenecientes a la presión y otros tipos. La presión del precalentador no supera en ningún caso los 10 bares y hay que tener en cuenta que es de tipo cabeza flotante:

$$\text{Coste total del precalentador} = \text{Coste base} \times \text{Factor de Presión} \times \text{Factor de tipo}$$

$$\text{Coste total del precalentador} = 25000 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = \mathbf{25000 \text{ £}}$$

#### 4.2.2 Coste del Reboiler

Se trata de un reboiler tipo termosifón horizontal, el cuál podemos asemejar para la estimación del precio a un intercambiador carcasa y tubo, ya que también se supuso así en los cálculos. La superficie que hay que introducir en la tabla es de 32 m<sup>2</sup> y los materiales de carcasa y de tubo son acero al carbono.

El coste base del reboiler asciende a 14000 £.

El factor de presión también se mantiene en 1.0 ya que la presión del reboiler no sobrepasa los 5 bares, y respecto al tipo de intercambiador, se aplica un factor de 0.85 perteneciente a tubos en U.

Coste final del reboiler = Coste base x Factor de Presión x Factor de tipo

$$\text{Coste final del reboiler} = 14000 \cdot 1,0 \cdot 0,85 = \mathbf{11900 \text{ £.}}$$

#### 4.3 Coste del Aerorefrigerante

El aerorefrigerante calculado cuenta con 156 tubos dispuestos en 6 filas con paso triangular. De nuevo se requiere la superficie de intercambio que en este caso es de 92 m<sup>2</sup>, para introducirlo en la gráfica del Anexo P.6.

Para obtener el coste base del aéreo, se emplea el área citada, obteniéndose un valor de 70000 ptas/m<sup>2</sup>. Este valor, incluye los costes del ventilador y del motor eléctrico, supone presiones por debajo de los 10 Kg/cm<sup>2</sup>, y estima que las aletas serán de aluminio.

El valor obtenido en pesetas, se puede trasladar a las unidades que se están empleando hasta ahora: 420 €/m<sup>2</sup> ó 280 £/m<sup>2</sup>.

El coste base del aéreo es por tanto:

$$\text{Coste base} = \text{Precio por m}^2 \times \text{Área de transferencia}$$

$$\text{Coste base} = 280 \cdot 92 = 25760 \text{ £}$$

Hay que aplicar también una serie de coeficientes de corrección que se encuentran en las tablas del Anexo P.7. Se enumeran más abajo los valores escogidos.

- Influencia de la longitud los tubos = 1      Longitud de los tubos = 9,1 m.
- Influencia del número de filas = 1      Número de filas = 6
- Influencia del tipo de material = 3      Acero inoxidable 316

El coste final del aéreo es:

$$\text{Coste final} = \text{Coste base} \times \text{Factor longitud} \times \text{Factor } N_{\text{filas}} \times \text{Factor material}$$

$$\text{Coste final} = 25760 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 3 = \mathbf{77280 \text{ £}}$$

#### 4.4 Coste de las Bombas

Para el cálculo de las bombas se procede del mismo modo empleando la gráfica del Anexo P.8 y las tablas del Anexo P.9 para la obtención de los factores. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

<b>BOMBAS</b>				
<b>Propiedades</b>	<b>Unidades</b>	<b>B1 A/B</b>	<b>B2 A/B</b>	<b>B3 A/B</b>
<b>Caudal</b>	<b>m3/h</b>	22,41	23,26	2
<b>Carga</b>	<b>m</b>	52,4	63,4	44,2
<b>Q-H</b>	<b>m3/h·m</b>	1174,284	1474,684	88,4
<b>Precio base</b>	<b>£</b>	5300	5700	4500
<b>Presión aspiración</b>	<b>Kg/cm2</b>	< 20	< 20	< 20
<b>Factor de Presión</b>	<b>-</b>	0,7	0,7	0,7
<b>Temperatura</b>	<b>°C</b>	< 150	< 150	< 150
<b>Factor de Temperatura</b>	<b>-</b>	1	1	1
<b>Precio final</b>	<b>£</b>	3710	3990	3150

Como ya se ha especificado, cada línea bombeada lo hace por un conjunto de dos bombas (A y B). Por tanto estos precios hay que multiplicarlos por el número de bombas de cada tipo (2 en cada caso) y sumarlos para obtener el precio final de las bombas.

$$\text{Precio final bombas} = 2 \cdot 3710 + 2 \cdot 3990 + 2 \cdot 3150 = \mathbf{21700 \text{ £}}$$

## **5. CÁLCULO DEL COSTE DE ADQUISICIÓN DEL EQUIPO**

El siguiente paso en el cálculo del presupuesto de la planta es conocer cuál es el coste de adquisición del equipo sobre el cual se aplicarán factores correspondientes a las partidas. Para ello, se suman las cantidades de cada equipo:

- Stripper de aguas ácidas
- Pre calentador de carga
- Reboiler
- Aerorefrigerante
- Bombas

Los costes de cada uno de los equipos y el total se recogen en la siguiente tabla:

PCE	
EQUIPO	PRECIO (£)
Stripper	48500
Pre calentador	25000
Reboiler	11900
Aerorefrigerante	77280
Bombas	21700
Total	184380

El coste final PCE asciende a **184380 £**.

## **6. COSTE DEL CAPITAL FIJO**

En primer lugar se calcula el coste físico de la planta (PPC), el cual es necesario para el cálculo del capital fijo. Para ello, al coste final PCE, se le aplica según distintas partidas, unos coeficientes de corrección.

Los valores que se aplican a cada partida se obtienen del Anexo P.1 y son los siguientes:

Montaje del equipo	=	0,40
Tuberías	=	0,70
Instrumentación	=	0,20
Electricidad	=	0,10
Obra civil	=	0,15
Calorifugado	=	0,3

El resto de factores no son aplicables al presente proyecto.

$$PPC = PCE \cdot (1 + 0,4 + 0,7 + 0,2 + 0,1 + 0,15 + 0,3)$$

$$PPC = 184380 \cdot 2,85 = 525483$$

El coste físico de la planta (PPC) es **525483 £**.

Para el cálculo del capital fijo empleando el PPC calculado anteriormente, se le aplican los coeficientes correspondientes a:

Diseño e ingeniería	=	0,30
Contingencias	=	0,10

El resultado de la ecuación es el siguiente:

$$\text{Capital fijo} = \text{PPC} \cdot (1 + 0,3 + 0,1)$$

$$\text{Capital fijo} = 525483 \cdot 1,4$$

El capital fijo resulta **735677 £**.

## **7. CUADRO DE PRECIOS FINAL**

Hay que incluir todavía dos precios más como son el cálculo del precio de ejecución por contrata y el impuesto sobre el valor añadido.

### **7.1 Precio de ejecución por contrata**

El precio de ejecución por contrata tiene en cuenta el beneficio industrial de la contrata que realiza la obra, y su valor se determina incrementando en un 15% el precio del capital fijo:

$$\text{Precio ejecución por contrata} = 1,15 \cdot 735677 = \mathbf{846030 \text{ £}}$$

### 7.2 Impuesto sobre el valor añadido

El valor del impuesto sobre el valor añadido (IVA) se determina como el 16% del precio de ejecución por contrata:

$$\text{IVA} = 0,16 \cdot 846030 = 135365 \text{ £.}$$

### 7.3 Presupuesto total

El valor al que asciende el costo total de la planta se obtiene como resultado de sumar las cantidades correspondientes al precio de ejecución por contrata y el IVA:

$$\text{Costo total} = 846030 + 135365 = \mathbf{981395 \text{ £.}}$$

Expresando el resultado en euros € (multiplicando por el factor de conversión de la libra inglesa 1,5):

$$\mathbf{\text{Coste total} = 1.472.093 \text{ €}}$$

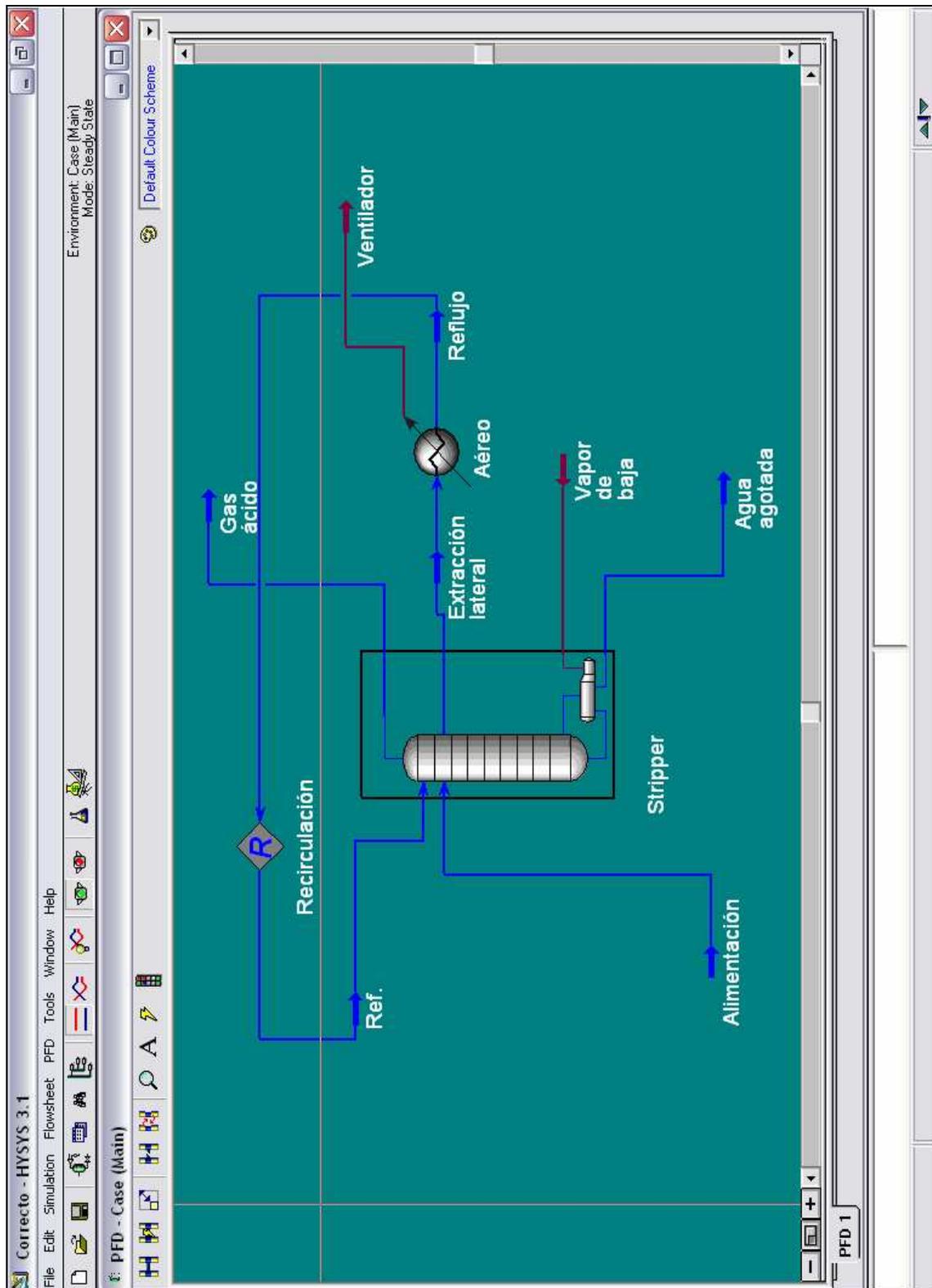
El coste total de la instalación asciende a **UN MILLÓN CUATROCIENTOS SETENTA Y DOS MIL NOVENTA Y TRES** euros.

Puerto Real, 15 de Septiembre de 2007

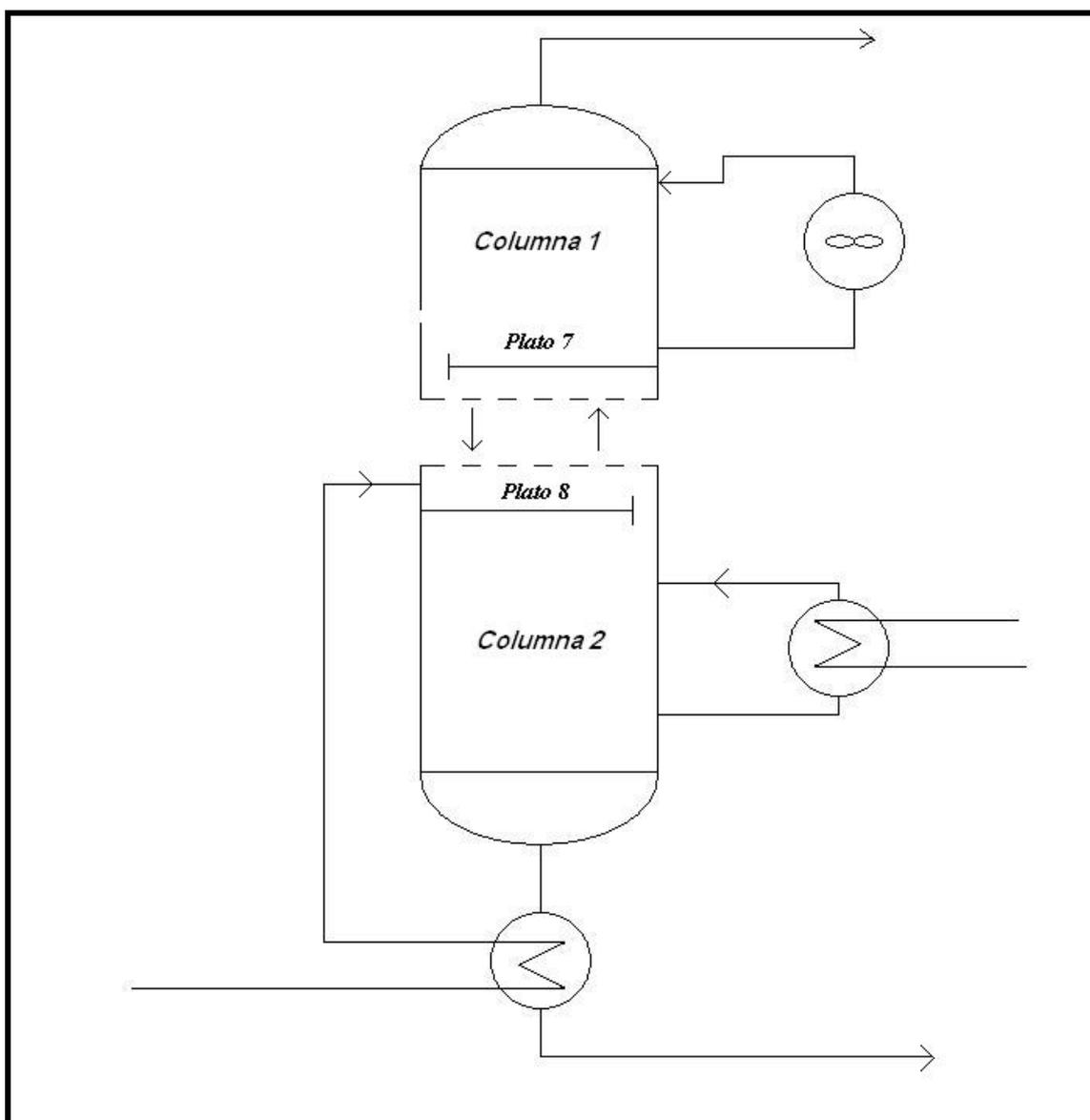
Fdo: Manuel Macías Pérez

**ANEXO 0**  
**MEMORIA DESCRIPTIVA**

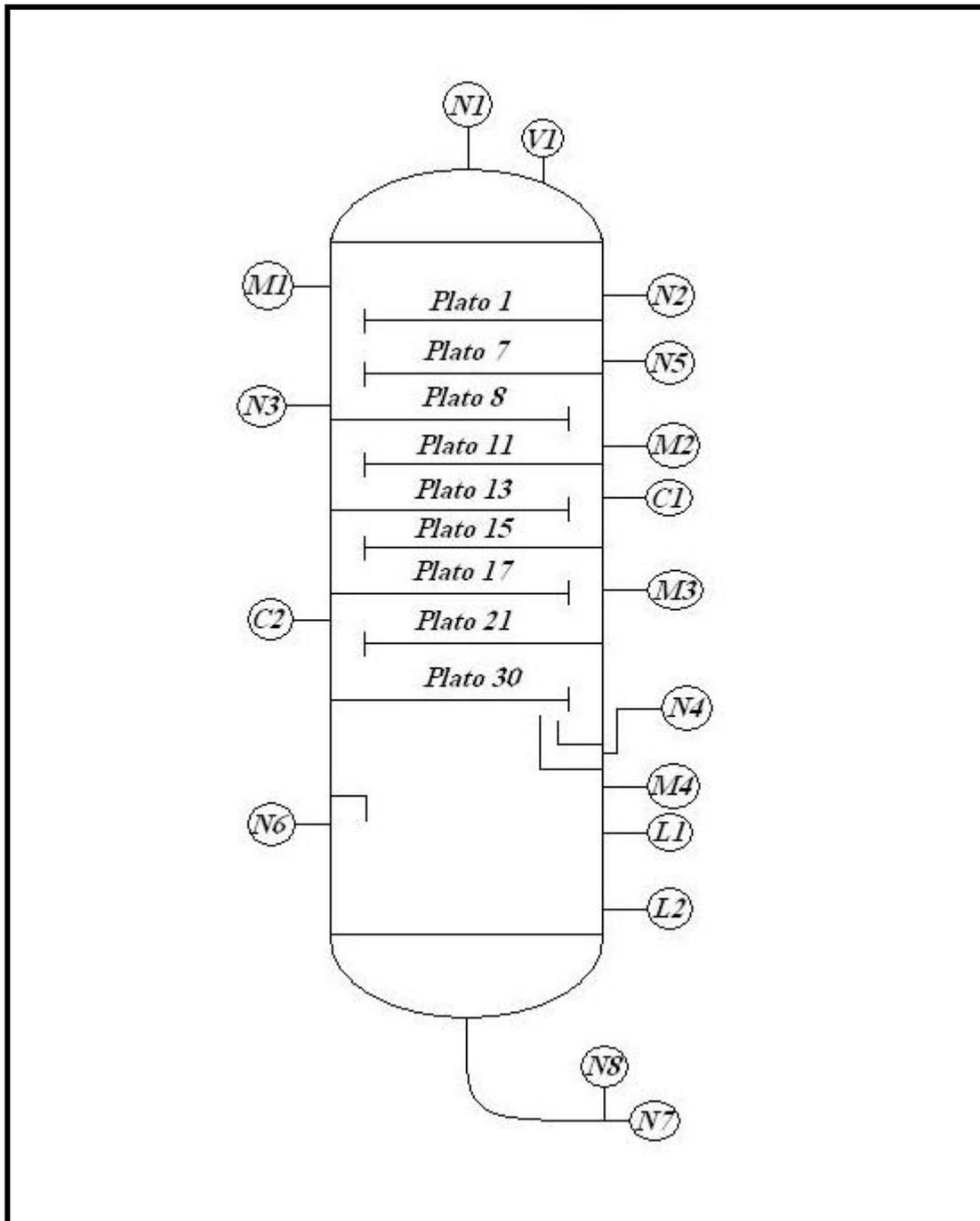
Anexo 0.1: Simulador



## Anexo 0.2: Columna dividida para la resolución de los balances



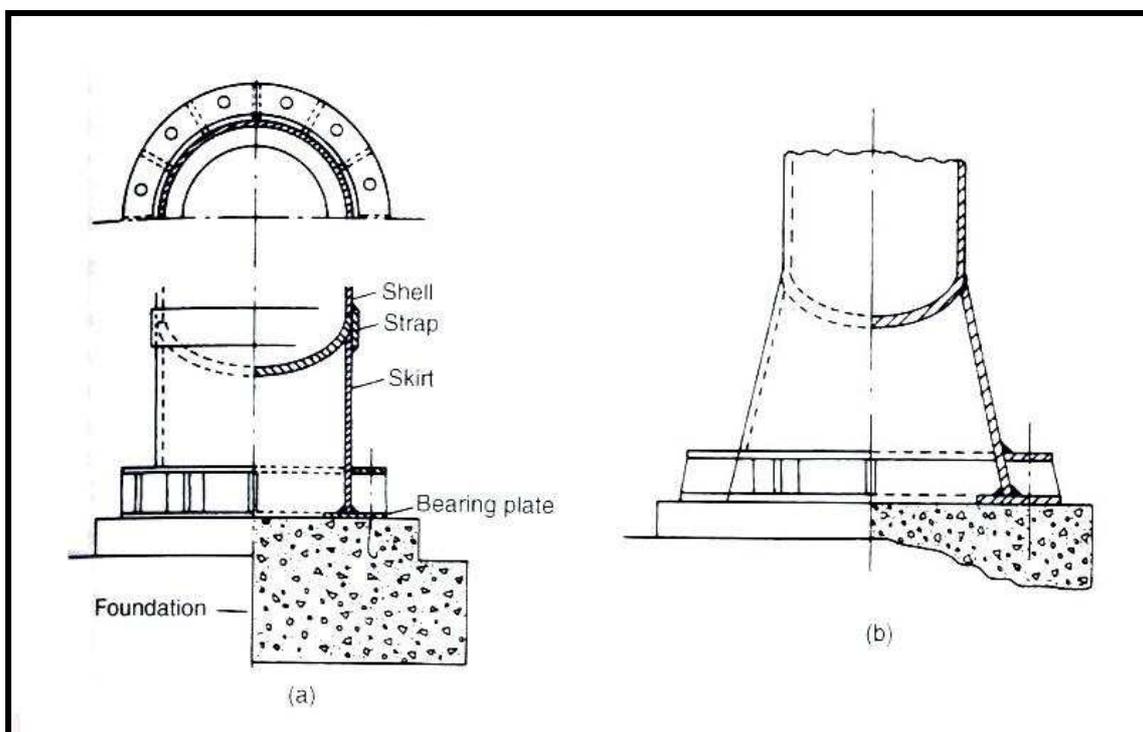
## Anexo 0.3: Entradas y salidas de la columna



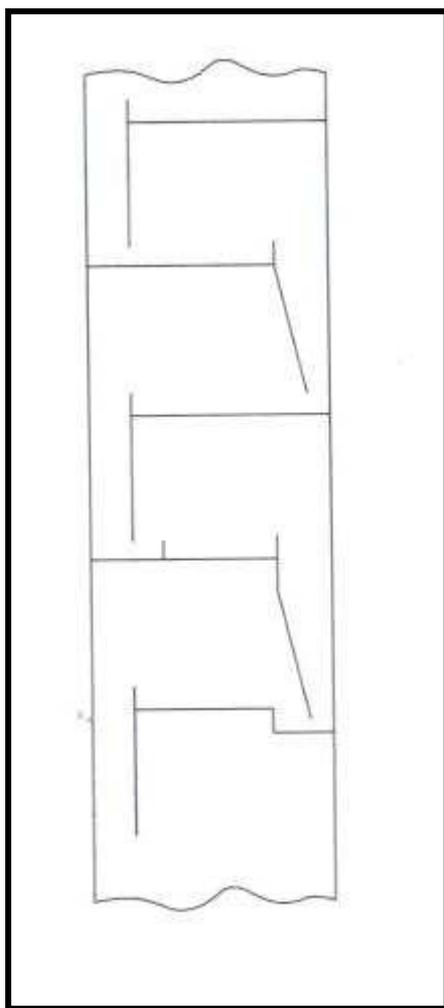
## Anexo 0.3: Leyenda de entradas y salidas de la columna

<b>TABLA DE TUBULADURAS DEL STRIPPER</b>		
<b>TAG</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>
<b>N1</b>	1	<b>Salida Gas ácido</b>
<b>N2</b>	1	<b>Reflujo</b>
<b>N3</b>	1	<b>Alimentación</b>
<b>N4</b>	1	<b>Carga al Reboiler</b>
<b>N5</b>	1	<b>Extracción lateral</b>
<b>N6</b>	1	<b>Retorno Reboiler</b>
<b>N7</b>	1	<b>Agua agotada de fondo</b>
<b>N8</b>	1	<b>Drenaje</b>
<b>L1 - 2</b>	2	<b>Indicador de nivel</b>
<b>C1 - 2</b>	2	<b>Adición de sosa</b>
<b>V1</b>	1	<b>Venteo</b>
<b>M1 - 4</b>	4	<b>Bocas de Hombre</b>

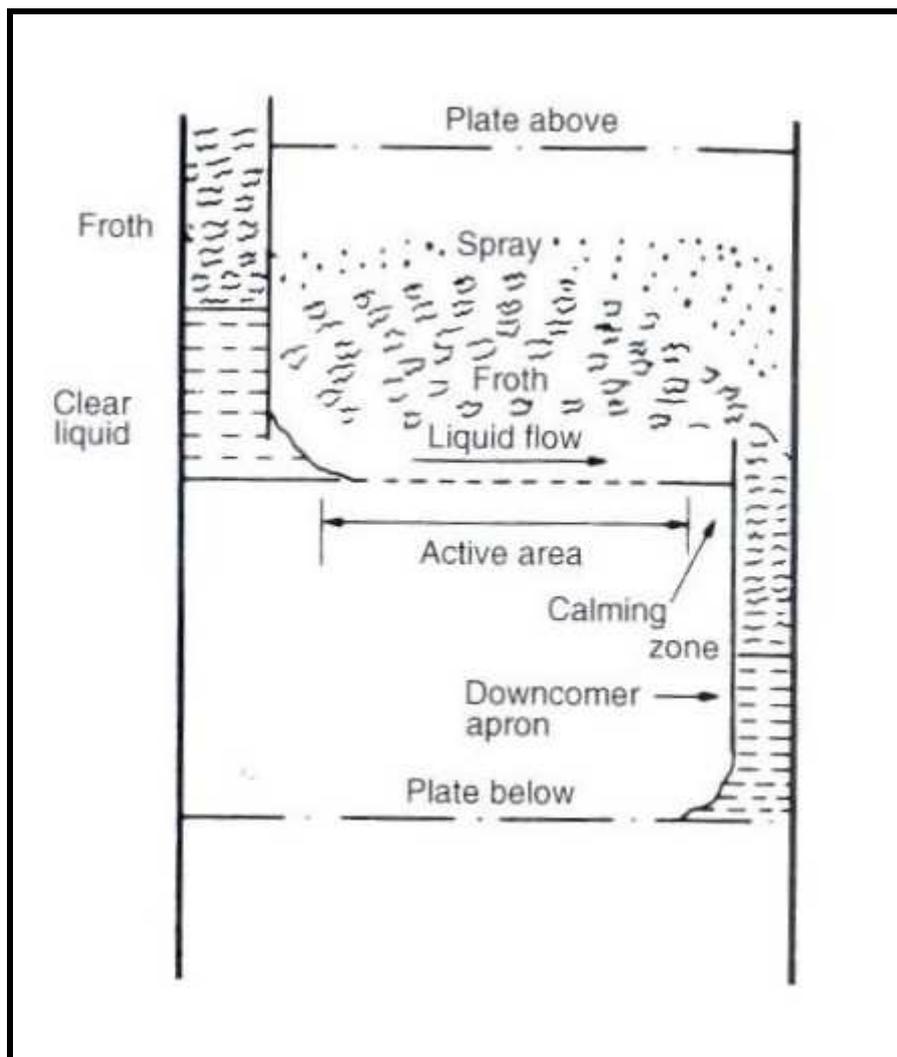
Anexo 0.4: Soportes empleados: tipo “skirt”



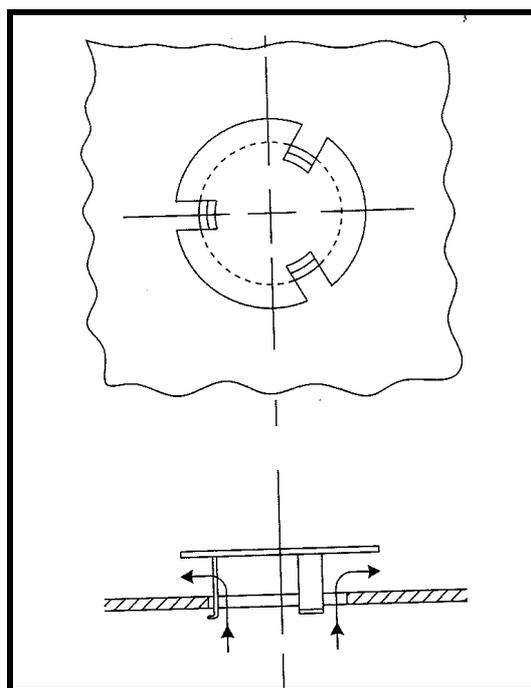
Anexo 0.5: Esquema de los derramaderos y vertederos de la columna



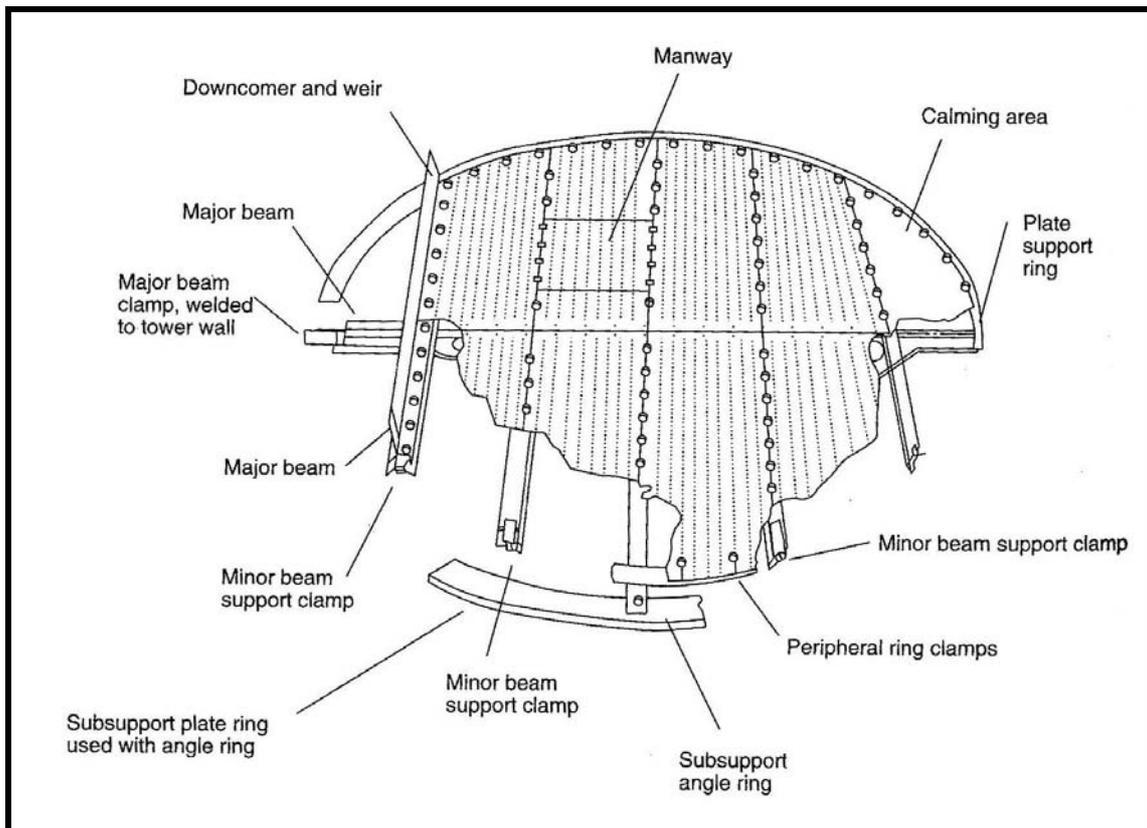
Anexo 0.6: Distribución del líquido en los platos de la columna



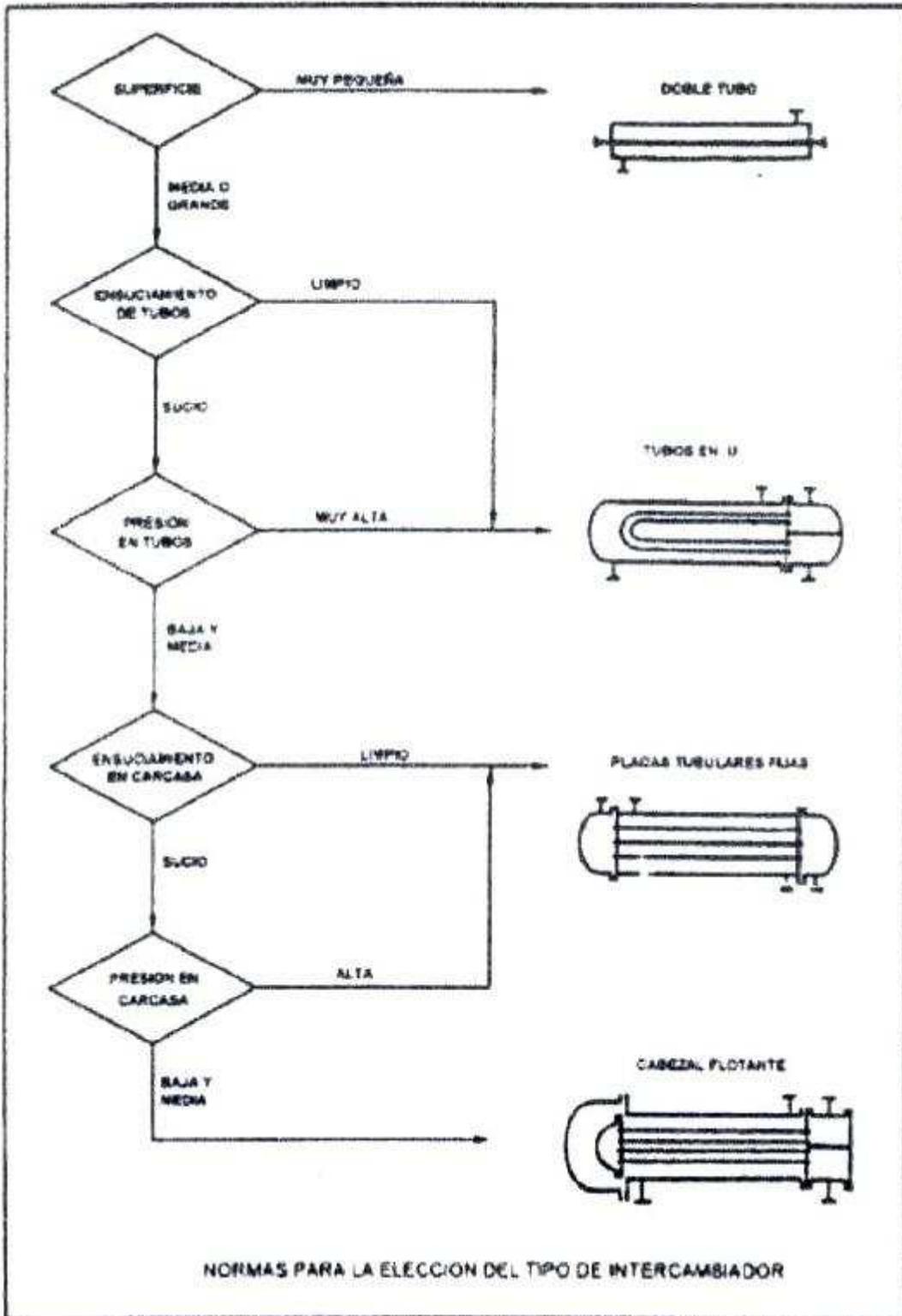
Anexo 0.7: Esquema de un plato tipo válvula



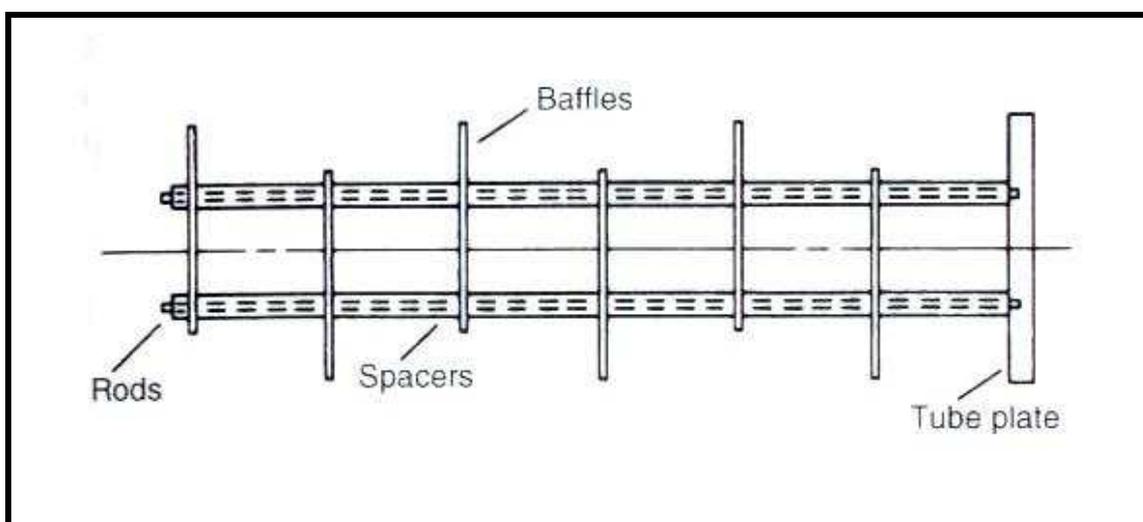
Anexo 0.8: Dibujo de uno de los platos de la columna



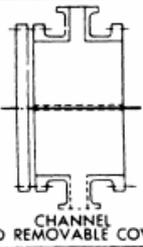
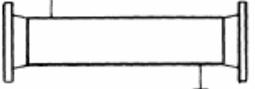
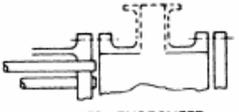
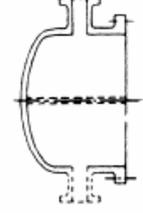
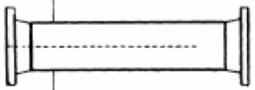
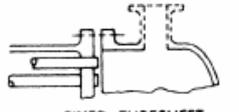
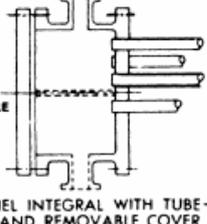
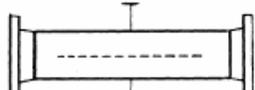
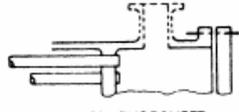
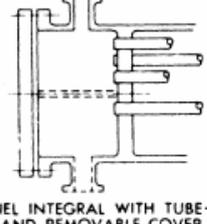
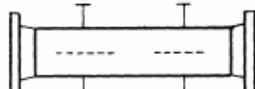
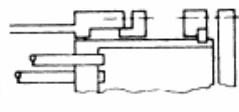
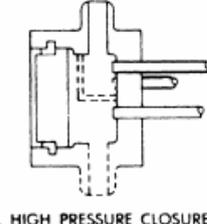
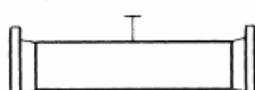
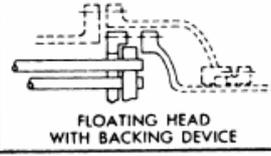
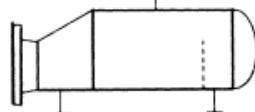
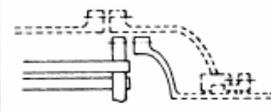
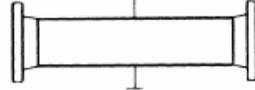
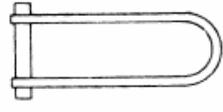
Anexo 0.9: Elección del intercambiador de carga



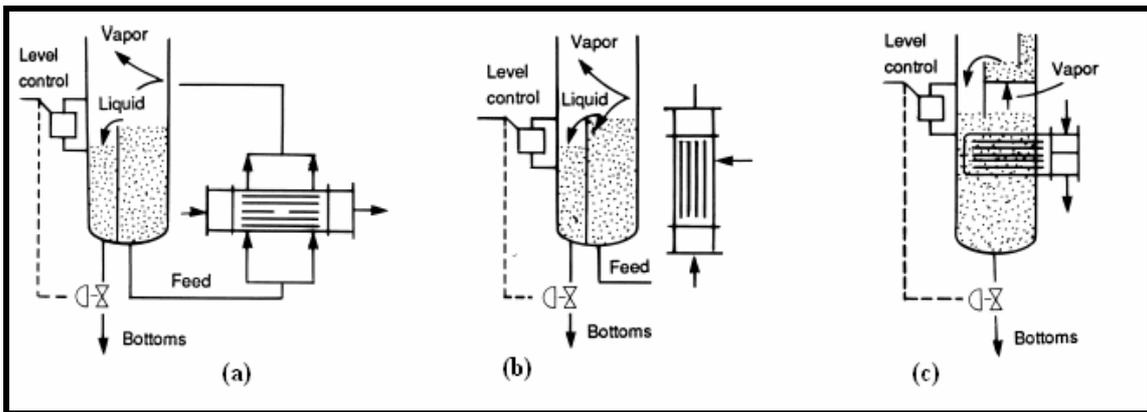
Anexo 0.10: Esquema de los baffles de un intercambiador



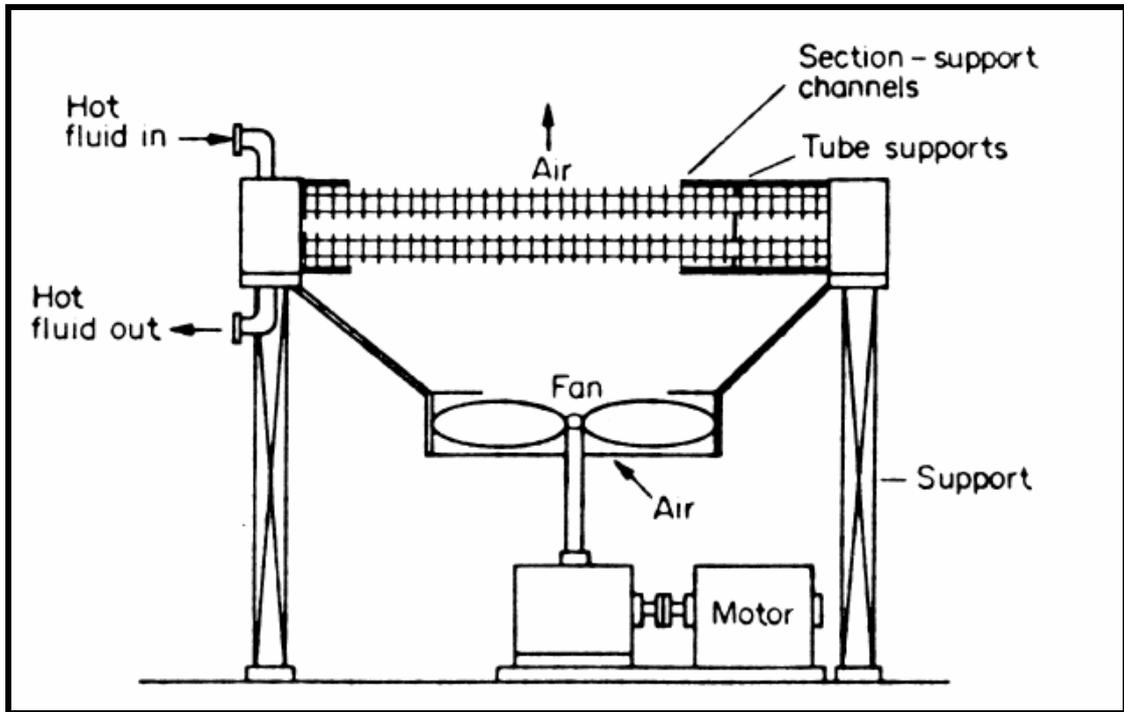
Anexo 0.11: Resumen de la nomenclatura del código TEMA para intercambiadores de carcasa y tubo

	FRONT END STATIONARY HEAD TYPES		SHELL TYPES		REAR END HEAD TYPES
<b>A</b>	 CHANNEL AND REMOVABLE COVER	<b>E</b>	 ONE PASS SHELL	<b>L</b>	 FIXED TUBESHEET LIKE "A" STATIONARY HEAD
<b>B</b>	 BONNET (INTEGRAL COVER)	<b>F</b>	 TWO PASS SHELL WITH LONGITUDINAL BAFFLE	<b>M</b>	 FIXED TUBESHEET LIKE "B" STATIONARY HEAD
<b>C</b>	 REMOVABLE TUBE BUNDLE ONLY CHANNEL INTEGRAL WITH TUBE- SHEET AND REMOVABLE COVER	<b>G</b>	 SPLIT FLOW	<b>N</b>	 FIXED TUBESHEET LIKE "N" STATIONARY HEAD
<b>N</b>	 CHANNEL INTEGRAL WITH TUBE- SHEET AND REMOVABLE COVER	<b>H</b>	 DOUBLE SPLIT FLOW	<b>P</b>	 OUTSIDE PACKED FLOATING HEAD
<b>D</b>	 SPECIAL HIGH PRESSURE CLOSURE	<b>J</b>	 DIVIDED FLOW	<b>S</b>	 FLOATING HEAD WITH BACKING DEVICE
		<b>K</b>	 KETTLE TYPE REBOILER	<b>T</b>	 PULL THROUGH FLOATING HEAD
		<b>X</b>	 CROSS FLOW	<b>U</b>	 U-TUBE BUNDLE
				<b>W</b>	 EXTERNALLY SEALED FLOATING TUBESHEET

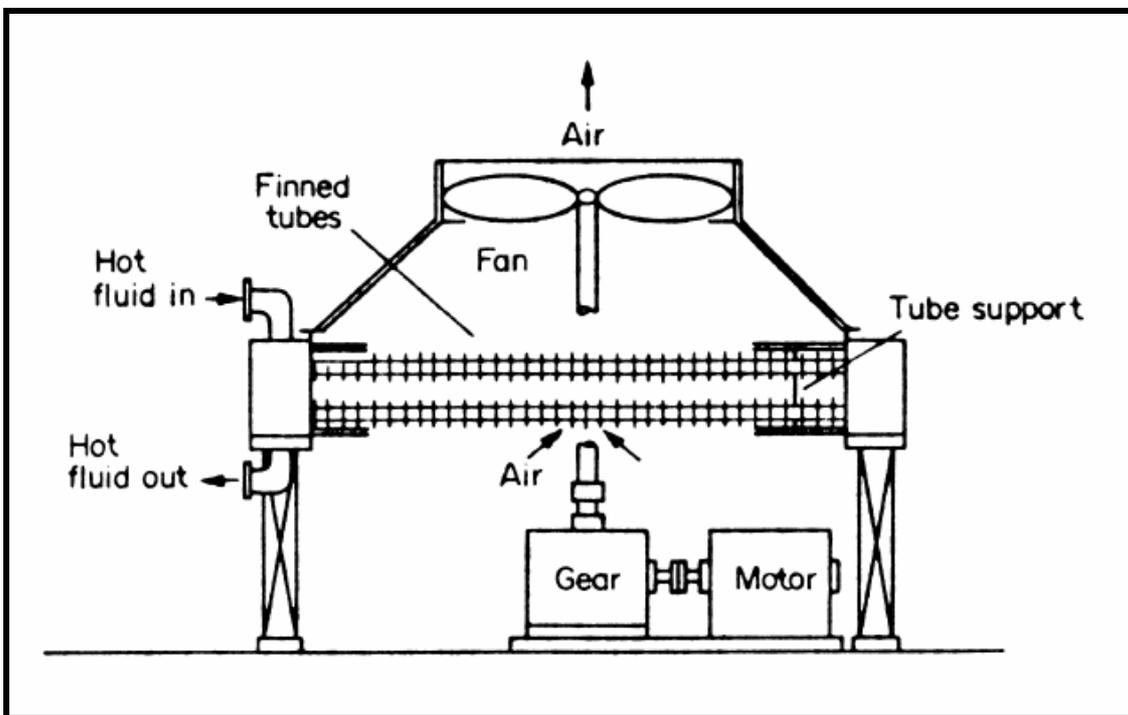
Anexo 0.12: Ejemplos de las distintas configuraciones de los reboilers



Anexo 0.13: Configuraciones de un aéreo

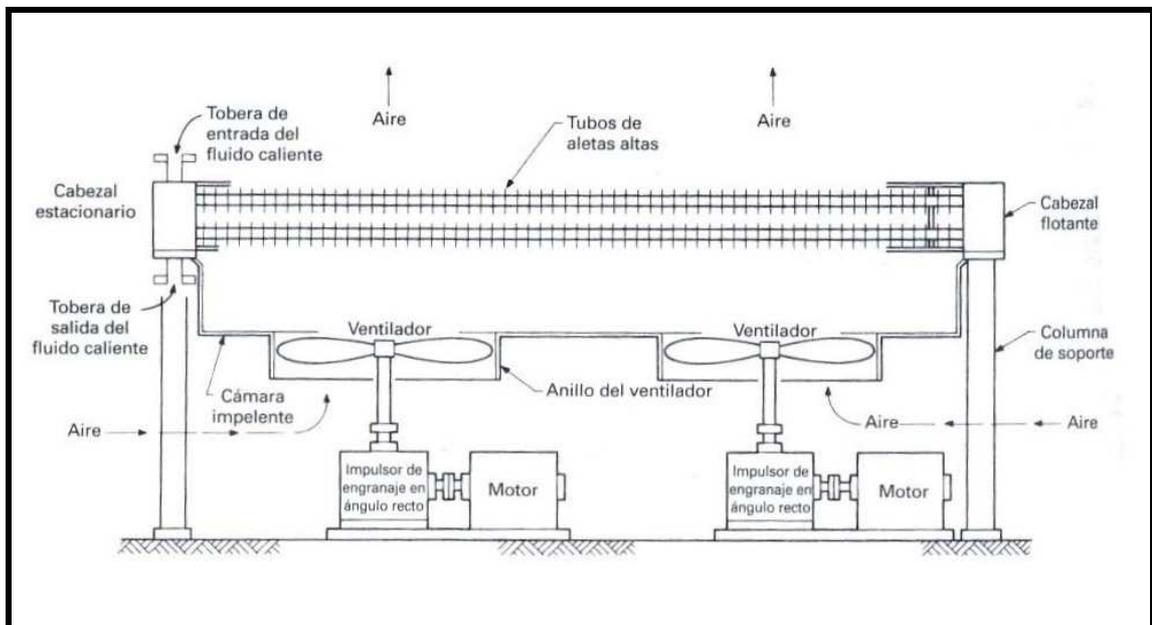


a. Tiro forzado

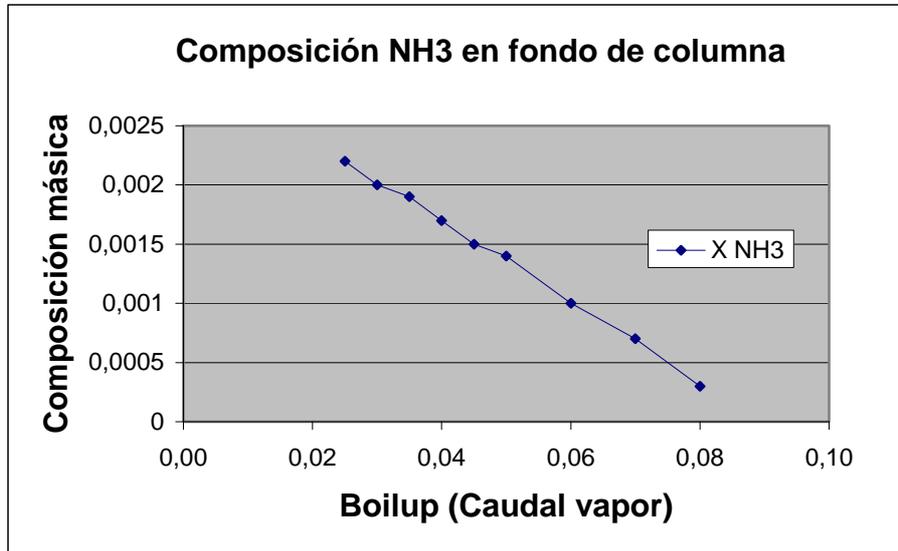
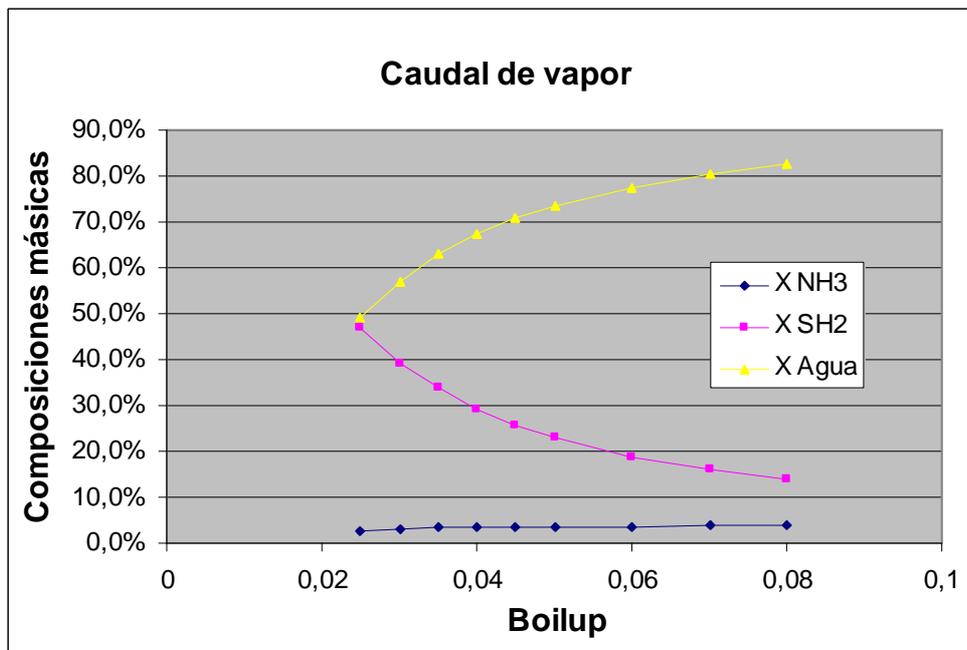


b. Tiro inducido

Anexo 0.14: Configuración seleccionada: Tiro forzado.

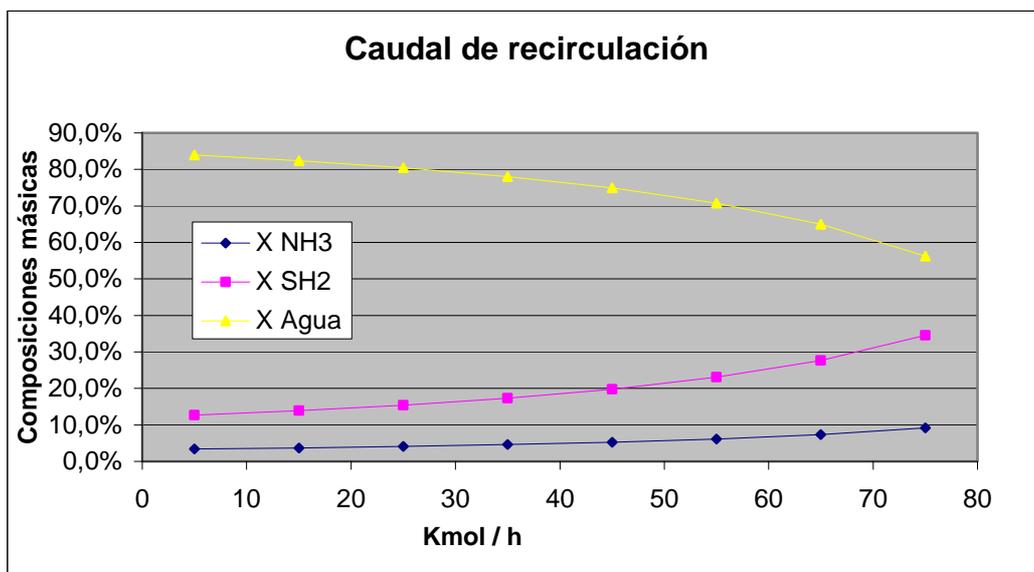


## Anexo 0.15: Gráficas de optimización

**Primera iteración**Gráfica 0.1: Influencia del caudal de vapor en la composición de NH<sub>3</sub> en fondo de columna.

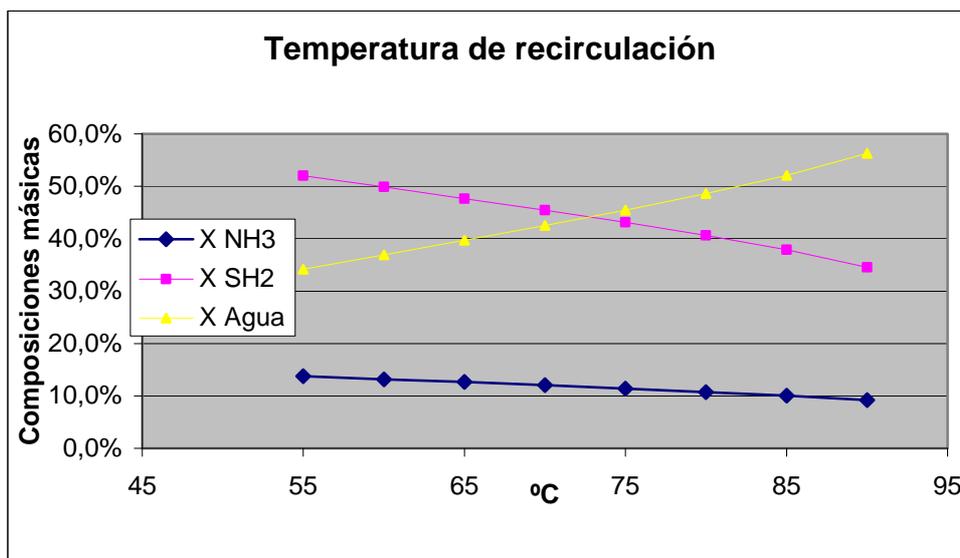
Gráfica 0.2: Influencia del caudal de vapor en las composiciones de cabeza.

## Anexo 0.15: Gráficas de optimización

**Primera iteración**

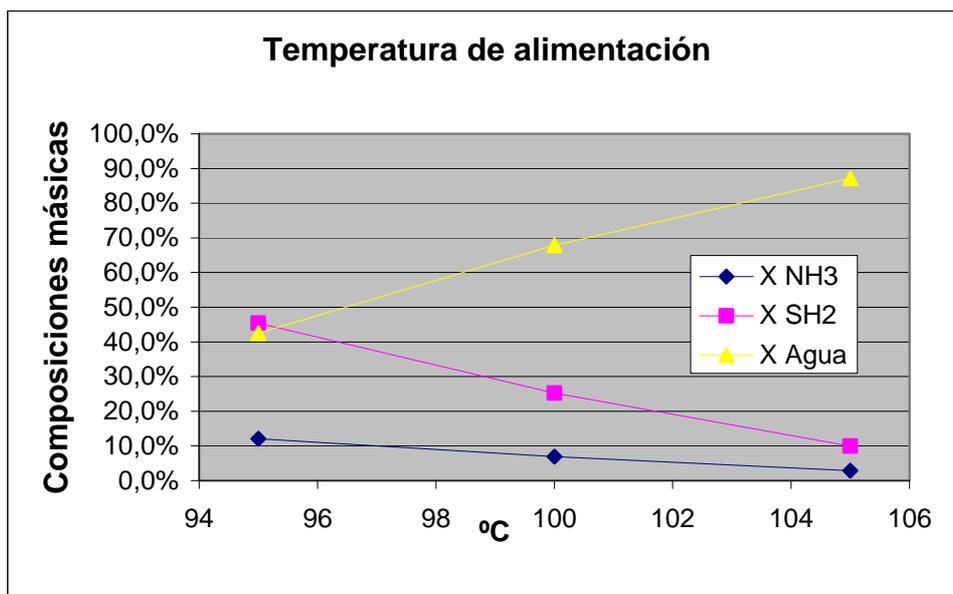
Gráfica 0.3: Influencia del caudal de recirculación en las composiciones de cabeza.

## Anexo 0.15: Gráficas de optimización

**Primera iteración**

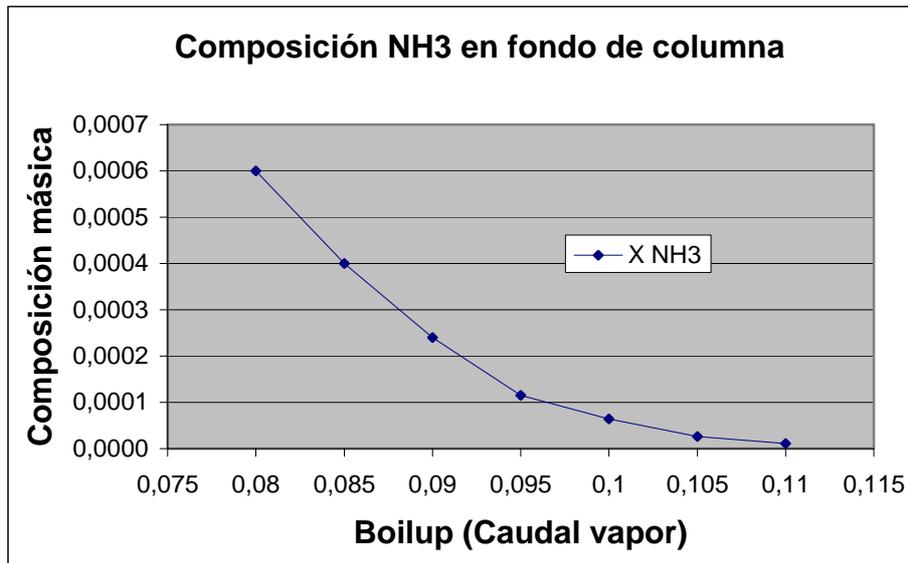
Gráfica 0.4: Influencia de la temperatura de recirculación en las composiciones de cabeza.

## Anexo 0.15: Gráficas de optimización

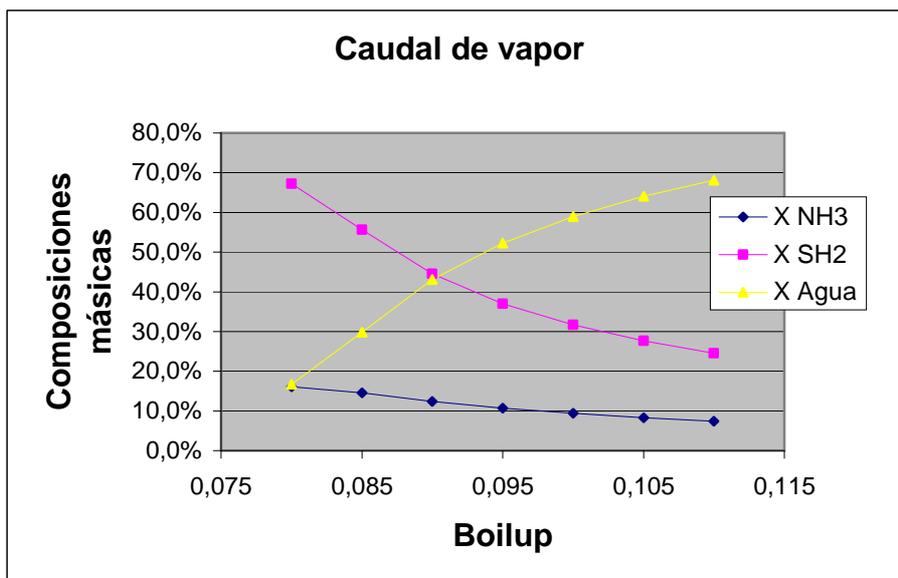
**Primera iteración**

Gráfica 0.5: Influencia de la temperatura de alimentación en las composiciones de cabeza.

## Anexo 0.15: Gráficas de optimización

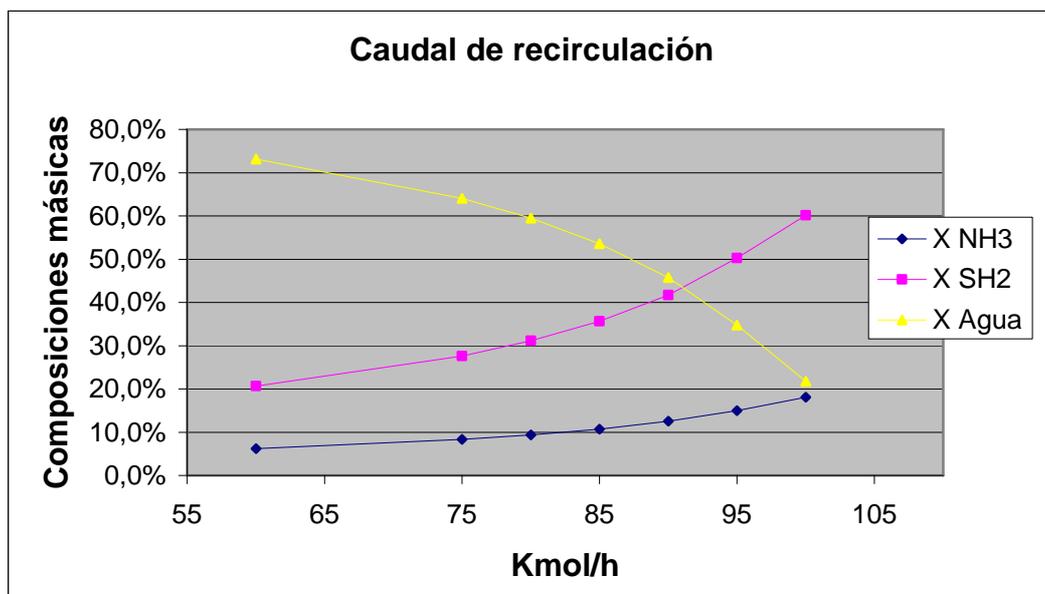
**Segunda iteración**

Gráfica 0.6: Influencia del caudal de vapor en la composición del amoníaco en el fondo de columna.



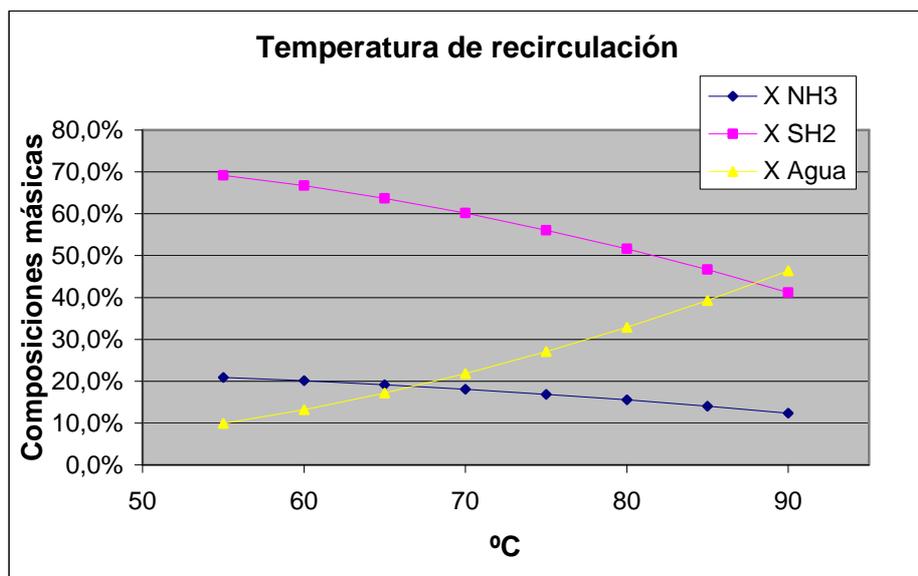
Gráfica 0.7: Influencia del caudal de vapor en las composiciones de cabeza.

## Anexo 0.15: Gráficas de optimización

**Segunda iteración**

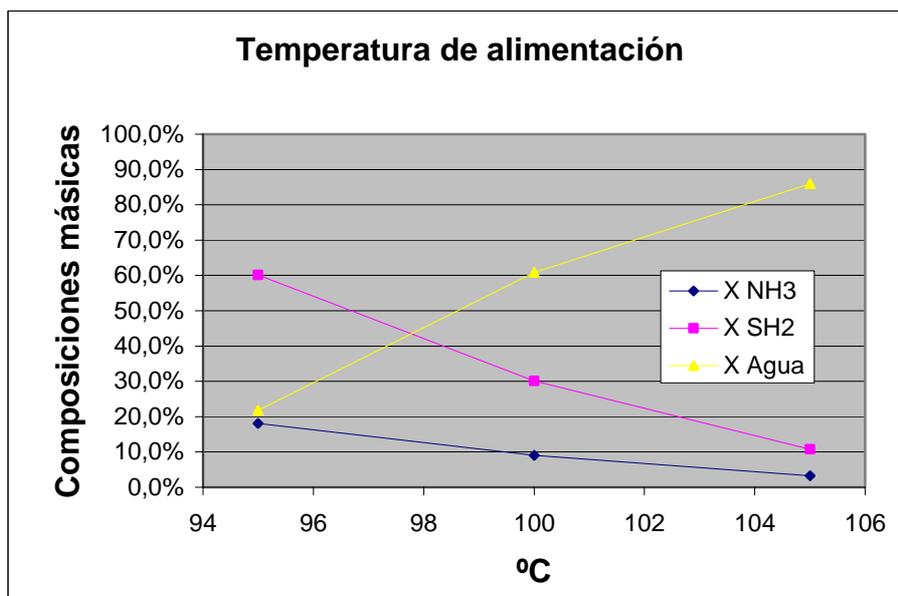
Gráfica 0.8: Influencia del caudal de recirculación en las composiciones de cabeza.

## Anexo 0.15: Gráficas de optimización

**Segunda iteración**

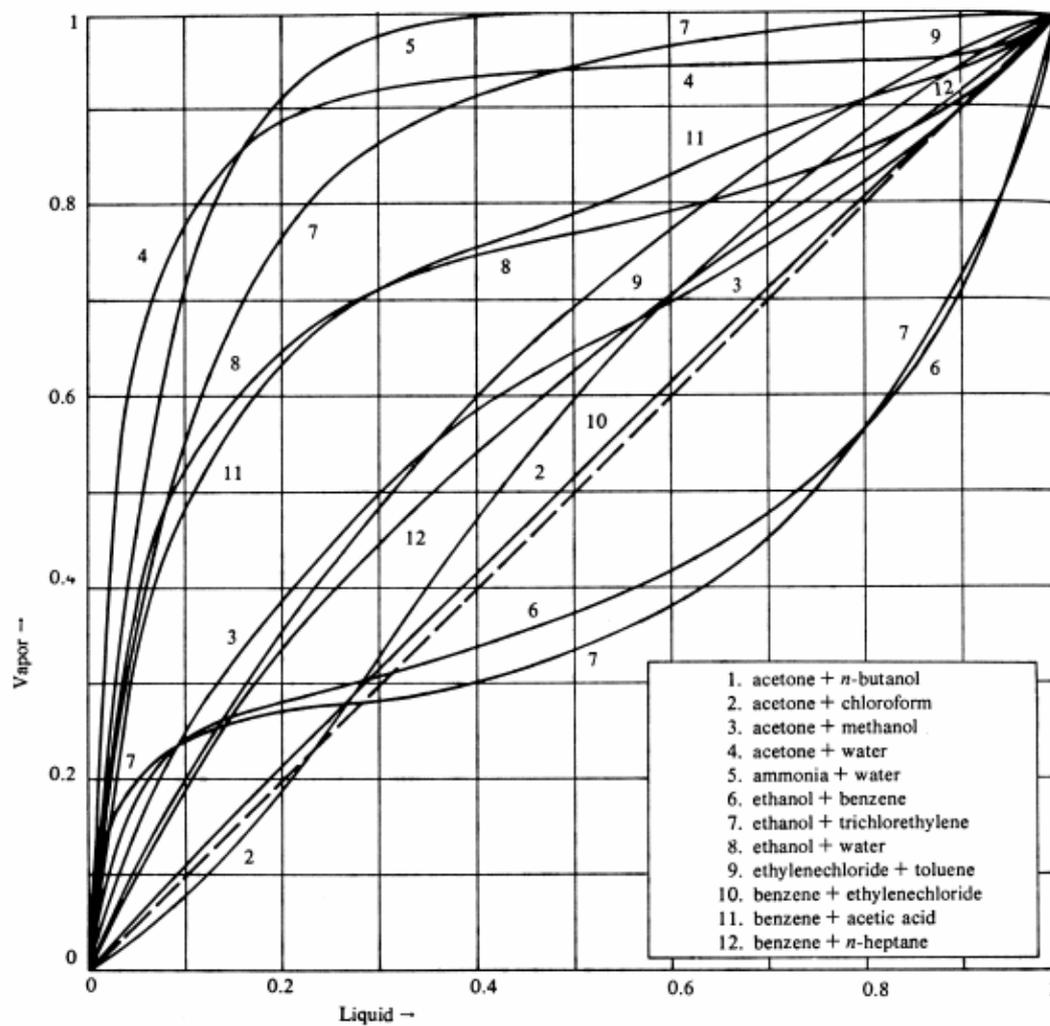
Gráfica 0.9: Influencia de la temperatura de recirculación en las composiciones de cabeza.

## Anexo 0.15: Gráficas de optimización

**Segunda iteración**

Gráfica 0.10: Influencia de la temperatura de alimentación en las composiciones de cabeza.

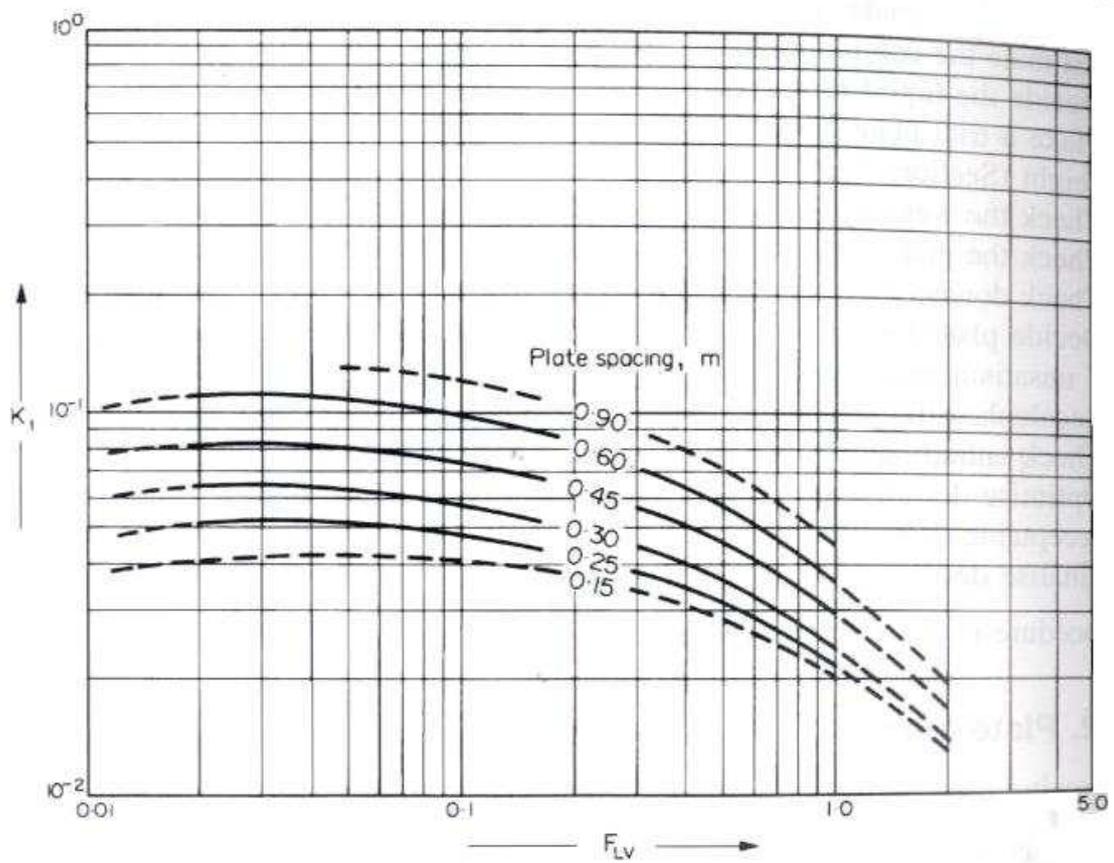
**ANEXO 1 – 7**  
**MEMORIA DE CÁLCULO**

Anexo 1.1: Equilibrio líquido – vapor de  $\text{NH}_3$ 

## Anexo 1.2: Platos teóricos de la columna

<b>Stripper</b>		
<b>X</b>	<b>Etapas teóricas</b>	<b>Y</b>
0,05000	<b>Aéreo</b>	-
0,04821	<b>1</b>	0,58340
0,04311	<b>2</b>	0,53458
0,03062	<b>3</b>	0,39499
0,00340	<b>4</b>	0,05333
0,00321	<b>5</b>	0,04204
0,00264	<b>6</b>	0,03482814
0,00210	<b>7</b>	0,02856047
0,00163	<b>8</b>	0,02265043
0,00123	<b>9</b>	0,01748624
0,00090	<b>10</b>	0,01311676
0,00064	<b>11</b>	0,00946162
0,00044	<b>12</b>	0,0065706
0,00029	<b>13</b>	0,00437688
0,00017	<b>14</b>	0,00274073
0,00010	<b>15</b>	0,00151691
0,00004	<b>Reboiler</b>	0,000648

Anexo 2.1: Valor  $k_i$  para el cálculo de la velocidad superficial del gas ( $V_F$ )



Anexo 2.2: Tabla con parámetros de diseño de platos

1. Espaciamiento de los platos			
Diámetro de la torre, $T$		Espaciamiento de la torre, $t$	
m	ft	m	in
1 menos	4 menos	0.15	6 mínimo
1-3	4-10	0.50	20
3-4	10-12	0.60	24
4-8	12-24	0.75	30
		0.90	36

2. Flujo del líquido	
a. No superior a $0.015 \text{ m}^3/(\text{m diam}) \cdot \text{s}$ ( $0.165 \text{ ft}^3/\text{ft} \cdot \text{s}$ ) para platos de flujo transversal de un solo paso	
b. No superior a $0.032 \text{ m}^3/\text{longitud de derramadero}$ ( $0.35 \text{ ft}^3/\text{ft} \cdot \text{s}$ ) para otros.	

3. Sellado de los vertederos	
a. Vacío, n, 5 mm minimum, 10 de preferencia ( $\frac{1}{4}$ - $\frac{1}{2}$ in)	
b. Presión atmosférica y superior, 25 mm mínimo, 40 mm de preferencia (1-1.5 in)	

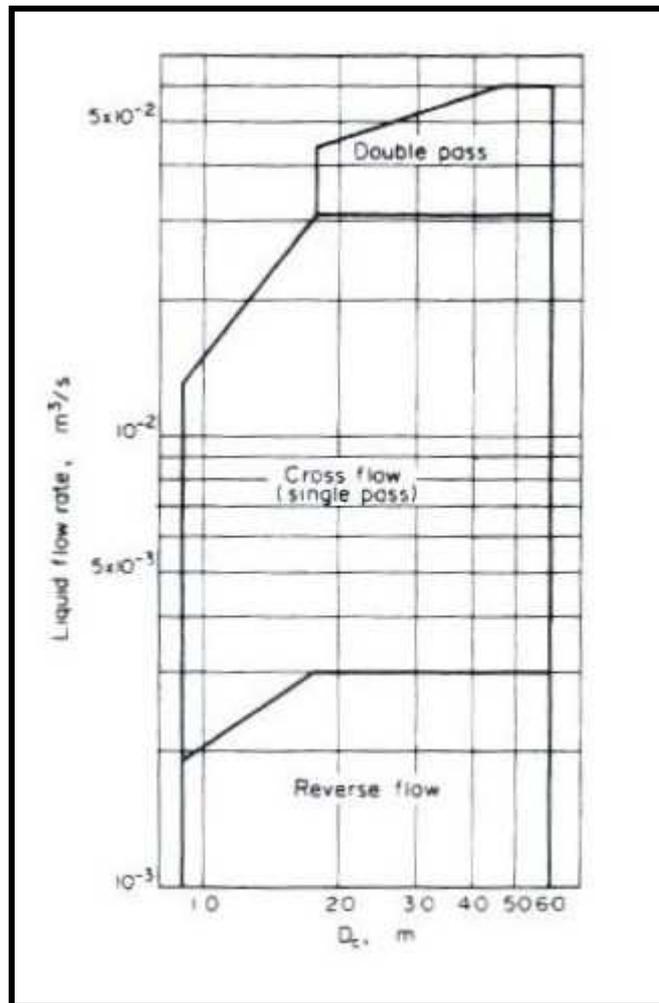
  

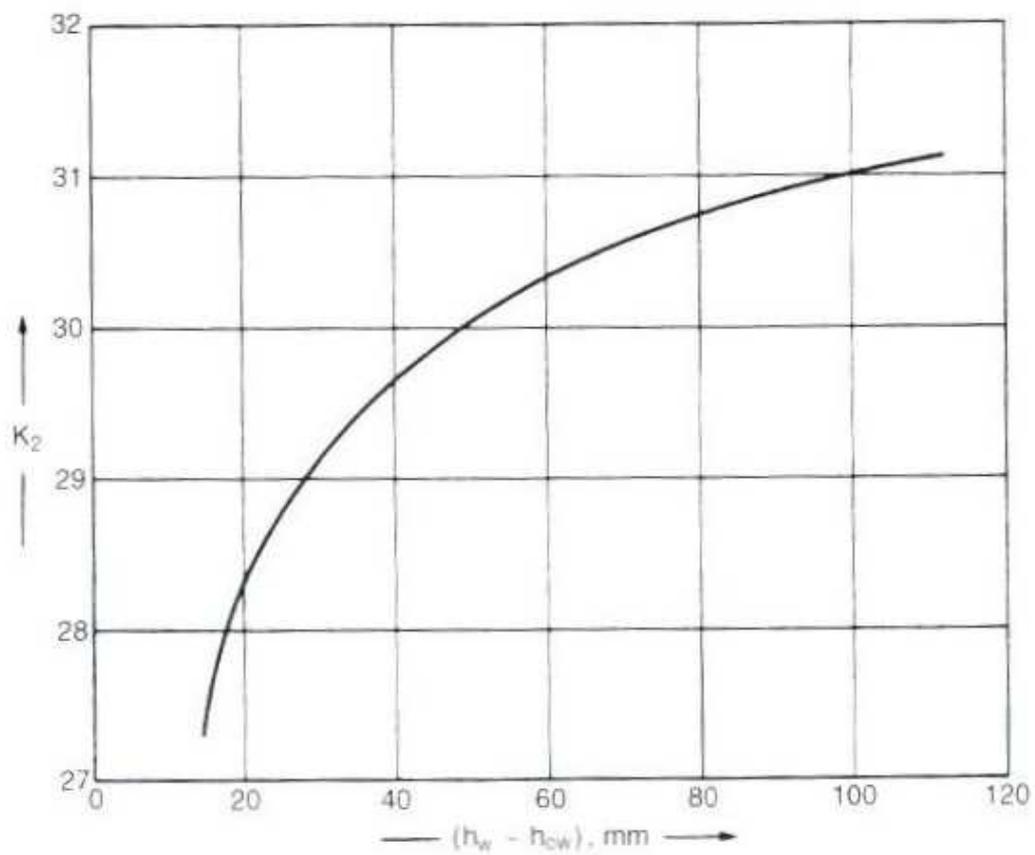
4. Longitud del derramadero para derramaderos rectangulares rectos, platos de flujo transversal, 0.6T a 0.8T, 0.7T típica			
Longitud del derramadero $W$	Distancia desde centro de la torre	Porcentaje del área de la torre utilizada por un vertedero	%
$0.55T$	$0.4181T$	3.877	
$0.60T$	$0.3993T$	5.257	
$0.65T$	$0.2516T$	6.899	
$0.70T$	$0.3562T$	8.808	
$0.75T$	$0.3296T$	11.255	
$0.80T$	$0.1991T$	14.145	

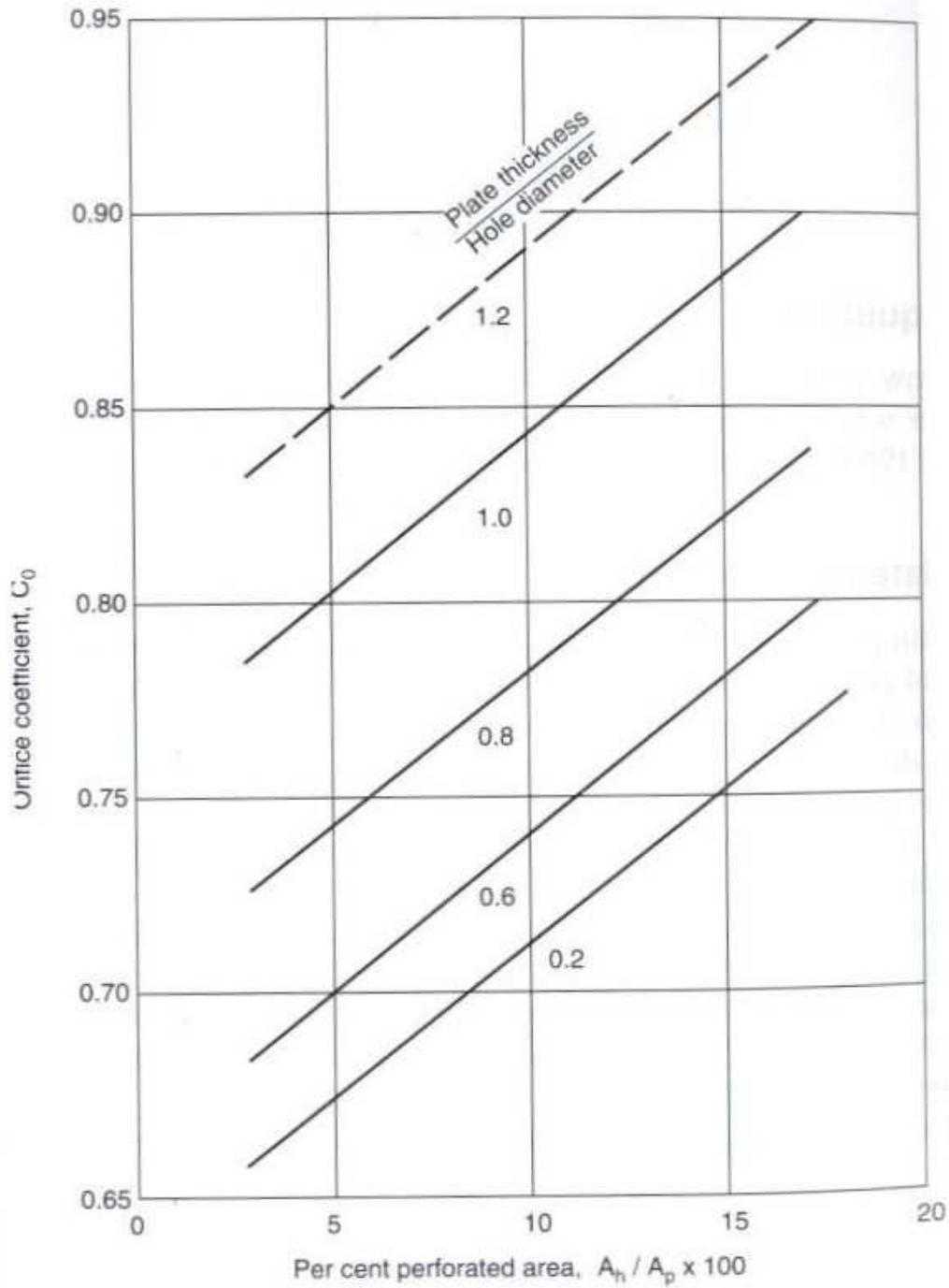
5. Caída de presión normal por plato	
Presión total	Caída de presión
35 mmHg abs	3 mm Hg o menos
1 std atm	500-800 $\text{N/m}^2$ ( $0.07$ - $0.12 \text{ lb}_f/\text{in}^2$ )
$2 \times 10^6 \text{ N/m}^2$	1000 $\text{N/m}^2$
$300 \text{ lb}_f/\text{in}^2$	$0.15 \text{ lb}_f/\text{in}^2$

Anexo 2.3: Elección del tipo de paso por plato

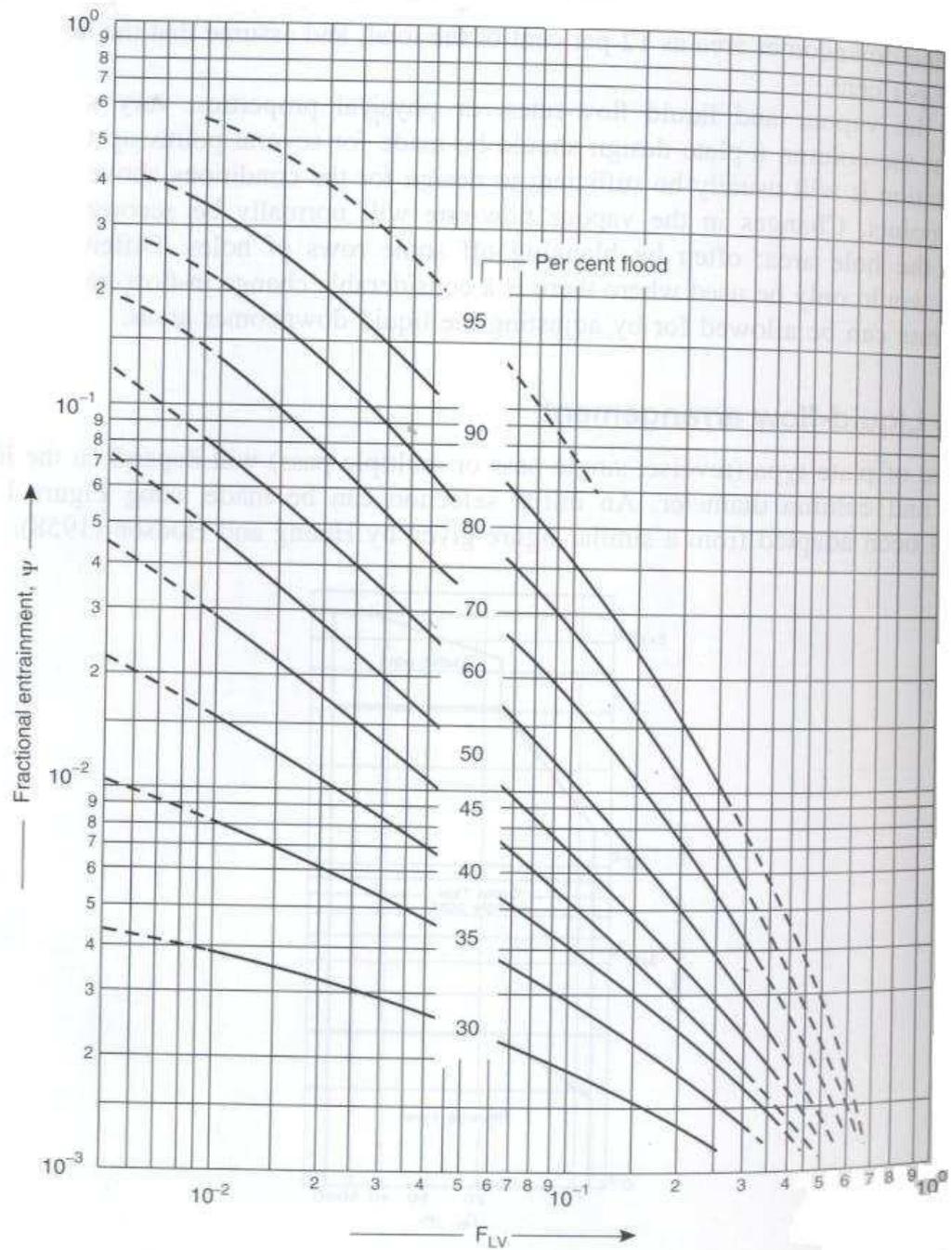


Anexo 2.4: Factor  $K_2$  para el cálculo de la velocidad de lloriqueo

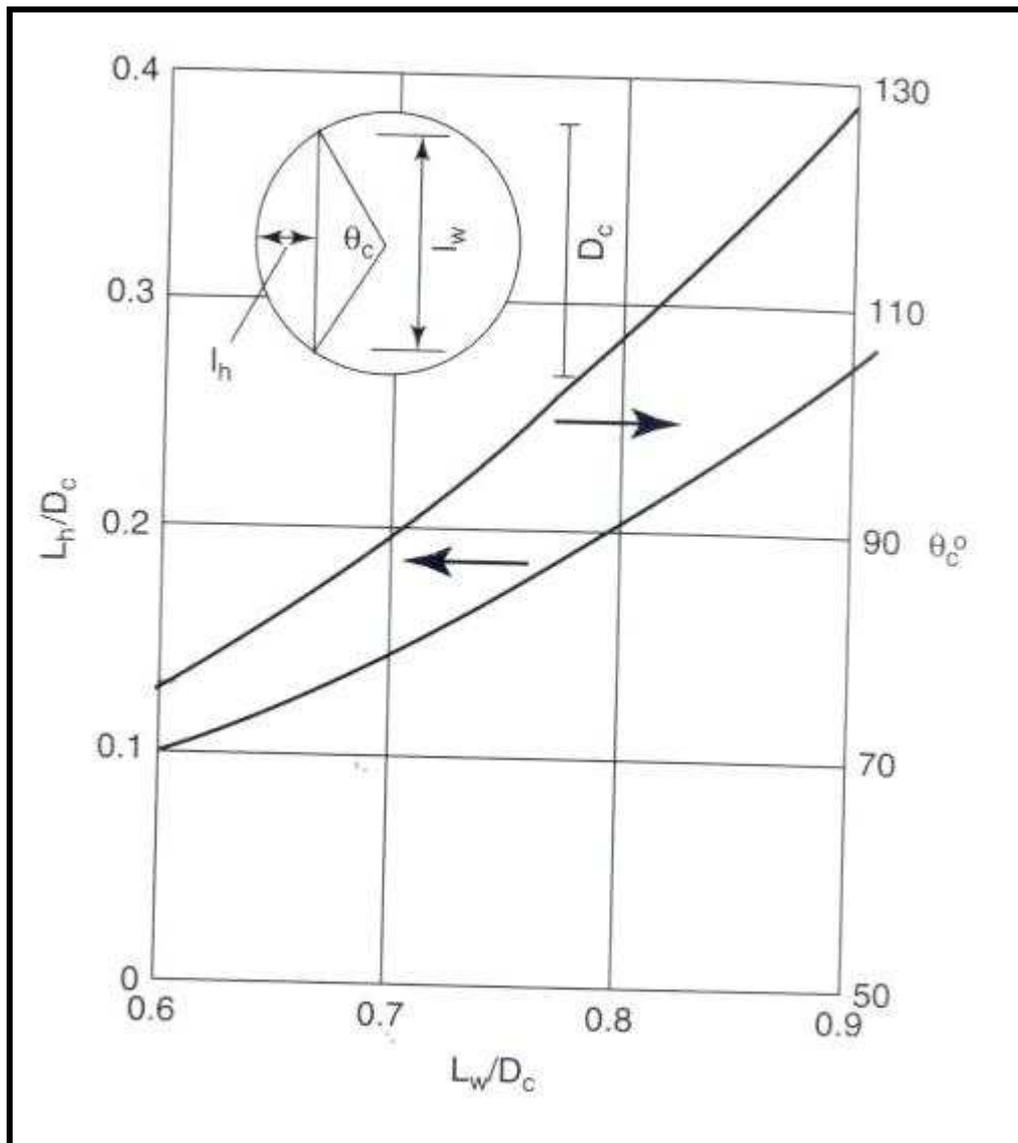
Anexo 2.5: Coeficiente de orificio (Plato seco)



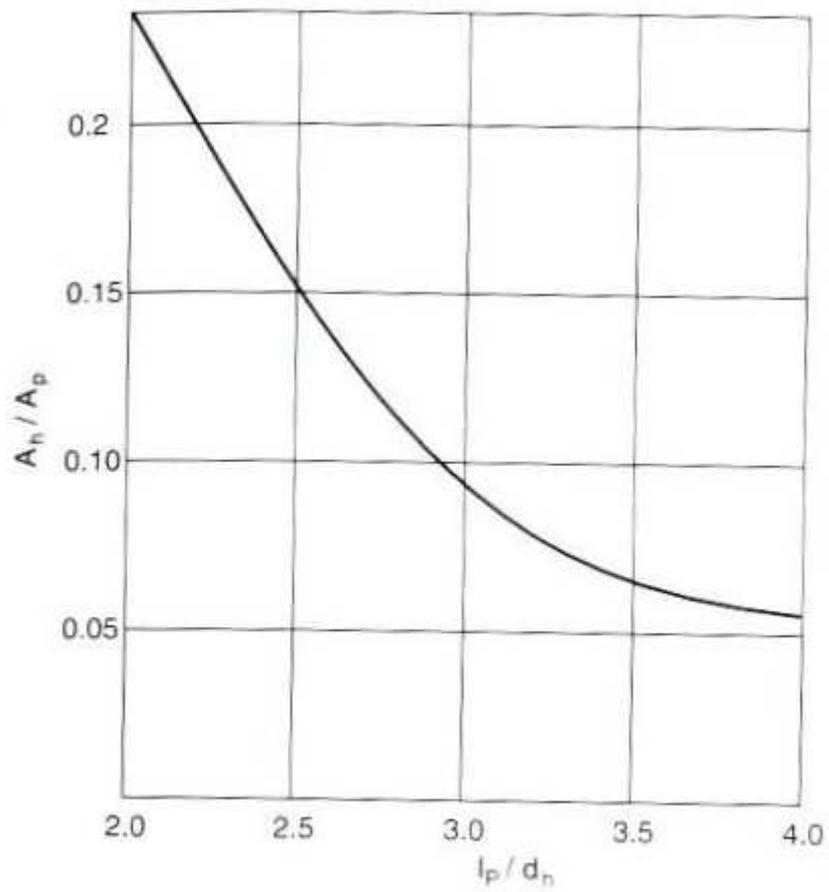
Anexo 2.6: Fracción de arrastre del líquido



Anexo 2.7: Selección del ángulo  $\theta_c$



Anexo 2.8: Cálculo del pitch en la columna 2



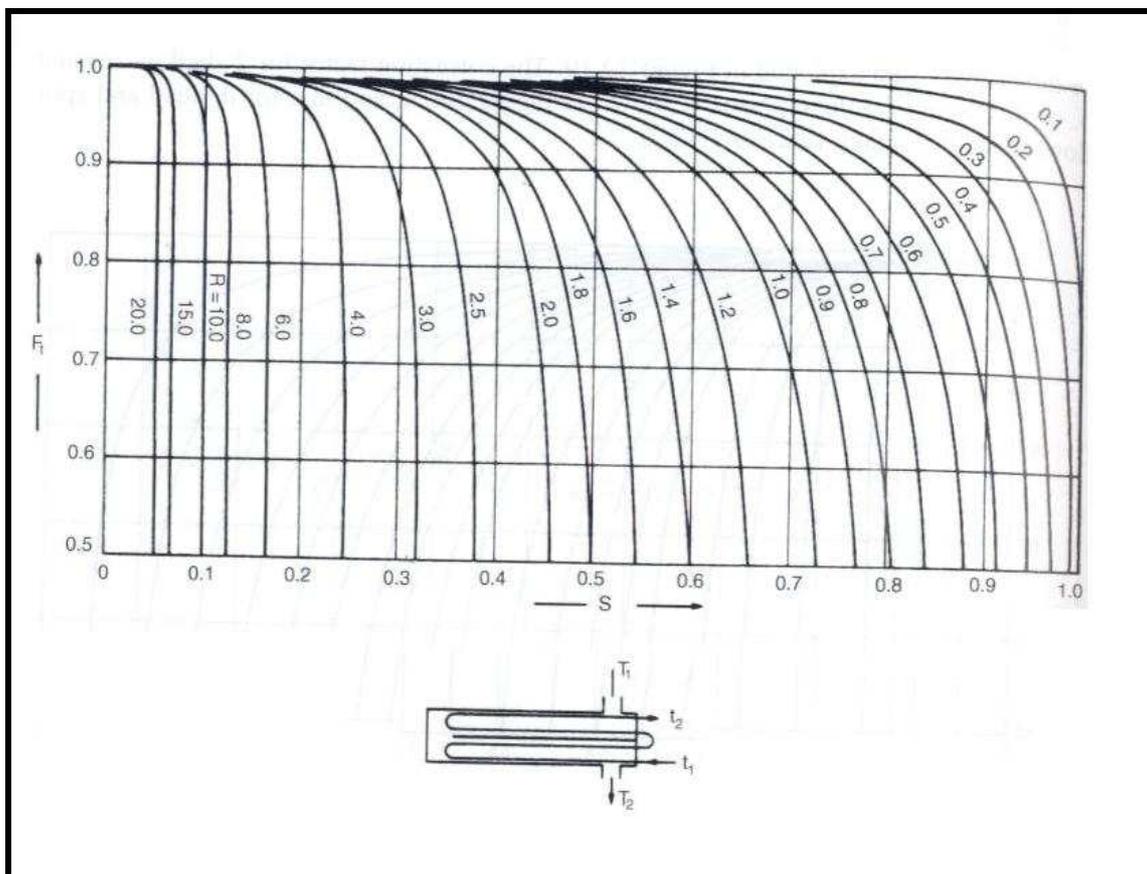
## Anexo 2.9: Tensión de diseño de la columna

Material	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	Design stress at temperature °C (N/mm <sup>2</sup> )									
		0 to 50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Carbon steel (semi-killed or silicon killed)	360	135	125	115	105	95	85	80	70		
Carbon-manganese steel (semi-killed or silicon killed)	460	180	170	150	140	130	115	105	100		
Carbon-molybdenum steel, 0.5 per cent Mo	450	180	170	145	140	130	120	110	110		
Low alloy steel (Ni, Cr, Mo, V)	550	240	240	240	240	240	235	230	220	190	170
Stainless steel 18Cr/8Ni unstabilised (304)	510	165	145	130	115	110	105	100	100	95	90
Stainless steel 18Cr/8Ni Ti stabilised (321)	540	165	150	140	135	130	130	125	120	120	115
Stainless steel 18Cr/8Ni Mo 2½ per cent (316)	520	175	150	135	120	115	110	105	105	100	95

## Anexo 2.10: Peso de las bocas de hombre

<b>BOCAS DE HOMBRE</b>	
<b>DIÁMETRO</b>	<b>PESO</b>
(in)	(Kg)
16	120
18	140
20	180
24	240

Anexo 3.1: Factor de corrección de la temperatura media logarítmica



Anexo 3.2: Tabla de valores de coeficientes globales (U)

Typical overall coefficients		
Shell and tube exchangers		
Hot fluid	Cold fluid	$U^*$ ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )
<i>Heat exchangers</i>		
Water	Water	800–1500
Organic solvents	Organic solvents	100–300
Light oils	Light oils	100–400
Heavy oils	Heavy oils	50–300
Gases	Gases	10–50
<i>Coolers</i>		
Organic solvents	Water	250–750
Light oils	Water	350–900
Heavy oils	Water	60–300
Gases	Water	20–300
Organic solvents	Brine	150–500
Water	Brine	600–1200
Gases	Brine	15–250
<i>Heaters</i>		
Steam	Water	1500–4000
Steam	Organic solvents	500–1000
Steam	Light oils	300–900
Steam	Heavy oils	60–450
Steam	Gases	30–300
Dowtherm	Heavy oils	50–300
Dowtherm	Gases	20–200
Flue gases	Steam	30–100
Flue	Hydrocarbon vapours	30–100
<i>Condensers</i>		
Aqueous vapours	Water	1000–1500
Organic vapours	Water	700–1000
Organics (some non-condensables)	Water	500–700
Vacuum condensers	Water	200–500
<i>Vaporisers</i>		
Steam	Aqueous solutions	1000–1500
Steam	Light organics	900–1200
Steam	Heavy organics	600–900
<b>Air-cooled exchangers</b>		
Process fluid		
Water		300–450
Light organics		300–700
Heavy organics		50–150
Gases, 5–10 bar		50–100
10–30 bar		100–300
Condensing hydrocarbons		300–600
<b>Immersed coils</b>		
Coil		
Pool		
<i>Natural circulation</i>		
Steam	Dilute aqueous solutions	500–1000
Steam	Light oils	200–300
Steam	Heavy oils	70–150
Water	Aqueous solutions	200–500
Water	Light oils	100–150

Anexo 3.3: Elección del diámetro de carcasa y el número de tubos

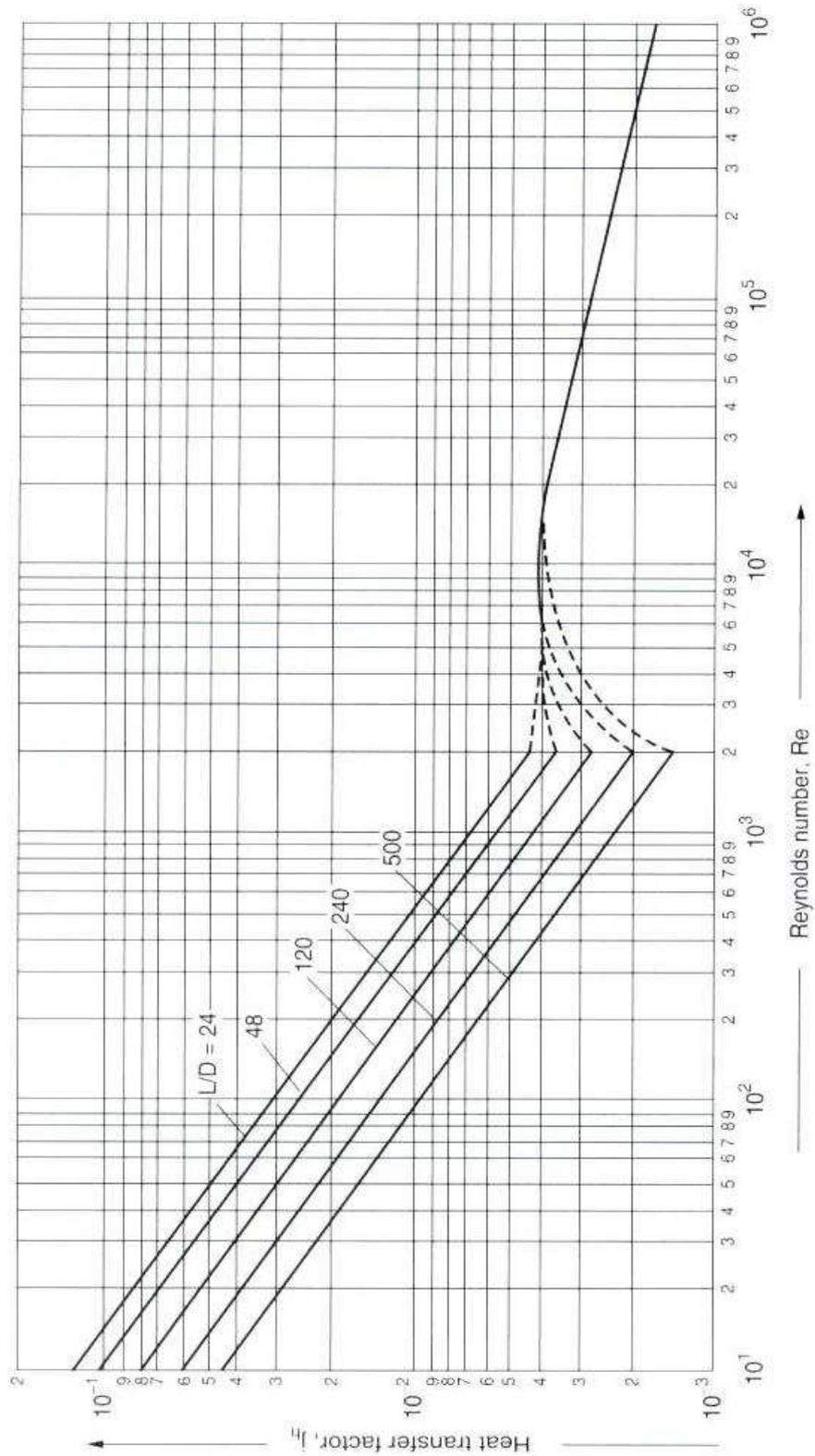
Size (Inches)	NUMBER OF PASSES					Net Free Distance 2 Passes	Rows Across
	1	2	4	6	8		
8	32	32	26	24	24	3.50	6
10	40	32	48	48	48	4.13	8
12	48	82	78	72	72	4.59	11
14	104	96	92	88	88	6.00	11
16	140	136	128	120	120	6.50	14
18	185	180	172	168	164	6.88	18
20	241	230	224	212	212	7.38	17
22	300	280	280	208	208	7.75	20
24	340	350	336	332	322	8.25	21
26	424	412	402	392	392	8.75	23
28	462	488	480	472	472	9.25	25
30	560	560	540	548	548	9.75	27
32	665	648	644	628	628	10.00	29
34	736	768	730	728	728	10.10	31
36	855	848	832	810	810	11.00	33
38	873	950	938	932	932	12.10	35
40	1085	1084	1052	1036	1036	12.69	37
42	1201	1176	1162	1148	1148	13.18	39

Size (Inches)	NUMBER OF PASSES					Net Free Distance 2 Passes	Rows Across
	1	2	4	6	8		
8	21	16	16	.....	.....	4.13	6
10	37	32	32	32	.....	4.25	8
12	48	52	48	48	48	4.25	8
14	61	60	60	52	52	5.50	10
16	80	81	80	76	76	5.50	11
20	113	112	112	108	108	5.38	13
22	148	148	140	136	136	5.38	14
24	184	178	172	158	164	7.38	17
26	221	220	212	208	208	7.38	19
28	260	260	258	252	252	7.38	19
30	316	308	304	292	302	7.38	20
32	368	360	352	344	340	9.38	21
34	421	410	402	392	392	9.38	23
36	481	472	464	452	452	9.69	21
38	545	540	532	524	524	9.69	26
40	608	608	586	588	588	9.89	28
42	690	680	656	664	660	9.89	29
42	750	738	728	728	728	11.69	31

Size (Inches)	NUMBER OF PASSES					Net Free Distance 2 Passes	Rows Across
	1	2	4	6	8		
8	37	30	26	26	24	4.13	11
10	61	56	52	46	44	4.88	17
12	92	90	86	78	72	4.38	21
14	121	110	102	98	92	5.50	21
16	163	152	146	140	132	6.25	25
18	212	202	194	188	184	5.88	29
20	269	260	256	240	236	7.38	39
22	337	330	314	300	296	8.00	47
24	421	404	380	378	364	8.88	47
26	499	470	460	450	440	10.00	53
28	579	562	542	538	520	11.00	57
30	688	648	636	624	612	10.33	61
32	766	744	732	714	712	11.39	67
34	870	850	834	828	808	12.13	71
36	989	978	942	932	920	12.75	75
38	1108	1100	1060	1050	1030	13.25	77
40	1230	1228	1200	1190	1164	13.25	77
42	1367	1350	1322	1306	1288	13.25	77

Size (Inches)	NUMBER OF PASSES					Net Free Distance 2 Passes	Rows Across
	1	2	4	6	8		
8	23	20	16	16	12	4.13	9
10	38	30	32	32	28	4.50	13
12	50	52	48	46	41	4.63	15
14	73	68	60	58	50	4.25	19
16	97	98	88	82	80	4.25	21
18	130	126	118	114	112	6.50	25
20	170	164	162	150	144	6.75	27
22	212	202	190	188	184	7.00	31
24	258	250	242	232	228	7.25	33
26	304	302	286	278	272	7.50	37
28	361	348	338	330	324	7.75	39
30	421	408	400	394	388	8.00	43
32	482	472	450	448	440	8.25	47
34	555	538	524	520	500	11.00	49
36	625	618	592	588	572	10.44	61
38	700	688	672	660	640	10.50	55
40	786	776	752	742	736	11.00	59
42	872	850	834	824	816	11.32	61

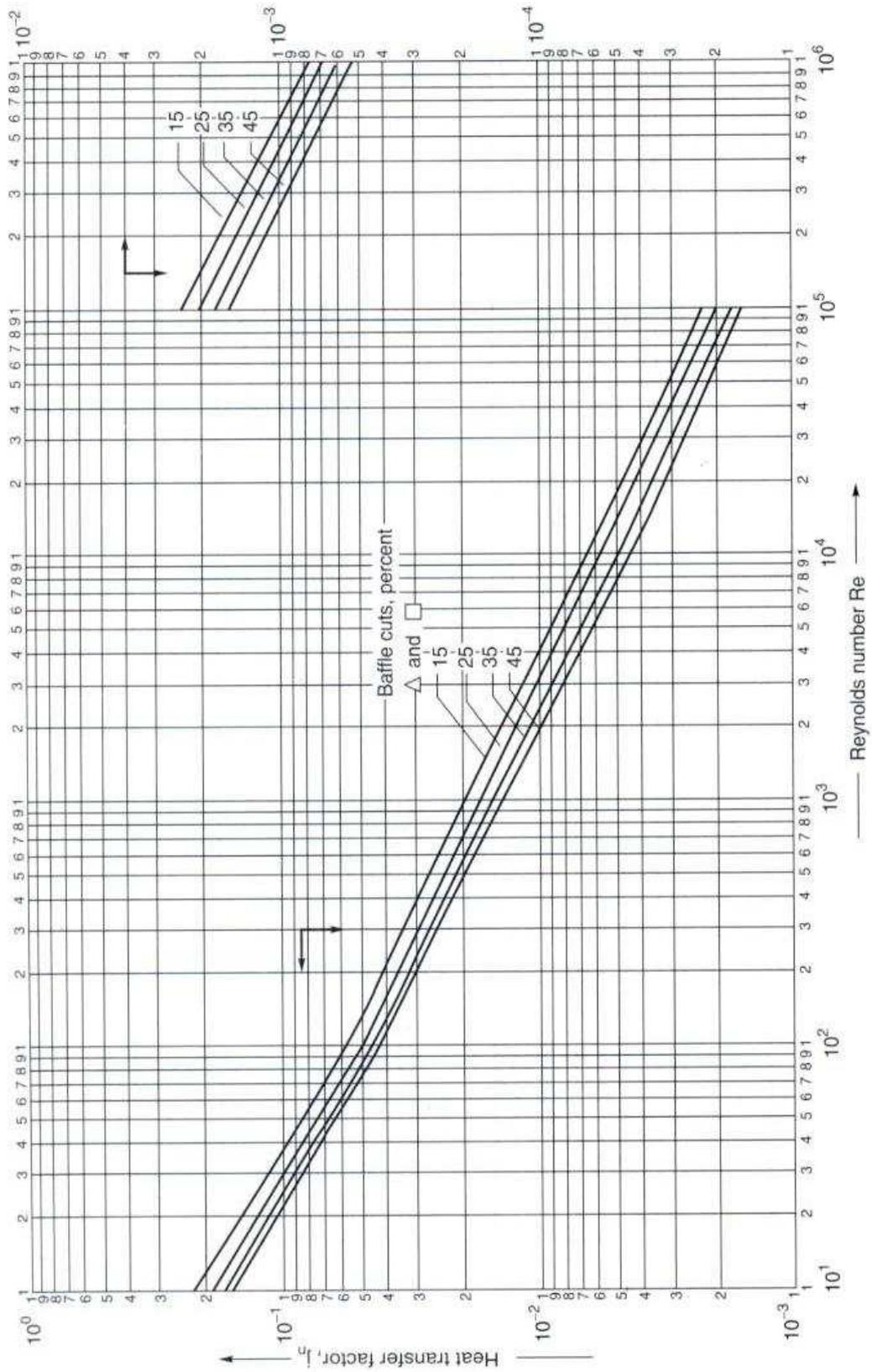
Anexo 3.4: Factor de transferencia de calor en el lado de tubos



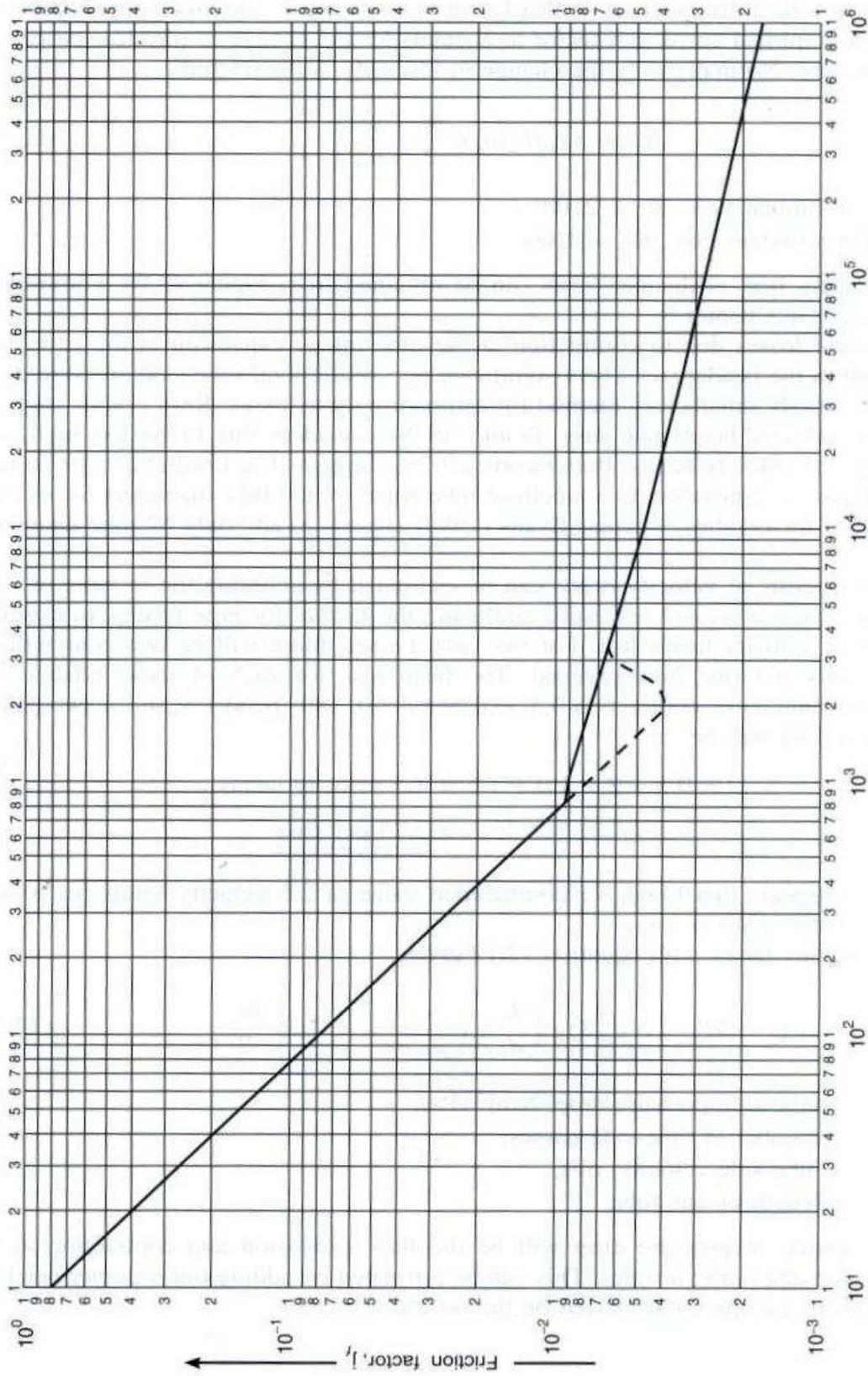
Anexo 3.5: Valores de  $K_i$  y  $n_i$  en el cálculo del diámetro de haz tubular

Triangular pitch, $p_t = 1.25d_o$					
No. passes	1	2	4	6	8
$K_1$	0.319	0.249	0.175	0.0743	0.0365
$n_1$	2.142	2.207	2.285	2.499	2.675
Square pitch, $p_t = 1.25d_o$					
No. passes	1	2	4	6	8
$K_1$	0.215	0.156	0.158	0.0402	0.0331
$n_1$	2.207	2.291	2.263	2.617	2.643

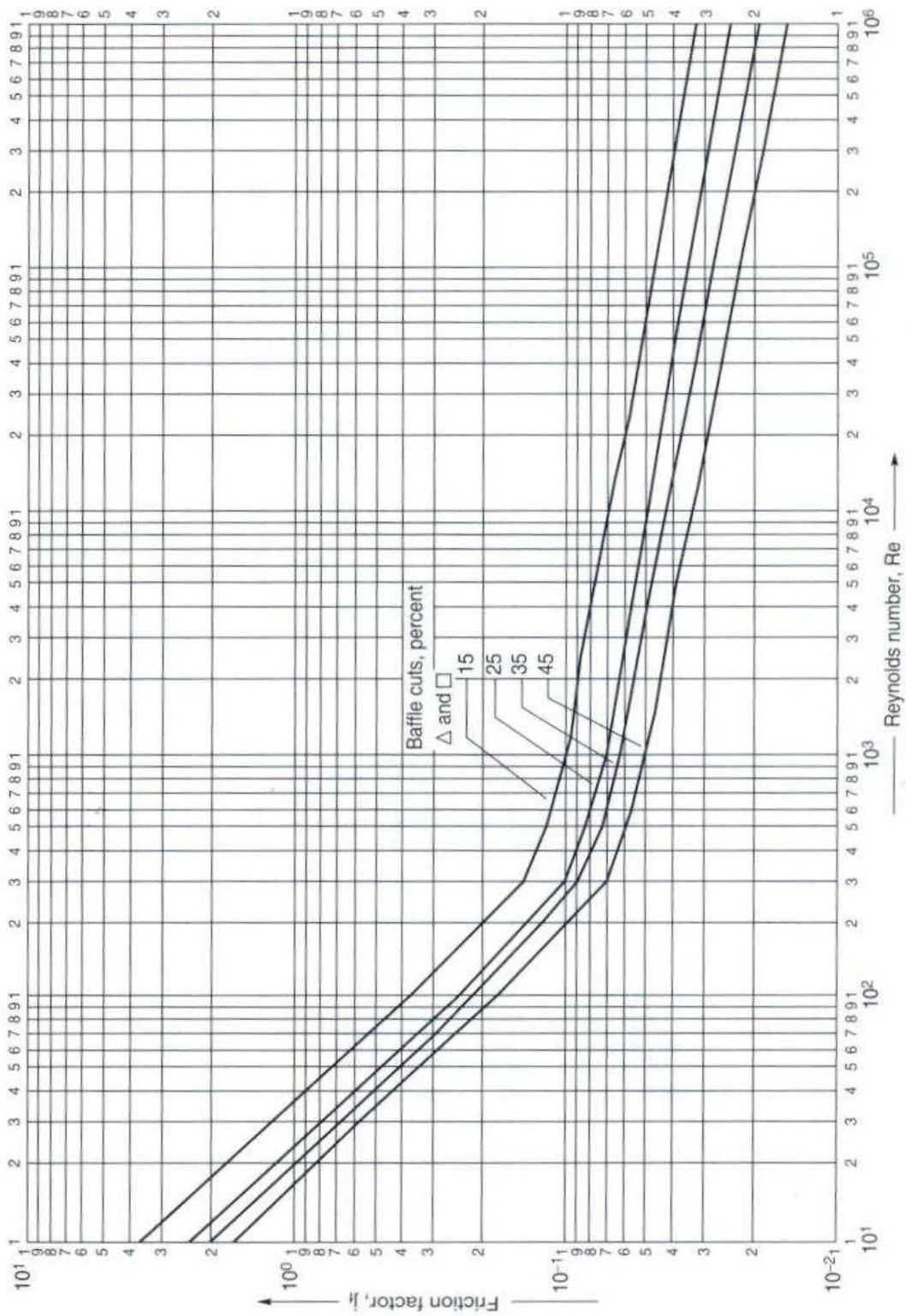
Anexo 3.6: Factor de transferencia de calor en el lado de carcasa



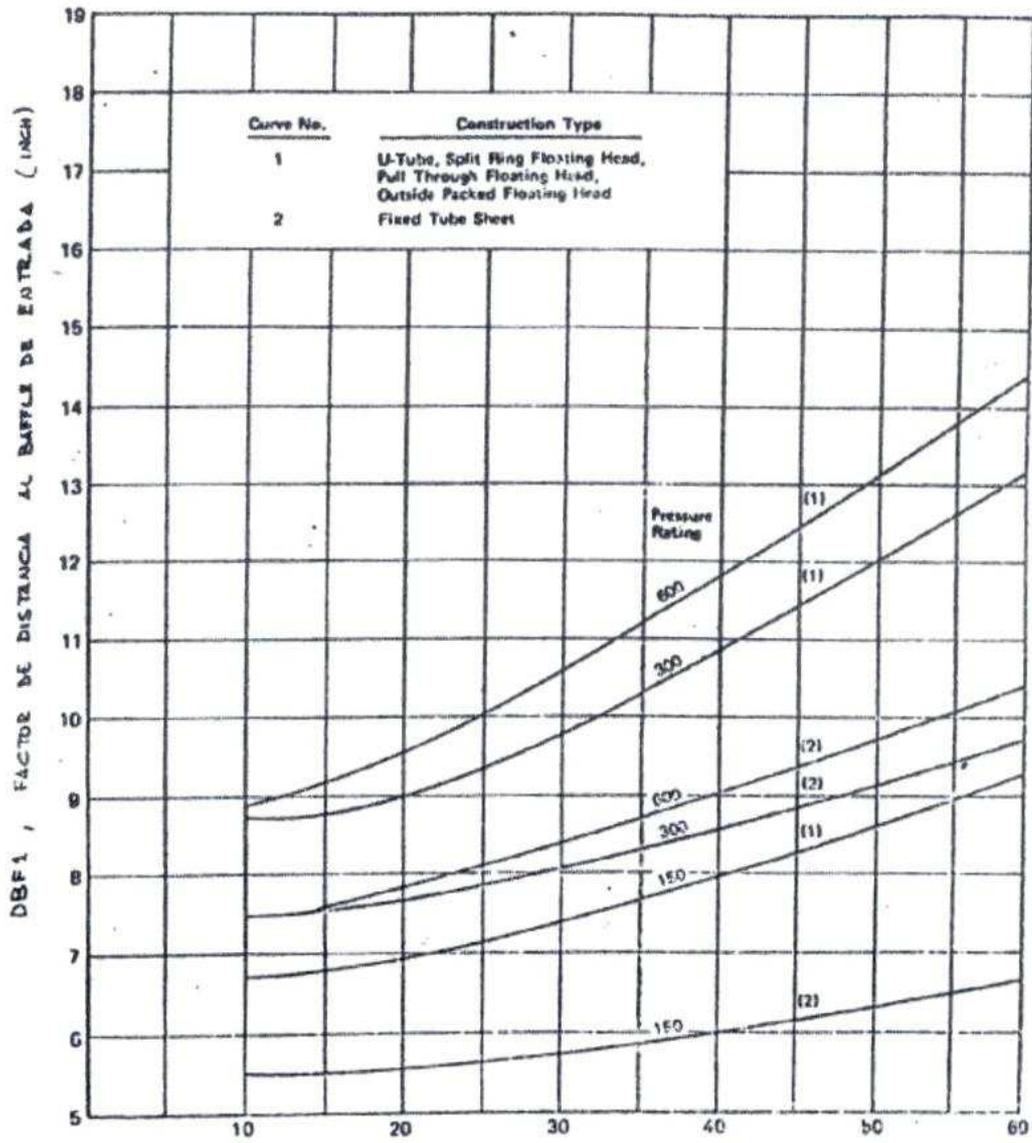
Anexo 3.7: Factor de fricción en el lado de tubos



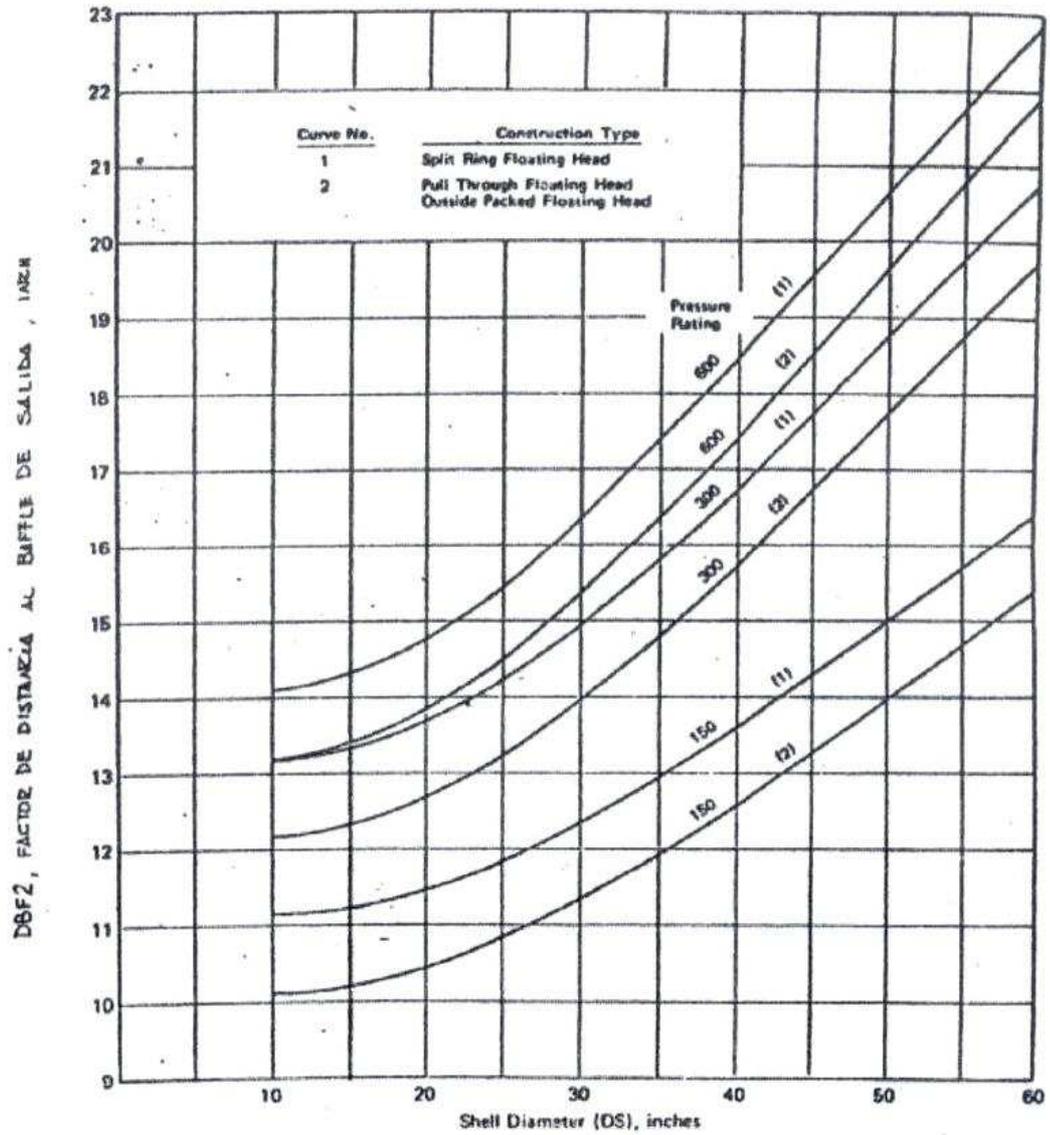
Anexo 3.8: Factor de fricción en el lado de carcasa



Anexo 3.9: Distancia del baffle de entrada (D1)



Anexo 3.10: Distancia del baffle de salida (D2)



## Anexo 4.1: Propiedades del vapor de agua

Propiedades del vapor saturado: tabla de temperaturas<sup>a</sup>

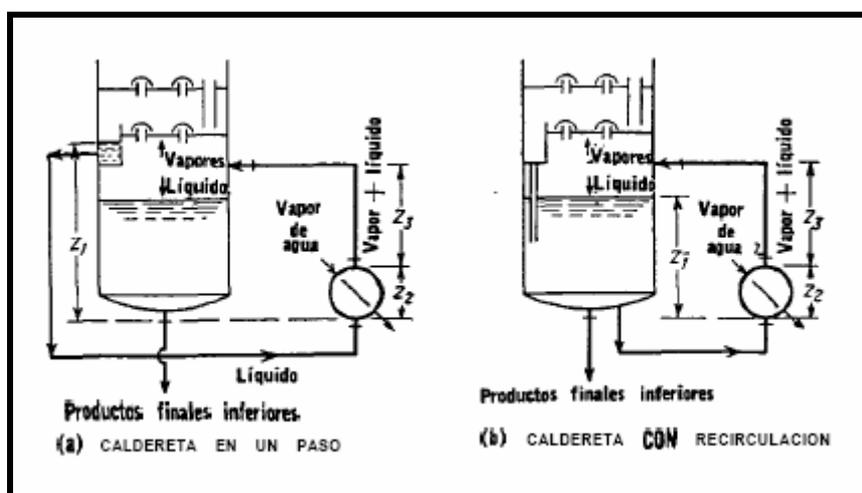
T(°C)	P(bar)	$\hat{V}$ (m <sup>3</sup> /kg)		$\hat{U}$ (kJ/kg)		$\hat{H}$ (kJ/kg)		
		Agua	Vapor	Agua	Vapor	Agua	Evaporación	Vapor
0.01	0.00611	0.001000	206.2	zero	2375.6	+0.0	2501.6	2501.6
2	0.00705	0.001000	179.9	8.4	2378.3	8.4	2496.8	2505.2
4	0.00813	0.001000	157.3	16.8	2381.1	16.8	2492.1	2508.9
6	0.00935	0.001000	137.8	25.2	2383.8	25.2	2487.4	2512.6
8	0.01072	0.001000	121.0	33.6	2386.6	33.6	2482.6	2516.2
10	0.01227	0.001000	106.4	42.0	2389.3	42.0	2477.9	2519.9
12	0.01401	0.001000	93.8	50.4	2392.1	50.4	2473.2	2523.6
14	0.01597	0.001001	82.9	58.8	2394.8	58.8	2468.5	2527.2
16	0.01817	0.001001	73.4	67.1	2397.6	67.1	2463.8	2530.9
18	0.02062	0.001001	65.1	75.5	2400.3	75.5	2459.0	2534.5
20	0.0234	0.001002	57.8	83.9	2403.0	83.9	2454.3	2538.2
22	0.0264	0.001002	51.5	92.2	2405.8	92.2	2449.6	2541.8
24	0.0298	0.001003	45.9	100.6	2408.5	100.6	2444.9	2545.5
25	0.0317	0.001003	43.4	104.8	2409.9	104.8	2442.5	2547.3
26	0.0336	0.001003	41.0	108.9	2411.2	108.9	2440.2	2549.1
28	0.0378	0.001004	36.7	117.3	2414.0	117.3	2435.4	2552.7
30	0.0424	0.001004	32.9	125.7	2416.7	125.7	2430.7	2556.4
32	0.0475	0.001005	29.6	134.0	2419.4	134.0	2425.9	2560.0
34	0.0532	0.001006	26.6	142.4	2422.1	142.4	2421.2	2563.6
36	0.0594	0.001006	24.0	150.7	2424.8	150.7	2416.4	2567.2
38	0.0662	0.001007	21.6	159.1	2427.5	159.1	2411.7	2570.8
40	0.0738	0.001008	19.55	167.4	2430.2	167.5	2406.9	2574.4
42	0.0820	0.001009	17.69	175.8	2432.9	175.8	2402.1	2577.9
44	0.0910	0.001009	16.04	184.2	2435.6	184.2	2397.3	2581.5
46	0.1009	0.001010	14.56	192.5	2438.3	192.5	2392.5	2585.1
48	0.1116	0.001011	13.23	200.9	2440.9	200.9	2387.7	2588.6
50	0.1234	0.001012	12.05	209.2	2443.6	209.3	2382.9	2592.2
52	0.1361	0.001013	10.98	217.7	2446	217.7	2377	2595
54	0.1500	0.001014	10.02	226.0	2449	226.0	2373	2599
56	0.1651	0.001015	9.158	234.4	2451	234.4	2368	2602
58	0.1815	0.001016	8.380	242.8	2454	242.8	2363	2606
60	0.1992	0.001017	7.678	251.1	2456	251.1	2358	2609
62	0.2184	0.001018	7.043	259.5	2459	259.5	2353	2613
64	0.2391	0.001019	6.468	267.9	2461	267.9	2348	2616
66	0.2615	0.001020	5.947	276.2	2464	276.2	2343	2619
68	0.2856	0.001022	5.475	284.6	2467	284.6	2338	2623
70	0.3117	0.001023	5.045	293.0	2469	293.0	2333	2626
72	0.3396	0.001024	4.655	301.4	2472	301.4	2329	2630
74	0.3696	0.001025	4.299	309.8	2474	309.8	2323	2633
76	0.4019	0.001026	3.975	318.2	2476	318.2	2318	2636
78	0.4365	0.001028	3.679	326.4	2479	326.4	2313	2639
80	0.4736	0.001029	3.408	334.8	2482	334.9	2308	2643
82	0.5133	0.001030	3.161	343.2	2484	343.3	2303	2646
84	0.5558	0.001032	2.934	351.6	2487	351.7	2298	2650
86	0.6011	0.001033	2.727	360.0	2489	360.1	2293	2653
88	0.6495	0.001034	2.536	368.4	2491	368.5	2288	2656
90	0.7011	0.001036	2.361	376.9	2493	377.0	2282	2659
92	0.7560	0.001037	2.200	385.3	2496	385.4	2277	2662
94	0.8145	0.001039	2.052	393.7	2499	393.8	2272	2666
96	0.8767	0.001040	1.915	402.1	2501	402.2	2267	2669
98	0.9429	0.001042	1.789	410.6	2504	410.7	2262	2673
100	1.0131	0.001044	1.673	419.0	2507	419.1	2257	2676
102	1.0876	0.001045	1.566	427.1	2509	427.5	2251	2679

<sup>a</sup> De R. W. Haywood, *Thermodynamic Tables in SI (Metric) Units*, Cambridge University Press, Londres, 1968,  $\hat{V}$  = volumen específico,  $\hat{U}$  = energía interna específica, y  $\hat{H}$  = entalpía específica.  
Nota: kJ/kg  $\times$  0.4303 = Btu/lb<sub>m</sub>.

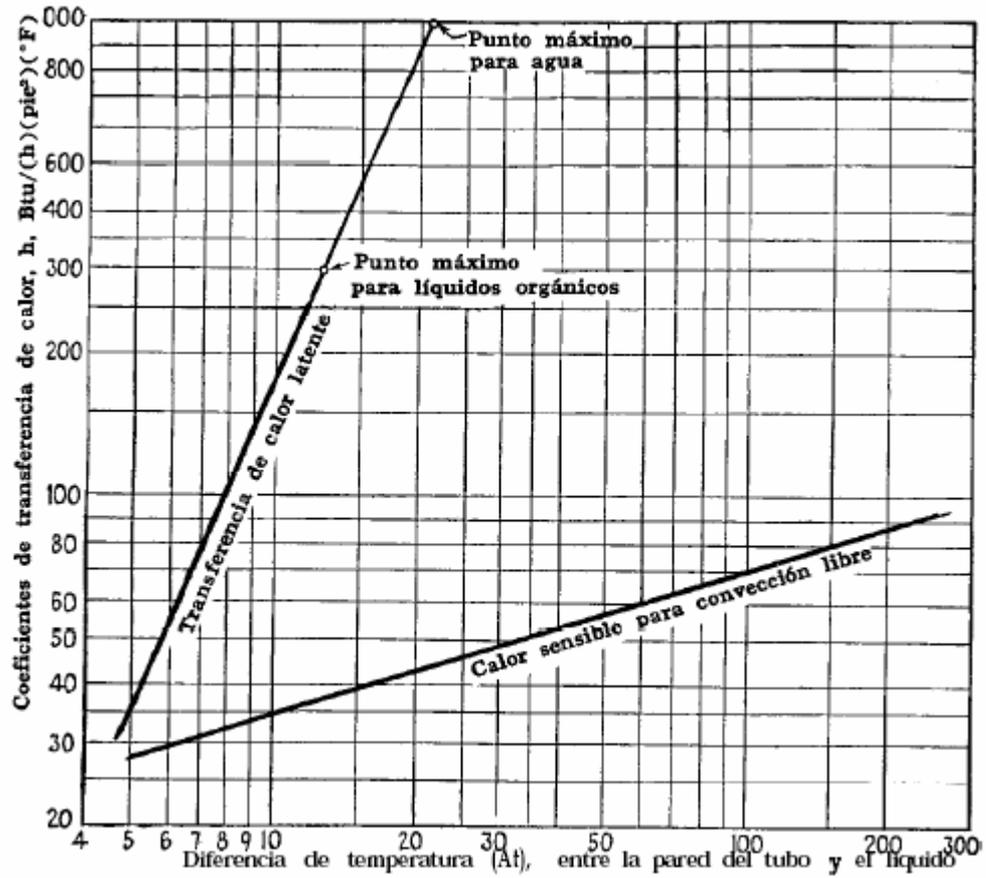
Anexo 4.2: Diámetro de carcasa y número de tubos del reboiler

Heat Exchanger Tube Sheet Layout Count Table																		
37	35	33	31	29	27	25	23¼	21¼	19¼	17¼	15¼	13¼	12	10	8	I.D. of Shell (in.)		
1269	1143	1019	881	763	663	553	481	391	307	247	193	135	105	69	33	¾" on 1½" Δ	Fixed Tubes	One-Pass
1127	1007	889	765	667	577	493	423	343	277	217	157	117	91	57	33	¾" on 1" Δ		
965	865	765	665	587	495	419	355	287	235	183	139	101	85	53	33	¾" on 1" □		
699	633	551	481	427	361	307	247	205	163	133	103	73	57	33	15	1" on 1¼" Δ		
595	545	477	413	359	303	255	215	179	139	111	83	65	45	33	17	1" on 1¼" □		
1242	1088	964	846	734	626	528	452	370	300	228	166	124	94	58	32	¾" on 1½" Δ	Fixed Tubes	Two-Pass
1088	972	858	746	646	556	468	398	326	264	208	154	110	90	56	28	¾" on 1" Δ		
946	840	746	644	560	486	408	346	280	222	172	126	94	78	48	26	¾" on 1" □		
688	608	530	462	410	346	292	244	204	162	126	92	62	52	32	16	1" on 1¼" Δ		
584	522	460	402	348	298	248	218	172	136	106	76	56	40	26	12	1" on 1¼" □		
1126	1008	882	768	648	558	460	398	304	234	180	134	94	64	34	8	¾" on 1½" Δ	U Tubes?	Two-Pass
1000	882	772	674	566	484	406	336	270	212	158	108	72	60	26	8	¾" on 1" Δ		
884	778	688	586	506	436	362	304	242	188	142	100	72	52	30	12	¾" on 1" □		
610	532	466	396	340	284	234	192	154	120	84	58	42	26	8	XX	1" on 1¼" Δ		
526	464	406	356	304	256	214	180	134	100	76	58	38	22	12	XX	1" on 1¼" □		
1172	1024	904	788	680	576	484	412	332	266	196	154	108	84	48	XX	¾" on 1½" Δ	Fixed Tubes	Four-Pass
1024	912	802	692	596	508	424	360	292	232	180	134	96	72	44	XX	¾" on 1" Δ		
880	778	688	590	510	440	366	308	242	192	142	126	88	72	48	XX	¾" on 1" □		
638	560	486	422	368	308	258	212	176	138	104	78	60	44	24	XX	1" on 1¼" Δ		
534	476	414	360	310	260	214	188	142	110	84	74	48	40	24	XX	1" on 1¼" □		
1092	976	852	740	622	534	438	378	286	218	166	122	84	56	28	XX	¾" on 1½" Δ	U Tubes?	Two-Pass
968	852	744	648	542	462	386	318	254	198	146	98	64	52	20	XX	¾" on 1" Δ		
852	748	660	560	482	414	342	286	226	174	130	90	64	44	24	XX	¾" on 1" □		
584	508	444	376	322	266	218	178	142	110	74	50	36	20	XX	XX	1" on 1¼" Δ		
500	440	384	336	286	238	198	166	122	90	66	50	32	16	XX	XX	1" on 1¼" □		
1106	964	844	732	632	532	440	372	294	230	174	116	80	XX	XX	XX	¾" on 1½" Δ	Fixed Tubes	Six-Pass
964	852	744	640	548	464	388	322	258	202	156	104	66	XX	XX	XX	¾" on 1" Δ		
818	724	634	536	460	394	324	266	212	158	116	78	54	XX	XX	XX	¾" on 1" □		
586	514	442	382	338	274	226	182	150	112	82	56	34	XX	XX	XX	1" on 1¼" Δ		
484	430	368	318	268	226	184	154	116	88	66	44	XX	XX	XX	XX	1" on 1¼" □		
1058	944	826	716	596	510	416	358	272	206	156	110	74	XX	XX	XX	¾" on 1½" Δ	U Tubes?	Two-Pass
940	826	720	626	518	440	366	300	238	184	134	88	56	XX	XX	XX	¾" on 1" Δ		
820	718	632	534	458	392	322	268	210	160	118	80	56	XX	XX	XX	¾" on 1" □		
562	488	426	356	304	252	206	168	130	100	68	42	30	XX	XX	XX	1" on 1¼" Δ		
478	420	362	316	268	224	182	152	110	80	60	42	XX	XX	XX	XX	1" on 1¼" □		
1040	902	790	682	576	484	398	332	258	198	140	94	XX	XX	XX	XX	¾" on 1½" Δ	Fixed Tubes	Eight-Pass
902	798	694	588	496	422	344	286	224	170	124	82	XX	XX	XX	XX	¾" on 1" Δ		
760	662	576	490	414	352	286	228	174	132	94	XX	XX	XX	XX	XX	¾" on 1" □		
542	466	400	342	298	240	190	154	120	90	66	XX	XX	XX	XX	XX	1" on 1¼" Δ		
438	388	334	280	230	192	150	128	94	74	XX	XX	XX	XX	XX	XX	1" on 1¼" □		
1032	916	796	688	578	490	398	342	254	190	142	102	68	XX	XX	XX	¾" on 1½" Δ	U Tubes?	Two-Pass
908	796	692	600	498	422	350	286	226	170	122	82	52	XX	XX	XX	¾" on 1" Δ		
792	692	608	512	438	374	306	254	194	146	106	70	48	XX	XX	XX	¾" on 1" □		
540	464	404	340	290	238	190	154	118	90	58	38	24	XX	XX	XX	1" on 1¼" Δ		
456	396	344	300	254	206	170	142	98	70	50	34	XX	XX	XX	XX	1" on 1¼" □		
<b>37</b>	<b>35</b>	<b>33</b>	<b>31</b>	<b>29</b>	<b>27</b>	<b>25</b>	<b>23¼</b>	<b>21¼</b>	<b>19¼</b>	<b>17¼</b>	<b>15¼</b>	<b>13¼</b>	<b>12</b>	<b>10</b>	<b>8</b>	<b>I.D. of Shell (in.)</b>		

Anexo 4.3: Configuración del reboiler



Anexo 4.4: Valor de las entalpías  $h_s$  y  $h_{vap}$



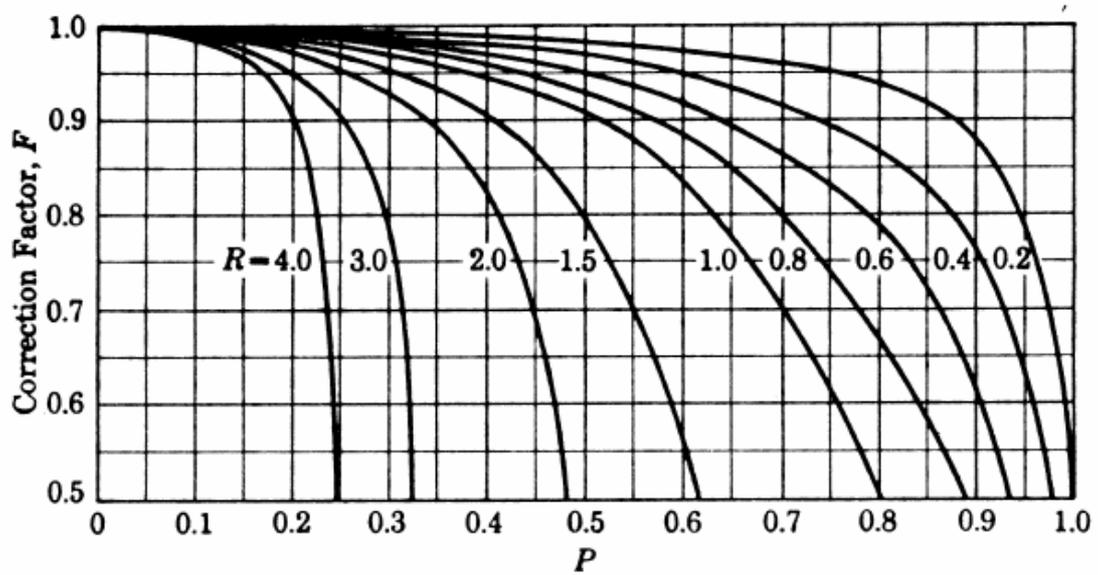
Anexo 5.1: (a) Datos de entalpía del líquido y el vapor

Compuesto	Fórmula	Masa Molar	PE (20°/4°)	T <sub>m</sub> (°C) <sup>b</sup>	ΔH <sub>m</sub> (T <sub>m</sub> ) <sup>c,j</sup> kJ/mol	T <sub>b</sub> (°C) <sup>d</sup>	ΔH <sub>v</sub> (T <sub>b</sub> ) <sup>e,j</sup> kJ/mol	T <sub>c</sub> (K) <sup>f</sup>	P <sub>c</sub> (atm) <sup>g</sup>	(ΔH <sub>v</sub> ) <sup>h,j</sup> kJ/mol	(ΔH <sub>g</sub> ) <sup>i,j</sup> kJ/mol
Acetaldehído	CH <sub>3</sub> CHO	44.05	0.783 <sup>1*</sup>	-123.7	—	20.2	25.1	461.0	—	-166.2(g)	-1192.4(g)
Acetato de etilo	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	88.10	0.901	-83.8	—	77.0	—	523.1	37.8	-163.2(l) -426.8(g)	-2246.4(l)
Acetato de metilo	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	74.08	0.933	-98.9	—	57.1	—	506.7	46.30	-409.4(l)	-1595(l)
Acetileno	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	26.04	—	—	—	81.5	17.6	309.5	61.6	+226.75(g)	-1299.6(g)
Acetona	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	58.08	0.791	-95.0	5.69	56.0	30.2	508.0	47.0	-248.2(l) -216.7(g)	-1785.7(l) -1821.4(g)
Ácido acético	CH <sub>3</sub> COOH	60.05	1.049	16.6	12.09	118.2	24.39	594.8	57.1	-486.18(l) -438.15(g)	-871.69(l) -919.73(g)
Ácido benzoico	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	122.12	1.266 <sup>1*</sup>	122.2	—	249.8	—	—	—	—	-3726.7(g)
Ácido fórmico	CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	46.03	1.220	8.30	12.68	100.5	22.5	—	—	-409.2(l) -362.6(g)	-262.8(l)
Ácido fosfórico	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	98.00	1.384 <sup>1*</sup>	42.3	10.54	(-1/2 H <sub>2</sub> O a 213°C)	—	—	—	-1481.1(c) -1278.6(aq, 1H <sub>2</sub> O)	—
Ácido nítrico	HNO <sub>3</sub>	63.02	1.502	-41.06	10.47	86	30.30	—	—	173.73(l) 206.57(aq)	—
Ácido oxálico	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	90.04	1.90	—	—	Se descompone a 186°C	—	—	—	-226.8(c)	-251.9(s)
Ácido sulfúrico	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	98.08	1.834 <sup>1*</sup>	10.35	9.87	Se descompone a 340°C	—	—	—	-811.32(l) -907.51(aq)	—
Agua	H <sub>2</sub> O	18.16	1.00 <sup>4*</sup>	0.00	6.0095	100.00	40.655	647.4	216.3	-285.84(l) -241.83(g)	—
Alcohol bencílico	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	108.13	1.045	-15.4	—	205.2	—	—	—	—	-3741.8(l)
Alcohol etílico (etanol)	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	46.07	0.789	-114.6	5.021	78.5	38.58	516.3	63.0	-277.63(l) -235.31(g)	-1366.91(l) -1409.25(g)
Alcohol isopropílico	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O *	60.09	0.785	-89.7	—	82.24	—	508.8	53.0	310.9(l)	-1986.6(l)
Alcohol metílico (metanol)	CH <sub>3</sub> OH	32.04	0.792	-97.9	3.167	64.7	35.27	513.20	78.50	-238.6(l) -201.2(g)	-726.6(l) -764.0(g)
Alcohol n-propílico	C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> OH	60.09	0.804	-127	—	97.04	—	536.7	49.95	-300.50(l) -260.04(g)	-2063.6(g)
Amoniaco	NH <sub>3</sub>	17.03	—	-77.8	5.635	-33.43	23.351	405.5	111.3	-67.20(l) -46.19(g)	-382.58(g)
Anilina	C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> N	93.12	1.022	-6.3	—	184.2	—	699	52.4	—	—
Azufre (monoclinico)	S <sub>2</sub>	256.53	1.96	119	14.17	444.6	83.7	—	—	+0.30(c)	—
Azufre (rómboico)	S <sub>8</sub>	256.53	2.07	113	10.04	444.6	83.7	—	—	0(c)	—
Benceno	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78.11	0.879	5.53	9.837	80.10	30.765	562.6	48.6	+48.66(l) +82.92(g)	-3267.6(l) -3301.5(g)
Benzaldehído	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CHO	106.12	1.046	-26.0	—	179.0	38.40	—	—	-88.85(l) -40.04(g)	-3520.0(l)
Bicarbonato de sodio	NaHCO <sub>3</sub>	84.01	2.20	—	—	Se descompone a 270°C	—	—	—	945.6(c)	—
Bisulfato de sodio	NaHSO <sub>4</sub>	120.07	2.742	—	—	—	—	—	—	-1126.3(c)	—
Bromo	Br <sub>2</sub>	159.83	3.119	-7.1	10.8	58.6	31.0	584	102	—	—
Bromuro de etilo	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Br	108.98	1.460	-119.1	—	38.2	—	504	61.5	54.4	—
Bromuro de hidrógeno	HBr	80.92	—	-86	—	-67	—	—	—	-36.23(g)	—
1,2-butadieno	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	54.09	—	136.5	—	10.1	—	446	—	—	—
1,3-butadieno	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	54.09	—	-109.1	—	-4.6	—	425	42.7	—	—
n-butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.12	—	-138.3	4.661	-0.6	22.305	425.17	37.47	-147.9(l) -124.7(g)	-2855.6(l) -2878.5(g)
1-buteno	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56.10	—	185.3	3.8480	-6.25	21.916	419.6	39.7	+1.17(g)	-2718.6(g)
Carbonato de calcio	CaCO <sub>3</sub>	100.9	—	—	—	Se descompone a 825°C	—	—	—	-1206.9(c)	—
Carbonato de sodio	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	2.533	—	—	—	Se descompone a 854°C	—	—	—	-1130.99(c)	—
Carbono (grafito)	C	12.010	2.26	3600	46.0	4200	—	—	—	0(c)	-393.51(c)
Carburo de calcio	CaC <sub>2</sub>	64.10	2.22 <sup>1*</sup>	2300	—	—	—	—	—	-62.70(c)	—
Cianuro de hidrógeno	HCN	27.03	—	-14	—	-26	—	—	—	+130.54(g)	—
Cianuro de sodio	NaCN	49.01	—	562	16.7	1497	155	—	—	-89.79(c)	—
Ciclohexano	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	84.16	0.779	6.7	2.677	80.7	30.1	553.7	40.4	-156.2(c) 123.1(g)	-3919.9(l) -3953.0(g)
Ciclopentano	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	70.13	0.745	-93.4	0.609	49.3	27.30	511.8	44.55	-105.9(l) -77.2(g)	-3290.9(l) -3319.5(g)
Cloro	Cl <sub>2</sub>	70.91	—	101.00	6.406	-34.06	20.4	417.0	76.1	0(g)	—
Clorobeneno	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Cl	112.56	1.107	-45	—	132.10	36.5	632.4	44.6	—	—
Cloroetano	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Cl	—	—	—	—	—	—	536.0	54.0	-131.8(l)	-379(l)
Cloroformo	CHCl <sub>3</sub>	119.39	1.489	-63.7	—	61.0	—	—	—	794.96(c)	—
Cloruro de calcio	CaCl <sub>2</sub>	110.99	2.152 <sup>1*</sup>	782	28.37	1600	—	—	—	—	—
Cloruro de etilo	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Cl	64.52	0.903 <sup>1*</sup>	-138.3	4.452	13.1	24.7	460.4	52.0	-105.0(g)	—
Cloruro de hidrógeno	HCl	36.47	—	-114.2	1.99	-85.0	16.1	324.6	61.5	54.51(g)	—
Cloruro de magnesio	MgCl <sub>2</sub>	95.23	2.325 <sup>1*</sup>	714	43.1	1418	136.8	—	—	-641.8(g)	—
Cloruro de metilo	CH <sub>3</sub> Cl	50.49	—	-97.9	—	-24	—	416.1	65.87	-81.92(g)	—

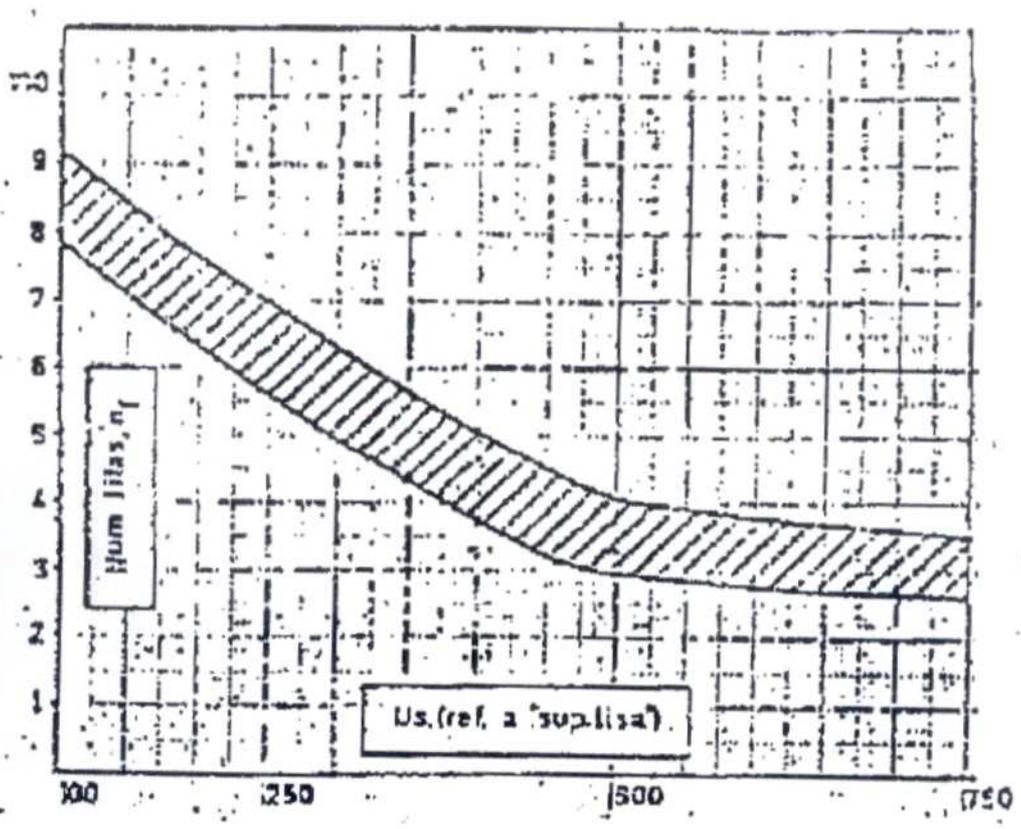
Anexo 5.1: (b) Datos de entalpía del líquido y el vapor

Compuesto	Fórmula	Masa Molar	PE (20°/4°) T <sub>m</sub> (°C) <sup>b</sup>	$\Delta \hat{H}_m(T_m)^{*,j}$		$\Delta \hat{H}_v(T_b)^{*,j}$			P <sub>c</sub> (atm) <sup>f</sup>	$(\Delta \hat{H}_f^*)^{h,j}$	$(\Delta \hat{H}_g^*)^{h,j}$
				kJ/mol	T <sub>b</sub> (°C) <sup>d</sup>	kJ/mol	T <sub>c</sub> (K) <sup>e</sup>	kJ/mol			
Plomo	Pb	207.21	11.337 <sup>20°/20°</sup>	327.4	5.10	1750	179.9	—	—	0(c)	—
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44.09	—	-187.69	3.52	-42.07	18.77	369.9	42.0	-119.8(l) -103.8(g)	-2204.0(l) -2220.0(g)
n-Propil benceno	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	120.19	0.862	-99.50	8.54	159.2	38.24	638.7	31.3	-38.40(l) +7.82(g)	-5218.2(l) -5264.48(g)
Propileno	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	42.08	—	-185.2	3.00	-47.70	18.42	365.1	45.4	+20.41(g)	-2058.4(g)
Silicato de calcio	CaSiO <sub>3</sub>	116.17	2.915	1530	48.62	—	—	—	—	-1584(c)	—
Sulfato cúprico	CuSO <sub>4</sub>	159.61	3.606 <sup>18*</sup>	Se descompone > 600°C				—	—	-769.9(c) -843.1(aq)	—
Sulfato de amonio	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	132.14	1.769	513	—	Se descompone a 513°C después de fundirse			—	-1179.3(c) -1173.1(aq)	—
Sulfato de calcio	CaSO <sub>4</sub>	136.15	2.96	—	—	—	—	—	—	-1432.7(c) -1450.4(aq)	—
Sulfato de calcio (cal)	CaSO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	172.18	2.32	(-1.5 · H <sub>2</sub> O a 128°C)			—	—	—	-2021(c)	—
Sulfato de sodio	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	142.05	2.698	890	24.3	—	—	—	—	-1384.5(c)	—
Sulfito de sodio	Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	126.05	2.633 <sup>18*</sup>	Se descompone				—	—	-1090.3(c)	—
Sulfuro de hidrógeno	H <sub>2</sub> S	34.08	—	-85.5	2.38	-60.3	18.67	373.6	88.9	-19.96(g)	-562.59(g)
Sulfuro de sodio	Na <sub>2</sub> S	78.05	1.856	950	6.7	—	—	—	—	-373.2(c)	—
Sulfuro ferroso	FeS	87.92	4.84	1193	—	—	—	—	—	-95.1(c)	—
Tetracloruro de carbono	CCl <sub>4</sub>	153.84	1.595	-22.9	2.51	76.7	30.0	556.4	45.0	-139.5(l) -106.7(g)	-352.2(l) -385.0(g)
Tetraóxido de nitrógeno	N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	92.0	1.448	-9.5	—	21.1	—	431.0	99.0	-9.3(g)	—
Tiosulfato de sodio	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	158.11	1.667	—	—	—	—	—	—	-1117.1(c)	—
Tolueno	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	92.13	0.866	-94.99	6.619	110.62	33.47	593.9	40.3	+12.00(l) +50.00(g)	-3909.9(l) -3947.9(g)
Trióxido de azufre	SO <sub>3</sub>	80.07	—	16.84	25.48	43.3	41.80	491.4	83.8	-395.18(g)	—
m-Xileno	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106.16	0.864	-47.87	11.569	139.10	36.40	619	34.6	-25.42(l) +17.24(g)	-4551.9(l) -4594.5(g)
o-Xileno	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106.16	0.880	-25.18	13.598	144.42	36.82	631.5	35.7	-24.44(l) +18.99(g)	-4552.9(l) -4596.3(g)
p-Xileno	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106.16	0.861	13.26	17.11	138.35	36.07	618	33.9	-24.43(l) +17.95(g)	-4552.9(l) -4595.2(g)
Zinc	Zn	65.38	7.140	419.5	6.674	907	114.77	—	—	0(c)	—

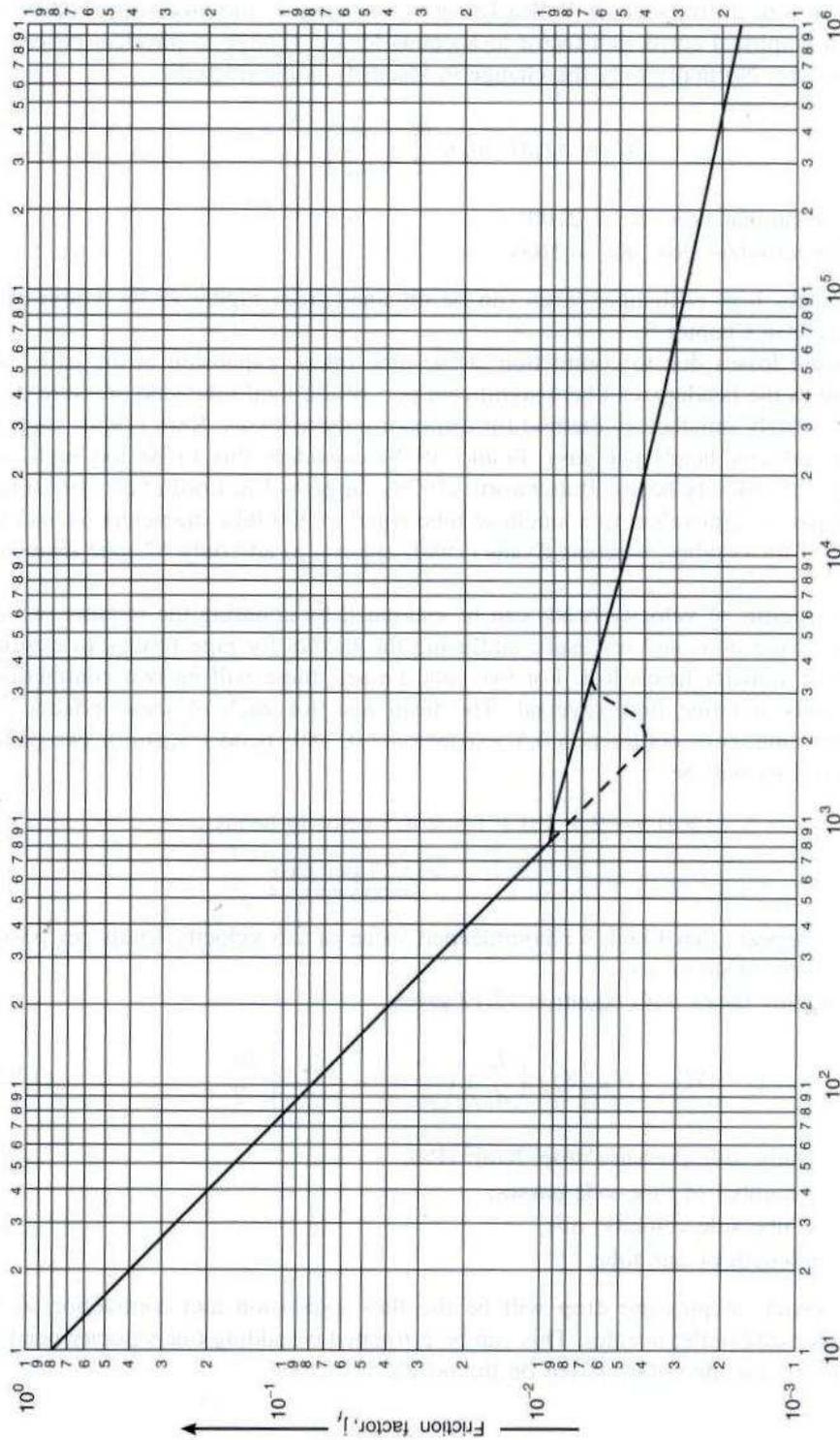
## Anexo 5.2: Factor de corrección de la temperatura media logarítmica



Anexo 5.3: Número de filas en cada haz

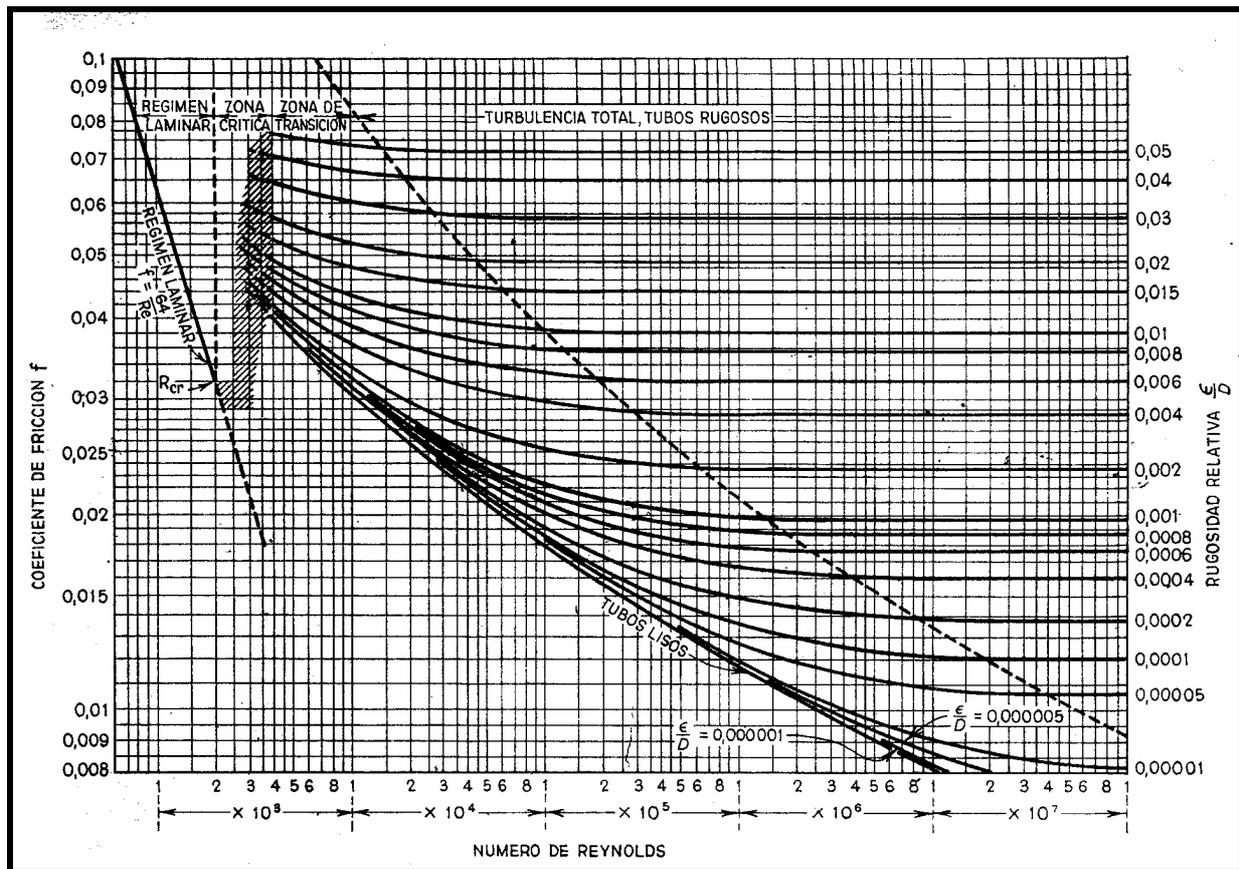


Anexo 5.4: Factor de fricción en el lado del aire





Anexo 6.2: Diagrama de Moody



Anexo 7.1: (a) Propiedades de tuberías de acero

TABLA 10.18. Propiedades de tuberías de acero

Tamaño nominal de tubería, in	Diámetro externo, in	Número de cédula	Espesor de pared, in	Diámetro interno, in	Área de la sección transversal		Circunferencia, ft, o superficie, ft <sup>2</sup> /ft, de longitud		Capacidad a una velocidad de 1 ft/s		Peso de tubería de extremos lisos, lb/ft
					Metal, in <sup>2</sup>	Flujo, ft <sup>2</sup>	Externo	Interno	U.S., gal/min	lb/h de agua	
1/8	0,405	10S	0,049	0,307	0,055	0,00051	0,106	0,0804	0,231	115,5	0,19
		40ST, 40S	0,068	0,269	0,072	0,00040	0,106	0,0705	0,179	89,5	0,24
		80XS, 80S	0,095	0,215	0,093	0,00025	0,106	0,0563	0,113	56,5	0,31
1/4	0,540	10S	0,065	0,410	0,097	0,00092	0,141	0,107	0,412	206,5	0,33
		40ST, 40S	0,088	0,364	0,125	0,00072	0,141	0,095	0,323	161,5	0,42
		80XS, 80S	0,119	0,302	0,157	0,00050	0,141	0,079	0,224	112,0	0,54
3/8	0,675	10S	0,065	0,545	0,125	0,00162	0,177	0,143	0,727	363,5	0,42
		40ST, 40S	0,091	0,493	0,167	0,00133	0,177	0,129	0,596	298,0	0,57
		80XS, 80S	0,126	0,423	0,217	0,00098	0,177	0,111	0,440	220,0	0,74
1/2	0,840	5S	0,065	0,710	0,158	0,00275	0,220	0,186	1,234	617,0	0,54
		10S	0,083	0,674	0,197	0,00248	0,220	0,176	1,112	556,0	0,67
		40ST, 40S	0,109	0,622	0,250	0,00211	0,220	0,163	0,945	472,0	0,85
		80XS, 80S	0,147	0,546	0,320	0,00163	0,220	0,143	0,730	365,0	1,09
		160	0,188	0,464	0,385	0,00117	0,220	0,122	0,527	263,5	1,31
		XX	0,294	0,252	0,504	0,00035	0,220	0,066	0,155	77,5	1,71
3/4	1,050	5S	0,065	0,920	0,201	0,00461	0,275	0,241	2,072	1,036,0	0,69
		10S	0,083	0,884	0,252	0,00426	0,275	0,231	1,903	951,5	0,86
		40ST, 40S	0,113	0,824	0,333	0,00371	0,275	0,216	1,665	832,5	1,13
		80XS, 80S	0,154	0,742	0,433	0,00300	0,275	0,194	1,345	672,5	1,47
		160	0,219	0,612	0,572	0,00204	0,275	0,160	1,917	458,5	1,94
		XX	0,308	0,434	0,718	0,00103	0,275	0,114	1,461	230,5	2,44
1	1,315	5S	0,065	1,185	0,255	0,00768	0,344	0,310	3,449	1,725	0,87
		10S	0,109	1,097	0,413	0,00656	0,344	0,287	2,946	1,473	1,40
		40ST, 40S	0,133	1,049	0,494	0,00600	0,344	0,275	2,690	1,345	1,68
		80XS, 80S	0,179	0,957	0,639	0,00499	0,344	0,250	2,240	1,120	2,17
		160	0,250	0,815	0,836	0,00362	0,344	0,213	1,625	812,5	2,84
		XX	0,358	0,599	1,076	0,00196	0,344	0,157	0,878	439,0	3,66
1 1/4	1,660	5S	0,065	1,530	0,326	0,01277	0,435	0,401	5,73	2,865	1,11
		10S	0,109	1,442	0,531	0,01134	0,435	0,378	5,09	2,545	1,81
		40ST, 40S	0,140	1,380	0,668	0,01040	0,435	0,361	4,57	2,285	2,27
		80XS, 80S	0,191	1,278	0,881	0,00891	0,435	0,335	3,99	1,995	3,00
		160	0,250	1,160	1,107	0,00734	0,435	0,304	3,29	1,645	3,76
		XX	0,382	1,896	1,534	0,00438	0,435	0,235	1,97	985	5,21
1 1/2	1,900	5S	0,065	1,770	0,375	0,01709	0,497	0,463	7,67	3,835	1,28
		10S	0,109	1,682	0,614	0,01543	0,497	0,440	6,94	3,465	2,09
		40ST, 40S	0,145	1,610	0,800	0,01414	0,497	0,421	6,34	3,170	2,72
		80XS, 80S	0,200	1,500	1,069	0,01225	0,497	0,393	5,49	2,745	3,63
		160	0,281	1,338	1,429	0,00976	0,497	0,350	4,38	2,190	4,86
		XX	0,400	1,100	1,885	0,00660	0,497	0,288	2,96	1,480	6,41
2	2,375	5S	0,065	2,245	0,472	0,02749	0,622	0,588	12,34	6,170	1,61
		10S	0,109	2,157	0,776	0,02538	0,622	0,565	11,39	5,695	2,64
		40ST, 40S	0,154	2,067	1,075	0,02330	0,622	0,541	10,45	5,225	3,65
		80ST, 80S	0,218	1,939	1,477	0,02050	0,622	0,508	9,20	4,600	5,02
		160	0,344	2,687	1,195	2,01552	0,622	0,436	6,97	3,485	7,46
		XX	0,436	2,503	1,656	2,01232	0,622	0,393	5,53	2,765	9,03
2 1/2	2,875	5S	0,083	2,709	0,728	0,04003	0,753	0,709	17,97	8,985	2,48
		10S	0,120	2,635	1,039	0,03787	0,753	0,690	17,00	8,500	3,53
		40ST, 40S	0,203	2,469	1,704	0,03322	0,753	0,647	14,92	7,460	5,79
		80XS, 80S	0,276	2,323	2,254	0,02942	0,753	0,608	13,20	6,600	7,66
		160	0,375	2,125	2,945	0,02463	0,753	0,556	11,07	5,535	10,01
		XX	0,552	1,771	4,028	0,01711	0,753	0,464	7,68	3,840	13,69
3	3,500	5S	0,083	3,334	0,891	0,06063	0,916	0,873	27,21	13,605	3,03
		10S	0,120	3,260	1,274	0,05796	0,916	0,853	26,02	13,010	4,33
		40ST, 40S	0,216	3,068	2,228	0,05130	0,916	0,803	23,00	11,500	7,58
		80XS, 80S	0,300	2,900	3,016	0,04587	0,916	0,759	20,55	10,275	10,25
		160	0,438	2,624	4,213	0,03755	0,916	0,687	16,86	8,430	14,32
		XX	0,600	2,300	5,466	0,02885	0,916	0,602	12,95	6,475	18,58
3 1/3	4,0	5S	0,083	3,834	1,021	0,08017	1,047	1,004	35,98	17,990	3,48
		10S	0,120	3,760	1,463	0,07711	1,047	0,984	34,61	17,305	4,97
		40ST, 40S	0,226	3,548	2,680	0,06870	1,047	0,929	30,80	15,400	9,11
		80XS, 80S	0,318	3,364	3,678	0,06170	1,047	0,881	27,70	13,850	12,50

Anexo 7.1: (b) Propiedades de tuberías de acero

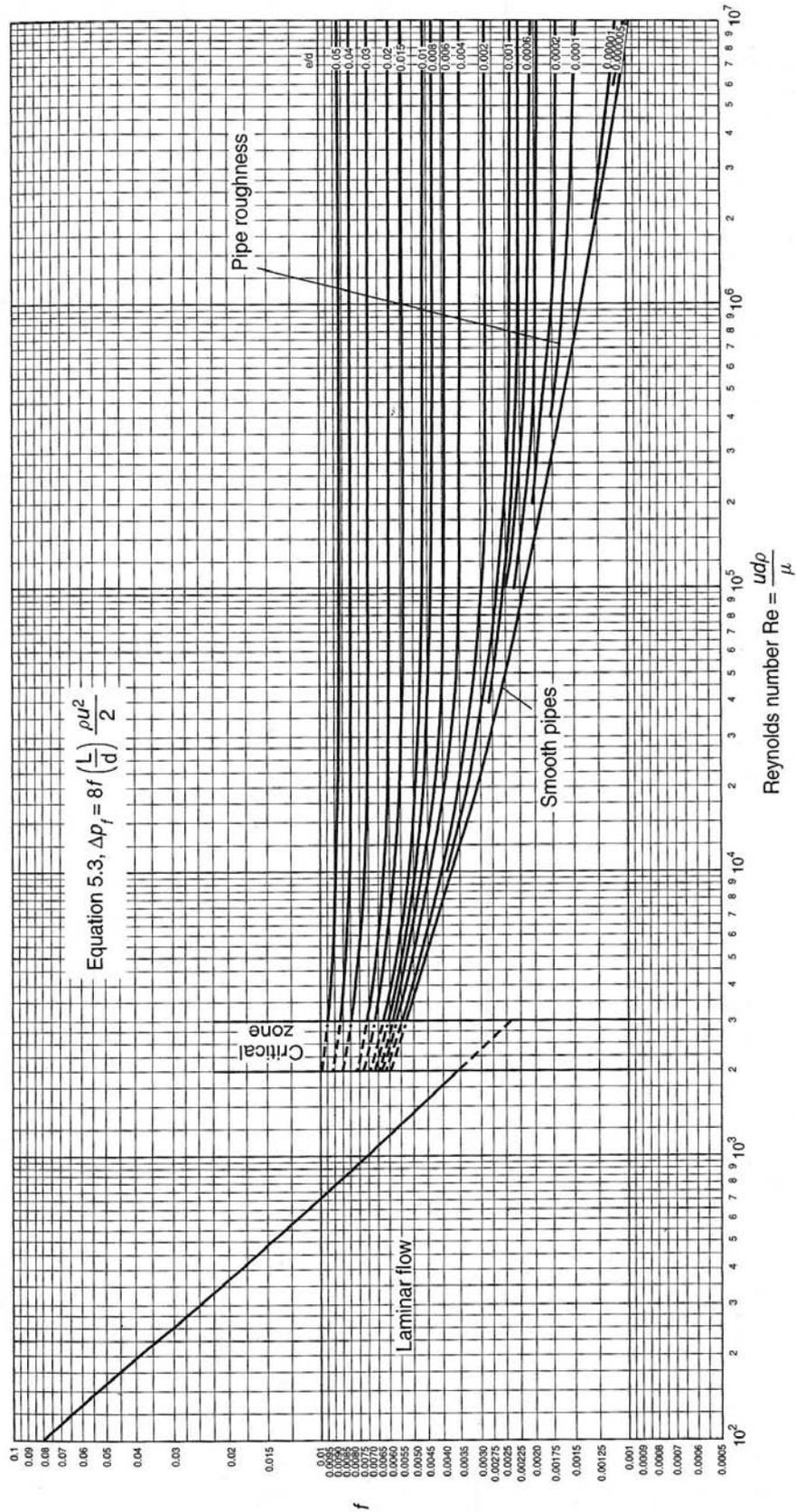
Tamaño nominal de tubería, in	Diámetro externo, in	Número de cédula	Espesor de pared, in	Diámetro interno, in	Área de la sección transversal		Circunferencia, ft, o superficie, ft <sup>2</sup> /ft, de longitud		Capacidad a una velocidad de 1 ft/s		Peso de tubería de extremos lisos, lb/ft		
					Metal, in <sup>2</sup>	Flujo, ft <sup>2</sup>	Externo	Interno	U.S., gal/min	lb/h de agua			
4	4,5	5S	0,083	4,334	1,152	0,10245	1,178	0,135	46,0	23.000	3,92		
		10S	0,120	4,260	1,651	0,09898	1,178	1,115	44,4	22.200	5,61		
		40ST, 40S	0,237	4,026	3,17	0,08840	1,178	1,054	39,6	19.800	10,79		
		80XS, 80S	0,337	3,826	4,41	0,07986	1,178	1,002	35,8	17.900	14,98		
		120	0,438	3,624	5,58	0,07170	1,178	0,949	32,2	16.100	19,00		
		160	0,531	3,438	6,62	0,06647	1,178	0,900	28,9	14.450	22,51		
		XX	0,674	3,152	8,10	0,05419	1,178	0,825	24,3	12.150	27,54		
5	5,563	5S	0,109	5,345	1,87	0,1558	1,456	1,399	69,9	34.950	6,36		
		10S	0,134	5,295	2,29	0,1529	1,456	1,386	68,6	34.300	7,77		
		40ST, 40S	0,258	5,047	4,30	0,1390	1,456	1,321	62,3	31.150	14,62		
		80XS, 80S	0,375	4,813	6,11	0,1263	1,456	1,260	57,7	28.850	20,78		
		120	0,500	4,563	7,95	0,1136	1,456	1,195	51,0	25.500	27,04		
		160	0,625	4,313	9,70	0,1015	1,456	1,129	45,5	22.750	32,96		
		XX	0,750	4,063	11,34	0,900	1,456	1,064	40,4	20.200	38,55		
6	6,625	5S	0,109	6,407	2,23	0,2239	1,734	1,677	100,5	50.250	7,60		
		10S	0,134	6,357	2,73	0,2204	1,734	1,664	98,9	49.450	9,29		
		40ST, 40S	0,280	6,065	5,58	0,2006	1,734	1,588	90,0	45.000	18,97		
		80XS, 80S	0,432	5,761	8,40	0,1810	1,734	1,508	81,1	40.550	28,57		
		120	0,562	5,501	10,70	0,1650	1,734	1,440	73,9	36.950	36,39		
		160	0,719	5,187	13,34	0,1467	1,734	1,358	65,9	32.950	45,34		
		XX	0,864	4,897	15,64	0,1308	1,734	1,282	58,7	29.350	53,16		
8	8,625	5S	0,109	8,407	2,915	0,3855	2,258	2,201	173,0	86.500	9,93		
		10S	0,148	8,329	3,941	0,3784	2,258	2,180	169,8	84.900	13,40		
		20	0,250	8,125	6,578	0,3601	2,258	2,127	161,5	80.750	22,36		
		30	0,277	8,071	7,265	0,3553	2,258	2,113	159,4	79.700	24,70		
		40ST, 40S	0,322	7,981	8,399	0,3474	2,258	2,089	155,7	77.850	28,55		
		60	0,406	7,813	10,48	0,3329	2,258	2,045	149,4	74.700	35,64		
		80XS, 80S	0,500	7,625	12,76	0,3171	2,258	1,996	142,3	71.150	43,39		
		100	0,594	7,437	14,99	0,3017	2,258	1,947	135,4	67.700	50,95		
		120	0,719	7,187	17,86	0,2817	2,258	1,882	126,4	63.200	60,71		
		140	0,812	7,001	19,93	0,2673	2,258	1,833	120,0	60.000	67,76		
		XX	0,875	6,875	21,30	0,2578	2,258	1,800	115,7	57.850	72,42		
		160	0,906	6,813	21,97	0,2532	2,258	1,784	113,5	56.750	74,69		
		10	10,75	5S	0,134	10,482	4,47	0,5993	2,814	2,744	269,0	134.500	15,19
10S	0,165			10,420	5,49	0,5922	2,814	2,728	265,8	132.900	18,65		
20	0,250			10,250	8,25	0,5731	2,814	2,685	257,0	128.500	28,04		
30	0,307			10,136	10,07	0,5603	2,814	2,655	252,0	126.000	34,24		
40ST, 40S	0,365			10,020	11,91	0,5475	2,814	2,620	246,0	123.000	40,48		
80S, 60XS	0,500			9,750	16,10	0,5185	2,814	2,550	233,0	116.500	54,74		
80	0,594			9,562	18,95	0,4987	2,814	2,503	223,4	111.700	64,43		
100	0,719			9,312	22,66	0,4729	2,814	2,438	212,3	106.150	77,03		
120	0,844			9,062	26,27	0,4479	2,814	2,372	201,0	100.500	89,29		
140, XX	1,000			8,750	30,63	0,4176	2,814	2,291	188,0	94.000	104,13		
160	1,125			8,500	34,02	0,3941	2,814	2,225	177,0	88.500	115,64		
12	12,75			5S	0,156	12,438	6,17	0,8438	3,338	3,26	378,7	189.350	20,98
				10S	0,180	12,390	7,11	0,8373	3,338	3,24	375,8	187.900	24,17
		20	0,250	12,250	9,82	0,8185	3,338	3,21	367,0	183.500	33,38		
		30	0,330	12,090	12,88	0,7972	3,338	3,17	358,0	179.000	43,77		
		40ST, 40S	0,375	12,000	14,58	0,7854	3,338	3,14	352,5	176.250	49,56		
		40	0,406	11,938	15,74	0,7773	3,338	3,13	349,0	174.500	53,52		
		XS, 80S	0,500	11,750	19,24	0,7530	3,338	3,08	338,0	169.000	65,42		
		60	0,562	11,626	21,52	0,7372	3,338	3,04	331,0	165.500	73,15		
		80	0,688	11,374	26,07	0,7056	3,338	2,98	316,7	158.350	88,63		
		100	0,844	11,062	31,57	0,6674	3,338	2,90	299,6	149.800	107,32		
		120, XX	1,000	10,750	36,91	0,6303	3,338	2,81	283,0	141.500	125,49		
		140	1,125	10,500	41,09	0,6013	3,338	2,75	270,0	135.000	139,67		
		160	1,312	10,126	47,14	0,5592	3,338	2,65	251,0	125.500	160,27		
14	14	5S	0,156	13,688	6,78	1,0219	3,665	3,58	459	229.500	23,07		
		10S	0,188	13,624	8,16	1,0125	3,665	3,57	454	227.000	27,73		
		10	0,250	13,500	10,80	0,9940	3,665	3,53	446	223.000	36,71		
		20	0,312	13,376	13,42	0,9750	3,665	3,50	438	219.000	45,61		
		30, ST	0,375	13,250	16,05	0,9575	3,665	3,47	430	215.000	54,57		
		40	0,438	13,124	18,66	0,9397	3,665	3,44	422	211.000	63,44		
		XS	0,500	13,000	21,21	0,9218	3,665	3,40	414	207.000	72,09		
		60	0,594	12,812	25,02	0,8957	3,665	3,35	402	201.000	85,05		
		80	0,750	12,500	31,22	0,8522	3,665	3,27	382	191.000	106,13		
		100	0,938	12,124	38,49	0,8017	3,665	3,17	360	180.000	130,85		
		120	1,094	11,812	44,36	0,7610	3,665	3,09	342	171.000	150,79		
		140	1,250	11,500	50,07	0,7213	3,665	3,01	324	162.000	170,21		
		160	1,406	11,188	55,63	0,6827	3,665	2,93	306	153.000	189,11		

Anexo 7.1: (c) Propiedades de tuberías de acero

TABLA 10.18. Propiedades de tuberías de acero (Continuación)

Tamaño nominal de tubería, in	Diámetro externo, in	Número de cédula	Espesor de pared, in	Diámetro interno, in	Área de la sección transversal		Circunferencia, ft, o superficie, ft <sup>2</sup> /ft, de longitud		Capacidad a una velocidad de 1 ft/s		Peso de tubería de extremos lisos, lb/ft
					Metal, in <sup>2</sup>	Flujo, ft <sup>2</sup>	Externo	Interno	U.S., gal/min	lb/ft de agua	
16	16	SS	0,165	15,670	8,21	1,3393	4,189	4,10	601	300.500	27,90
		10S	0,188	15,624	9,34	1,3314	4,189	4,09	598	299.000	31,75
		10	0,250	15,500	12,37	1,3104	4,189	4,06	587	293.500	42,05
		20	0,312	15,376	15,38	1,2985	4,189	4,03	578	289.000	52,27
		30, ST	0,375	15,250	18,41	1,2680	4,189	3,99	568	284.000	62,58
		40, XS	0,500	15,000	24,35	1,2272	4,189	3,93	550	275.000	82,77
		60	0,656	14,688	31,62	1,1766	4,189	3,85	528	264.000	107,50
		80	0,844	14,312	40,19	1,1171	4,189	3,75	501	250.500	136,61
		100	1,031	13,938	48,48	1,0596	4,189	3,65	474	237.000	164,82
		120	1,219	13,562	56,61	1,0032	4,189	3,55	450	225.000	192,43
		140	1,438	13,124	65,79	0,9394	4,189	3,44	422	211.000	223,64
		160	1,594	12,812	72,14	0,8953	4,189	3,35	402	201.000	245,25
18	18	SS	0,165	17,60	9,25	1,7029	4,712	4,63	764	382.000	31,43
		10S	0,188	17,624	10,52	1,6941	4,712	4,61	760	379.400	35,76
		10	0,250	17,500	13,94	1,6703	4,712	4,58	750	375.000	47,39
		20	0,312	17,376	17,34	1,6468	4,712	4,55	739	369.500	58,94
		ST	0,375	17,250	20,76	1,6230	4,712	4,52	728	364.000	70,59
		30	0,438	17,124	24,16	1,5993	4,712	4,48	718	359.000	82,15
		XS	0,500	17,000	27,49	1,5763	4,712	4,45	707	353.500	93,45
		40	0,562	16,876	30,79	1,5533	4,712	4,42	697	348.500	104,67
		60	0,750	16,500	40,64	1,4849	4,712	4,32	666	333.000	138,17
		80	0,938	16,124	50,28	1,4180	4,712	4,22	636	318.000	170,92
		100	1,156	15,688	61,17	1,3423	4,712	4,11	602	301.000	207,96
		120	1,375	15,250	71,82	1,2684	4,712	3,99	569	284.500	244,14
140	1,562	14,876	80,66	1,2070	4,712E	3,89	540	270.000	274,22		
160	1,781	14,438	90,75	1,1370	4,712	3,78	510	255.000	308,50		
20	20	SS	0,188	19,624	11,70	2,1004	5,236	5,14	943	471.500	39,78
		10S	0,218	19,564	13,55	2,0878	5,236	5,12	937	467.500	46,06
		10	0,250	19,500	15,51	2,0740	5,236	5,11	930	465.000	52,73
		20, ST	0,375	19,250	23,12	2,0211	5,236	5,04	902	451.000	78,60
		30, XS	0,500	19,000	30,63	1,9689	5,236	4,97	883	441.500	104,13
		40	0,594	18,812	36,21	1,9302	5,236	4,92	866	433.000	123,11
		60	0,812	18,376	48,95	1,8417	5,236	4,81	826	413.000	166,40
		80	1,031	17,938	61,44	1,7550	5,236	4,70	787	393.500	208,87
		100	1,281	17,438	75,33	1,6585	5,236	4,57	744	372.000	256,10
		120	1,500	17,000	87,18	1,5763	5,236	4,45	707	353.500	296,37
		140	1,750	16,500	100,3	1,4849	5,236	4,32	665	332.500	341,09
		160	1,969	16,062	111,5	1,4071	5,236	4,21	632	316.000	397,17
24	24	SS	0,218	23,564	16,29	3,0285	6,283	6,17	1,359	679.500	55,37
		10, 10S	0,250	23,500	18,65	3,012	6,283	6,15	1,350	675.000	63,41
		20, ST	0,375	23,250	27,83	2,948	6,283	6,09	1,325	662.500	94,62
		XS	0,500	23,000	36,90	2,885	6,283	6,02	1,295	642.500	125,49
		30	0,562	22,876	41,39	2,854	6,283	5,99	1,281	640.500	140,68
		40	0,688	22,624	50,39	2,792	6,283	5,92	1,253	626.500	171,29
		60	0,969	22,062	70,11	2,655	6,283	5,78	1,192	596.000	238,35
		80	1,219	21,562	87,24	2,536	6,283	5,64	1,138	569.000	296,58
		100	1,531	20,938	108,1	2,391	6,283	5,48	1,073	536.500	367,39
		120	1,812	20,376	126,3	2,264	6,283	5,33	1,016	508.000	429,39
		140	2,062	19,876	142,1	2,155	6,283	5,20	965	482.500	483,12
		160	2,344	19,312	159,5	2,034	6,283	5,06	913	456.500	542,13
30	30	SS	0,250	29,500	23,37	4,746	7,854	7,72	2,130	1,065.000	79,43
		10, 10S	0,312	29,376	29,10	4,707	7,854	7,69	2,110	1,055.000	98,93
		ST	0,375	29,250	34,90	4,666	7,854	7,66	2,094	1,048.000	118,65
		20, XS	0,500	29,000	46,34	4,587	7,854	7,59	2,055	1,027.500	157,53
		30	0,625	28,750	57,68	4,508	7,854	7,53	2,020	1,010.000	196,08

Anexo 7.2: Factor de fricción en tuberías

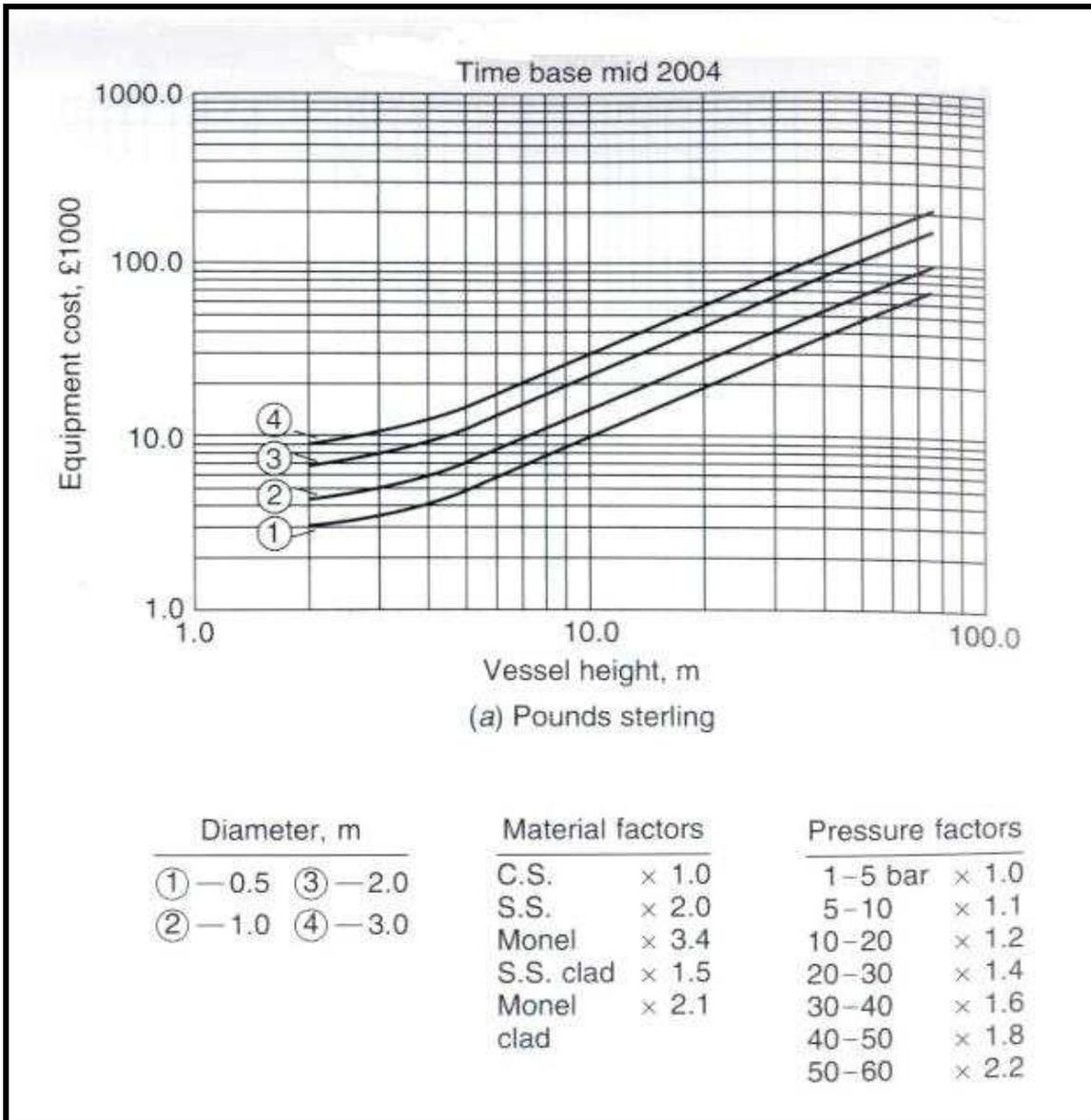


**ANEXO**  
**PRESUPUESTO**

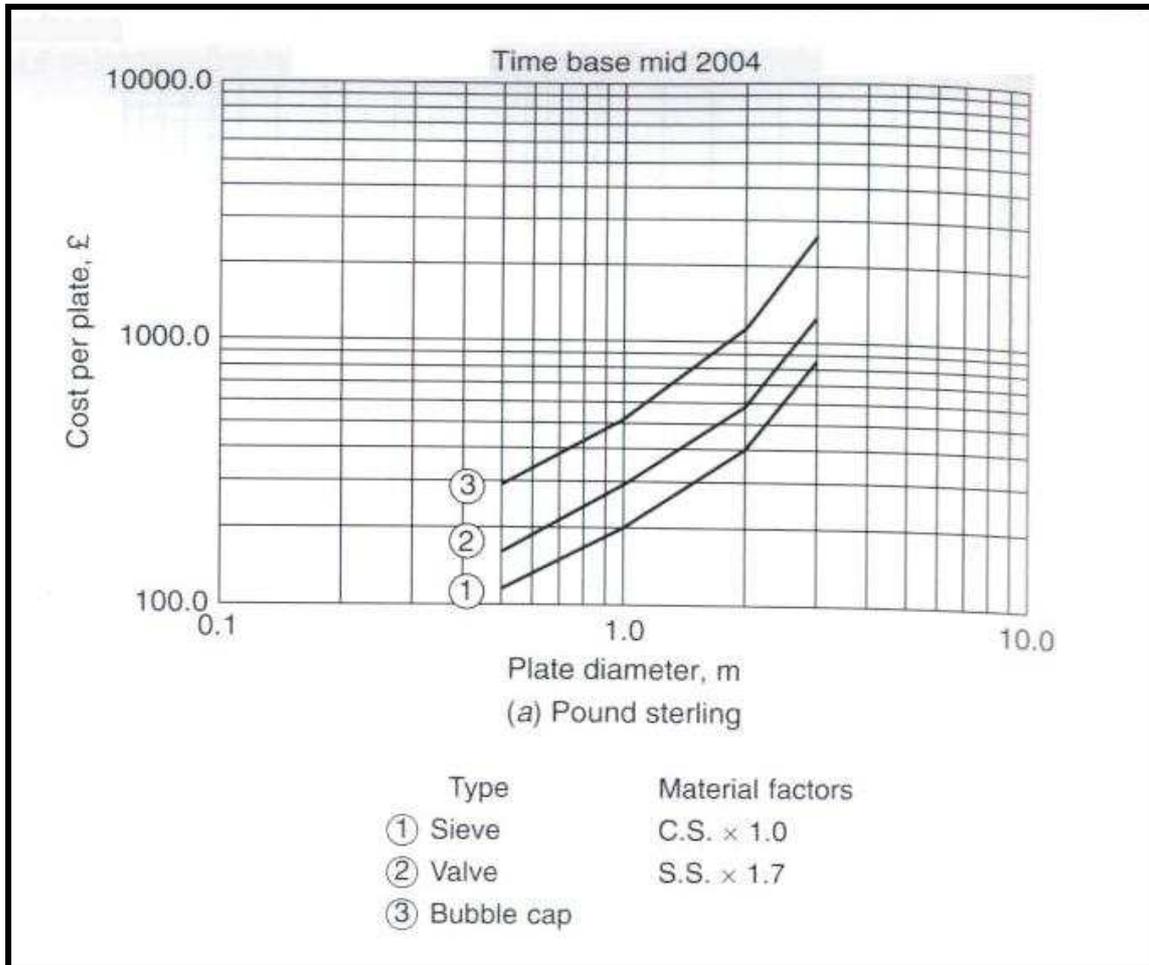
## Anexo P.1: Tabla de coeficientes de cada partida

Item	Process type		
	Fluids	Fluids– solids	Solids
1. Major equipment, total purchase cost	PCE	PCE	PCE
$f_1$ Equipment erection	0.4	0.45	0.50
$f_2$ Piping	0.70	0.45	0.20
$f_3$ Instrumentation	0.20	0.15	0.10
$f_4$ Electrical	0.10	0.10	0.10
$f_5$ Buildings, process	0.15	0.10	0.05
* $f_6$ Utilities	0.50	0.45	0.25
* $f_7$ Storages	0.15	0.20	0.25
* $f_8$ Site development	0.05	0.05	0.05
* $f_9$ Ancillary buildings	0.15	0.20	0.30
2. Total physical plant cost (PPC)			
PPC = PCE (1 + $f_1$ + $\dots$ + $f_9$ )			
= PCE ×	3.40	3.15	2.80
$f_{10}$ Design and Engineering	0.30	0.25	0.20
$f_{11}$ Contractor's fee	0.05	0.05	0.05
$f_{12}$ Contingency	0.10	0.10	0.10
Fixed capital = PPC (1 + $f_{10}$ + $f_{11}$ + $f_{12}$ )			
= PPC ×	1.45	1.40	1.35

Anexo P.2: Costo de la virola y fondos del stripper



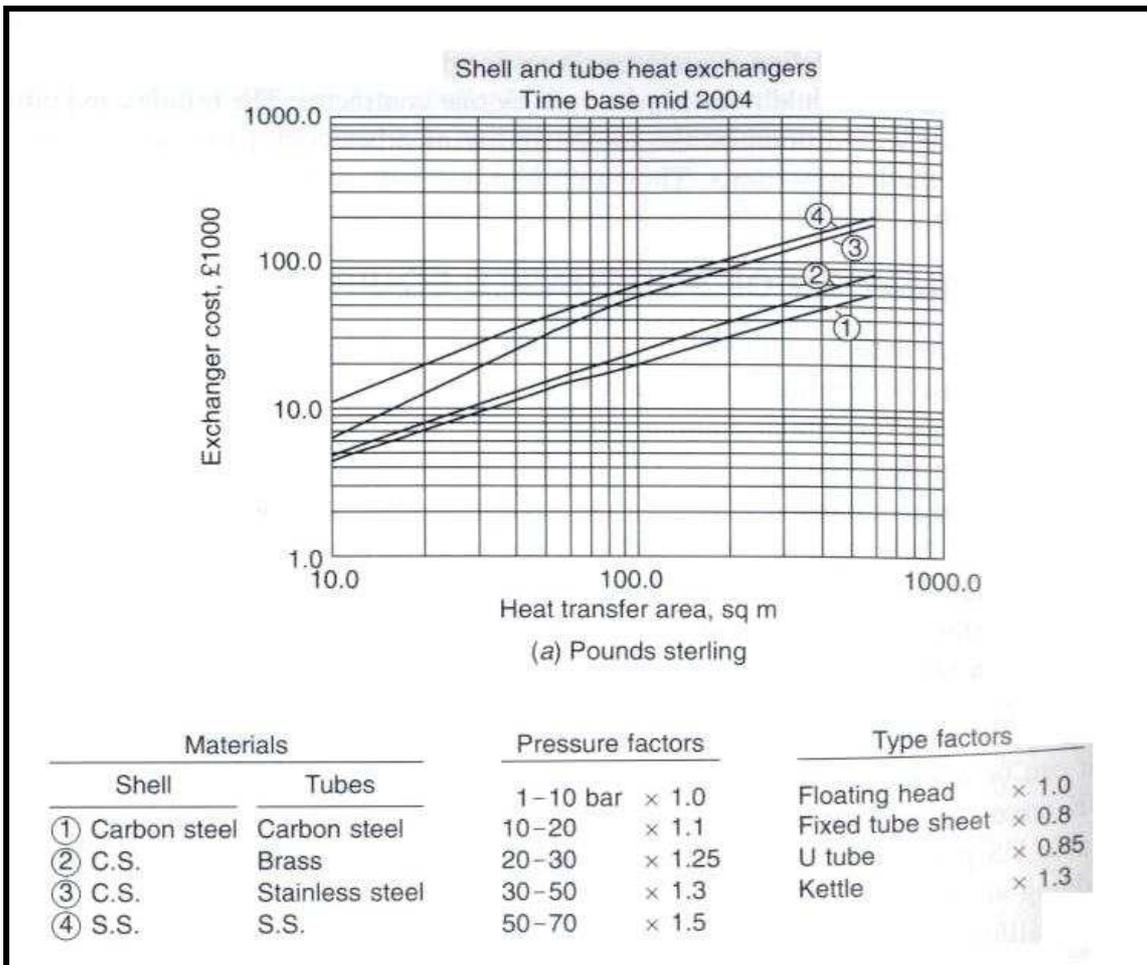
Anexo P.3: Coste de los platos del stripper



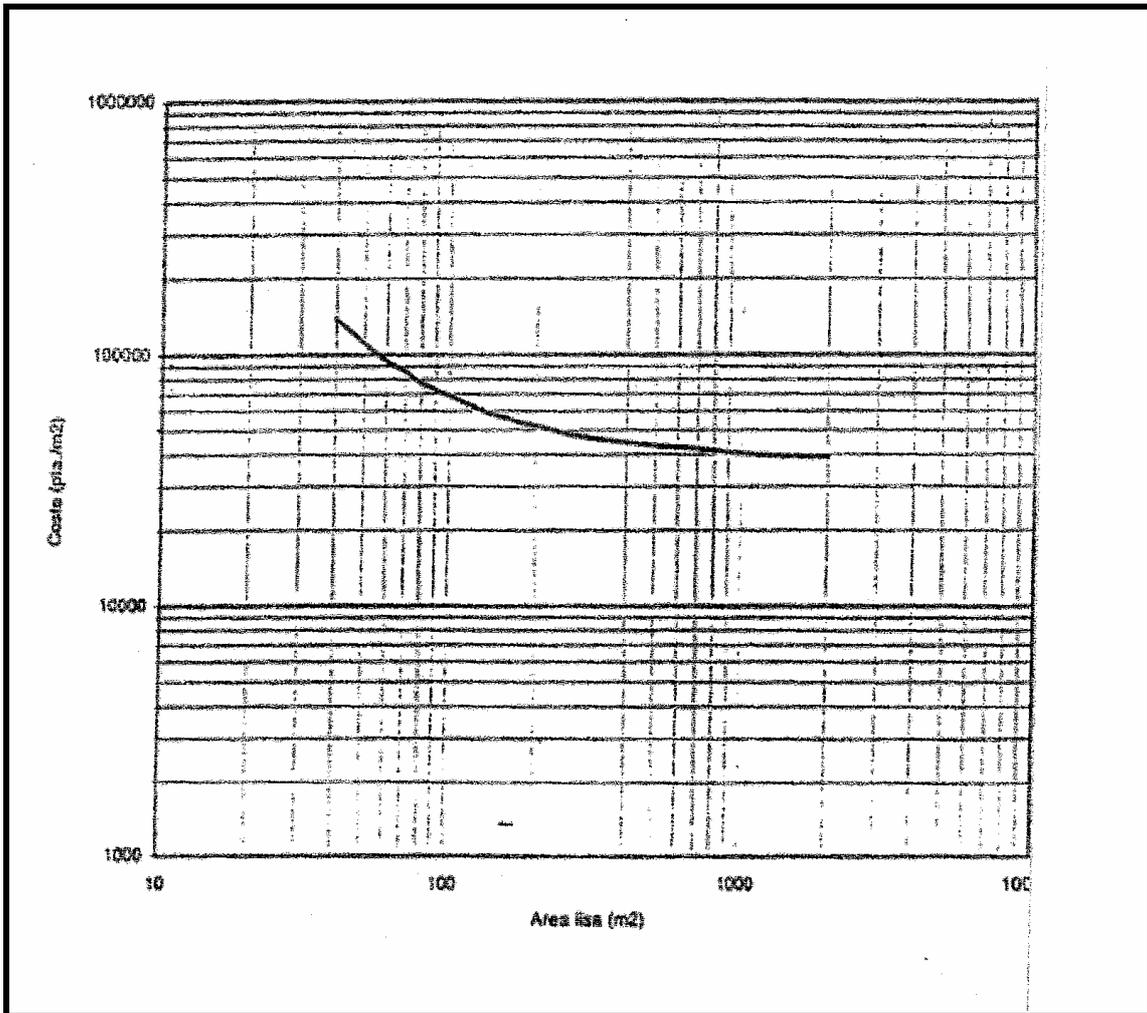
## Anexo P.4: Coste de las bocas de hombre

<b>BOCAS DE HOMBRE</b>	
<b>Diámetro</b>	<b>Coste</b>
in	(£)
16	500
18	500
20	600
24	800

Anexo P.5: Coste de un Intercambiador de Calor



Anexo P.6: Coste base de un Aerorefrigerante



## Anexo P.7: Factores de corrección para el coste del aéreo

Influencia del número de filas

4 filas	x 1,15
5 filas	x 1,05
6 filas	x 1,00
8 filas	x 0,90
10 filas	x 0,85

Influencia de la longitud de los tubos

6 m.	x 1,09
8 m.	x 1,02
9 m.	x 1,00
10 m.	x 0,97
12 m.	x 0,85

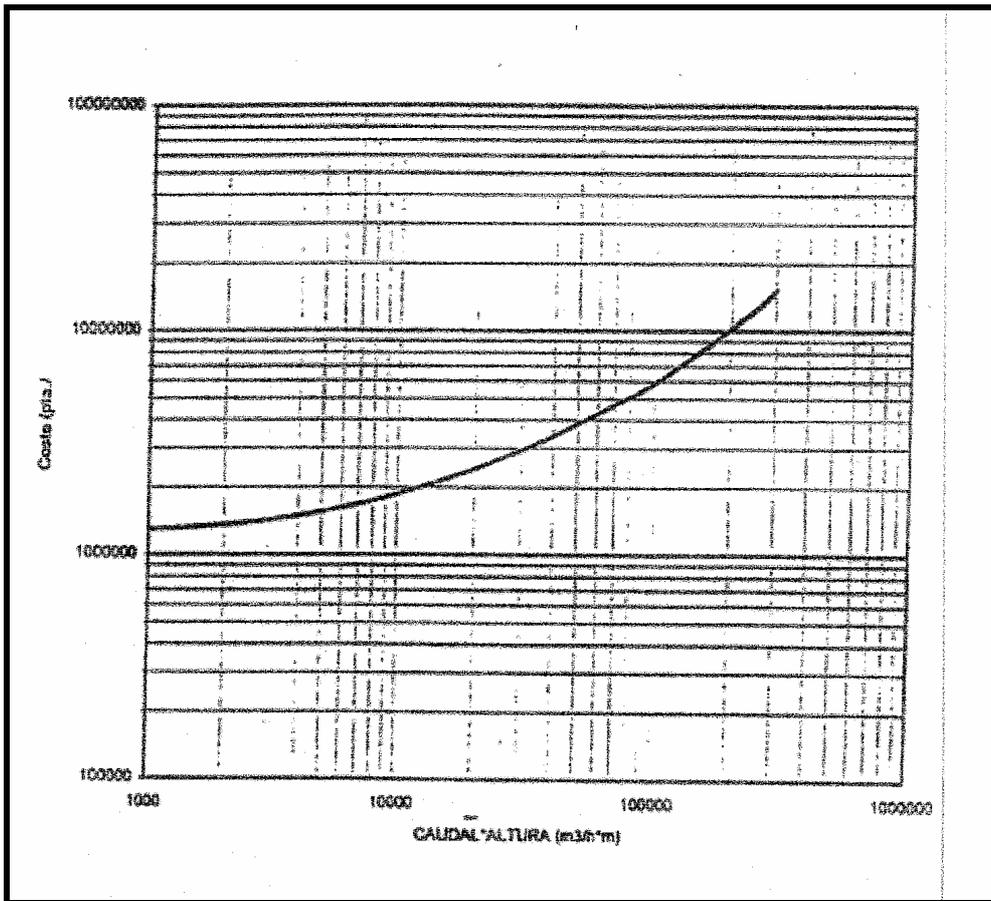
Influencia del material

Acero al carbono	x 1,00
Aluminio	x 1,50
Inoxidable 304	x 2,20
Inoxidable 316	x 3,00
Monel	x 3,20

Influencia de la presión de diseño

10	Kg/cm <sup>2</sup>	x 1,00
10 – 20		x 1,03
20 – 30		x 1,06
30 – 50		x 1,10
50 – 100		x 1,15

Anexo P.8: Coste base de las bombas



## Anexo P.9: Factores de corrección para el coste de las bombas

Influencia de la temperatura

Hasta 150 °C	x 1,00
150 – 200	x 1,15
Mayor de 250 °C	x 1,30

Influencia de la presión de aspiración

20 Kg/cm <sup>2</sup>	x 0,7
20 – 40 Kg/cm <sup>2</sup>	x 1,00

Influencia del material

Acero al carbono	x 1,00
Bronce	x 1,25
Inoxidable	x 1,80
Titanio	x 8,95

## 2. Archipiélago de las islas Ons y Onza

El espacio marítimo-terrestre poligonal, configurado por los siguientes vértices:

ARCHIPIÉLAGO DE ONS Y ONZA			
Punto	Denominación	X	Y
1	Punta Centolo (NE) ...	506.776	4.694.993
2	Bajos los Camoucos (E) .....	507.742	4.693.313
3	Bajo Laxiña de Galera (SE) .....	506.129	4.668.300
4	Bajo Menguella (S) ...	503.943	4.685.855
5	Bajo Cabeza del Rico (O) .....	503.233	4.691.413
6	Bajos de Bastián de Val (NO) .....	505.124	4.695.307

que rodea las islas de Ons y Onza, e islotes adyacentes. Dicho archipiélago está ubicado en la entrada de la ría de Pontevedra, término municipal de Bueu, y comprende una superficie de 2.171 hectáreas marítimas y 470 hectáreas terrestres.

## 3. Archipiélago de las islas de Sálvora e islotes de su entorno

El espacio marítimo-terrestre poligonal, configurado por los siguientes vértices:

ARCHIPIÉLAGO DE SÁLVORA			
Punto	Denominación	X	Y
1	Islas Sagres (NO) .....	494.676	4.707.294
2	Este del Seijo de Vionta (E) .....	501.485	4.705.900
3	S Punta de Besugueiros (S) .....	499.430	4.698.782

y que rodea a la isla de Sálvora e islotes adyacentes. Dicho archipiélago está ubicado en la parte occidental de la ría de Arousa, término municipal de Ribeira, y comprende una superficie de 2.309 hectáreas marítimas y 248 hectáreas terrestres.

## 4. Isla de Cortegada, Malveires y otras islas próximas

El espacio marítimo-terrestre configurado por la línea de pleamar máxima viva equinoccial entre los puntos 1 y 2, y la poligonal recta entre los restantes vértices:

Vértice	Coordenada X	Coordenada Y
1	518.052	4.719.352
2	517.320	4.718.260
3	517.311	4.717.825
4	517.212	4.717.749
5	516.207	4.717.513
6	516.018	4.718.283
7	517.650	4.719.051

que rodea e incluye la isla de Cortegada, Malveira Grande, Malveira Chica, Briás e Illote do Con. Dicho conjunto está ubicado en la ría de Arousa, en el término municipal del Ayuntamiento de Villagarcía de Arousa, y comprende una superficie terrestre de 43,8 hectáreas.

## 12995 LEY 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación.

JUAN CARLOS REY

REY DE ESPAÑA

A todos los que la presente vieren y entendieren. Sabed: Que las Cortes Generales han aprobado y Yo vengo en sancionar la siguiente Ley.

### EXPOSICIÓN DE MOTIVOS

1

Desde que en 1967 se aprobó la primera Directiva de carácter ambiental, la protección y conservación del medio ambiente ha sido una de las principales inquietudes de la Comunidad Europea, hasta tal punto que ha terminado incorporándose a los Tratados como una verdadera política comunitaria, cuyo principal objetivo es el de prevención, de acuerdo con las previsiones de los sucesivos programas comunitarios de acción en materia de medio ambiente y desarrollo sostenible.

Una de las actuaciones más ambiciosas que se han puesto en marcha en el seno de la Unión Europea para la aplicación del principio de prevención en el funcionamiento de las instalaciones industriales más contaminantes ha sido la aprobación de la Directiva 96/61/CE, del Consejo, de 24 de septiembre, relativa a la prevención y al control integrado de la contaminación, mediante la que se establecen medidas para evitar, o al menos reducir, las emisiones de estas actividades en la atmósfera, el agua y el suelo, incluidos los residuos para alcanzar un nivel elevado de protección del medio ambiente considerado en su conjunto.

Para hacer efectiva la prevención y el control integrado de la contaminación, la Directiva 96/61/CE supe-dita la puesta en marcha de las instalaciones incluidas en su ámbito de aplicación a la obtención de un permiso escrito, que deberá concederse de forma coordinada cuando en el procedimiento intervengan varias autoridades competentes. En este permiso se fijarán las condiciones ambientales que se exigirán para la explotación de las instalaciones y, entre otros aspectos, se especificarán los valores límite de emisión de sustancias contaminantes, que se basarán en las mejores técnicas disponibles y tomando en consideración las características técnicas de la instalación, su implantación geográfica y las condiciones locales del medio ambiente. A estos efectos, y para facilitar la aplicación de las anteriores medidas, la Directiva establece también un sistema de intercambio de información entre la Comisión Europea y los Estados miembros sobre las principales emisiones contaminantes y las fuentes responsables de las mismas y sobre las mejores técnicas disponibles.

2

La incorporación al ordenamiento interno español de la mencionada Directiva 96/61/CE se lleva a cabo, con carácter básico, mediante esta Ley, que tiene, por tanto, una inequívoca vocación preventiva y de protección del medio ambiente en su conjunto, con la finalidad de evitar, o, al menos, reducir, la contaminación de la atmósfera, el agua y el suelo.

A estos efectos, el control integrado de la contaminación descansa fundamentalmente en la autorización ambiental integrada, una nueva figura de intervención administrativa que sustituye y aglutina al conjunto disperso de autorizaciones de carácter ambiental exigibles hasta el momento, con el alcance y contenido que se determina en el Título III.

## 3

En el Título I se establecen las medidas de carácter general, como el objeto o el ámbito de aplicación de la Ley, que se extiende a las instalaciones de titularidad pública o privada en las que se desarrolle alguna de las actividades industriales que se enumeran en el anejo 1, por razones de seguridad jurídica, si bien, de acuerdo con la Directiva 96/61/CE, las instalaciones existentes dispondrán de un período de adaptación hasta el 30 de octubre de 2007.

No obstante, quedan fuera del ámbito de aplicación de la Ley las instalaciones o partes de las instalaciones utilizadas para la investigación, desarrollo y experimentación de nuevos productos y procesos.

De igual modo, y siguiendo la técnica legislativa habitual de las disposiciones comunitarias, se incluyen en el artículo 3 una serie de definiciones de determinados conceptos que posteriormente aparecen a lo largo del texto, lo que redundará en un mayor grado de precisión y de seguridad jurídica a la hora de la aplicación concreta de la norma.

Entre estas medidas de carácter general figuran también las obligaciones de los titulares de las instalaciones incluidas en el ámbito de aplicación de esta Ley y los principios informadores del funcionamiento de las instalaciones, que deberán ser tenidos en cuenta por las Comunidades Autónomas al otorgar la autorización ambiental integrada.

Por otro lado, se considera imprescindible la cooperación interadministrativa para hacer efectiva la exigencia de la Directiva 96/61/CE de coordinar los procedimientos de concesión de este tipo de permisos cuando intervengan varias Administraciones públicas.

## 4

En el Título II se regulan los valores límite de emisión y las mejores técnicas disponibles, uno de los aspectos esenciales de la Directiva que se incorpora mediante esta Ley.

En este sentido, y de acuerdo con lo exigido en la citada Directiva, se establece que en la autorización ambiental integrada se deberán fijar los valores límite de emisión de las sustancias contaminantes, en particular de las enumeradas en el anejo 3, teniendo en cuenta las mejores técnicas disponibles (pero sin prescribir una tecnología concreta), las características técnicas de la instalación y su localización geográfica.

Igualmente, se contempla expresamente la posibilidad de que en la determinación de los valores límite de emisión puedan también tenerse en consideración los planes nacionales de carácter sectorial que se hayan aprobado para cumplir compromisos internacionales adoptados por España, así como Tratados suscritos por el Estado español o por la Unión Europea, como puede ser el caso de los que se deriven de la aplicación de la Directiva de Techos Nacionales de Emisión (conocida como «Directiva NEC») y de la nueva Directiva de grandes instalaciones de combustión, así como de los compromisos que asuma el Estado español en materia de cambio climático.

Igualmente, y también de conformidad con la Directiva 96/61/CE, se faculta para establecer reglamentariamente valores límite de emisión, así como parámetros o medidas técnicas equivalentes que los sustituyan, para determinadas sustancias o para categorías específicas de instalaciones, si bien mientras tanto se aplicarán los establecidos en la legislación sectorial actualmente vigente, que se enumera en el anejo 2.

Por último, se regulan en este Título los mecanismos de intercambio de información entre el Ministerio de

Medio Ambiente y las Comunidades Autónomas sobre las principales emisiones contaminantes y sus focos y sobre las mejores técnicas disponibles, con la finalidad de conseguir una mejor aplicación de esta Ley y de elaborar un inventario estatal de emisiones que tendrá que enviarse a la Comisión Europea de conformidad con lo establecido en la normativa comunitaria.

## 5

El Título III es uno de los pilares esenciales sobre los que descansa la estructura de esta Ley, en la medida en que regula el régimen jurídico de la autorización ambiental integrada, la nueva figura autonómica de intervención ambiental que se crea para la protección del medio ambiente en su conjunto y que sustituye a las autorizaciones ambientales existentes hasta el momento, circunstancia que le atribuye un valor añadido, en beneficio de los particulares, por su condición de mecanismo de simplificación administrativa.

En este sentido, se articula un procedimiento administrativo complejo que integra todas las autorizaciones ambientales existentes relativas a producción y gestión de residuos, incluidas las de incineración, vertidos a las aguas continentales y desde tierra al mar, así como otras exigencias de carácter ambiental contenidas en la legislación sectorial, incluidas las referidas a los compuestos orgánicos volátiles, de acuerdo con la Directiva 1999/13/CE, del Consejo, de 11 de marzo.

Desde el punto de vista estrictamente procedimental, en todos aquellos aspectos no regulados en esta Ley, el otorgamiento de la autorización ambiental integrada se ajustará a lo establecido en la Ley 30/1992, de 26 de noviembre, de Régimen Jurídico de las Administraciones Públicas y del Procedimiento Administrativo Común. De acuerdo con ello, se establece un procedimiento que comprenderá los siguientes trámites: análisis previo de la documentación presentada y, en su caso, requerimiento al solicitante para que, en el plazo de diez días, subsane la falta o acompañe los documentos preceptivos exigidos según lo establecido en el artículo 12 de esta Ley; información pública; solicitud de informes y declaración de impacto ambiental, en su caso; propuesta de resolución; audiencia a los interesados; traslado a los órganos competentes para emitir informes vinculantes en trámites anteriores; resolución y, finalmente, notificación y publicación.

Según el anterior esquema procedimental, la solicitud de la autorización ambiental integrada se presenta ante el órgano designado por la Comunidad Autónoma en la que se ubique la instalación, e incluye un trámite de información pública que, por evidentes razones de eficacia y simplificación administrativa, será común para todos los procedimientos cuyas actuaciones se integran en la misma, y que se hace extensivo incluso a otros Estados miembros en el caso de actividades con efectos ambientales negativos de alcance transfronterizo.

El plazo máximo para resolver las solicitudes de estas autorizaciones será de diez meses, pasado el cual sin haberse notificado resolución expresa se entenderán desestimadas, debido a que en el artículo 8 de la Directiva 96/61/CE se exige de forma expresa que este tipo de instalaciones cuenten con un permiso escrito en el que se incluya el condicionado ambiental de su funcionamiento, lo que impide la aplicación del silencio positivo. Además de ello, no debe desconocerse que la técnica administrativa del silencio y de los actos presuntos no es sino una ficción jurídica que se establece en favor de los interesados para que, ante la inactividad de la Administración, tengan abiertas las vías de impugnación que resulten procedentes, pues resulta evidente que las Administraciones públicas, en este caso las Comunida-

des Autónomas, están obligadas a dictar resolución expresa para poner fin al procedimiento, de conformidad con el artículo 42 de la Ley 30/1992, de 26 de noviembre, de Régimen Jurídico de las Administraciones Públicas y del Procedimiento Administrativo Común.

En cuanto a su duración, las autorizaciones ambientales integradas se concederán por un plazo máximo de ocho años y se renovarán por períodos sucesivos, previa solicitud del interesado, con la peculiaridad de que, en estos casos, si el órgano competente no contesta a la solicitud de renovación de la autorización dentro del plazo, ésta se entenderá estimada por silencio positivo.

Por otro lado, y de acuerdo con la Directiva 96/61/CE, se establecen determinadas obligaciones en el caso de que se produzcan modificaciones en la instalación con posterioridad a su autorización, de tal forma que si tal modificación tiene la consideración de sustancial no se podrá llevar a cabo hasta contar con una nueva autorización ambiental integrada, mientras que en el resto de los casos bastará con una comunicación al órgano autonómico competente.

No obstante, el elevado nivel de protección del medio ambiente en su conjunto que se pretende alcanzar con esta Ley exige que, además, la autorización ambiental integrada pueda ser modificada de oficio en aquellos supuestos en que, aun sin modificarse las condiciones técnicas de la instalación, la contaminación que produzca haga conveniente revisar los valores límite de emisión como consecuencia de cambios en las mejores técnicas disponibles o cuando razones de seguridad hagan necesario emplear otras técnicas. Igualmente, podrá modificarse de oficio la autorización ambiental integrada cuando el organismo de cuenca correspondiente estime que concurren causas para ello, de acuerdo con lo establecido en la legislación de aguas. En tal caso, y cuando se trate de cuencas intercomunitarias, el requerimiento del organismo de cuenca estatal para efectuar la modificación tendrá carácter vinculante para el órgano autonómico.

Evidentemente, las anteriores causas de modificación de la autorización ambiental integrada son independientes de la posibilidad de revocación total o parcial de la misma tras la incoación del correspondiente expediente sancionador, y no darán derecho a indemnización alguna.

## 6

En cuanto a los efectos de la autorización ambiental integrada, está claro que mediante la misma únicamente se fijan las condiciones exigibles, desde el punto de vista ambiental, para la explotación de las instalaciones afectadas, por lo que se otorga con carácter previo al de otras autorizaciones o licencias sustantivas exigibles, como las reguladas en el artículo 4.2 de la Ley 21/1992, de 16 de julio, de Industria, y la licencia municipal de actividades clasificadas regulada en el Decreto 2414/1961, de 30 de noviembre, o en la normativa autonómica que resulte de aplicación, que permanecen vigentes, aunque también se establecen diversos mecanismos de coordinación con la autorización ambiental integrada, atendiendo a lo exigido en la Directiva 96/61/CE, por el hecho de que intervengan varias Administraciones.

Así, es evidente que la gran mayoría de los trámites del procedimiento de la licencia municipal de actividades clasificadas, o de la figura de intervención establecida en esta materia por las Comunidades Autónomas, encajan de una forma casi literal en el procedimiento de otorgamiento de la autorización ambiental integrada, por lo que resulta lógico integrar todos estos trámites en un

solo procedimiento, siempre que quede garantizada la participación local en lo referente a materias de su exclusiva competencia y al pronunciamiento final de la autoridad municipal sobre la concesión de la mencionada licencia, por respeto a la garantía constitucional del derecho a la autonomía local.

En este sentido, se establece que todos los trámites de esta licencia municipal, incluido el de la presentación de la correspondiente solicitud y con excepción de la resolución final de la autoridad municipal, se integran en el procedimiento de otorgamiento de la autorización ambiental integrada, cuyo condicionado ambiental será, en todo caso, vinculante para la autoridad municipal en todos los aspectos ambientales recogidos en aquélla. No obstante, se garantiza la participación municipal en un doble momento, de tal forma que, por un lado, entre la documentación de la solicitud de la autorización ambiental integrada figura necesariamente un informe del Ayuntamiento que acredite la compatibilidad del proyecto con el planeamiento urbanístico, y, por otro, dentro del procedimiento se incluye un informe preceptivo del mismo Ayuntamiento sobre los aspectos de la instalación que sean de su competencia, teniendo en cuenta, además, que, como ha quedado dicho, se mantiene en todo caso el pronunciamiento final de la autoridad municipal sobre la propia concesión de la licencia.

Las anteriores medidas de coordinación de la autoridad ambiental integrada con la licencia municipal de actividades clasificadas se dictan, no obstante, sin perjuicio de las normas dictadas por las Comunidades Autónomas en esta materia, que serán aplicables en todo caso.

## 7

Los mecanismos de coordinación de la autorización ambiental integrada con otros procedimientos de intervención administrativa en los que intervienen distintas autoridades ambientales se extienden, también, a los supuestos en los que la puesta en marcha de las instalaciones afectadas impliquen la realización de vertidos a las aguas continentales de cuencas intercomunitarias, en los que la competencia corresponde a la Administración General del Estado de conformidad con el artículo 149.1.22.<sup>a</sup> de la Constitución.

En estos casos, la resolución administrativa en la que se plasmaba la autorización de vertidos, que hasta el momento venían otorgando las Confederaciones Hidrográficas, de conformidad con lo establecido en la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas, se traslada a la autorización ambiental integrada que otorgan las Comunidades Autónomas, de acuerdo con esta Ley, pero sin que en ningún momento ello signifique una merma de las competencias que ostenta el Estado en esta materia, dado que el organismo de cuenca estatal debe emitir un informe sobre la admisibilidad del vertido o, en su caso, sobre sus características, condiciones y medidas correctoras, que tendrá carácter vinculante para el órgano autonómico competente para otorgar la autorización ambiental integrada.

Por otro lado, la Ley contempla mecanismos de colaboración interadministrativa para los casos en que el anterior informe vinculante no sea emitido dentro del plazo, de tal forma que, por un lado, se le concede un nuevo plazo a requerimiento urgente del órgano autonómico, y, por otro, se admite que aunque el mencionado informe sea emitido fuera de plazo deba ser tenido en cuenta siempre que se reciba antes del otorgamiento de la autorización ambiental integrada. Evidentemente, si transcurridos todos los plazos anteriores, el organismo de cuenca no ha emitido su informe, no pueden paralizarse las actuaciones por una causa que, en todo caso, no sería imputable al solicitante, por lo que la Ley esta-

blece que, si así ocurriera, las características del vertido y las medidas correctoras serían fijadas por el órgano autonómico en la autorización ambiental integrada de conformidad con la legislación sectorial aplicable. Todo ello sin perjuicio de que, en este último caso, el organismo de cuenca podría, además, instar la modificación de la autorización ambiental integrada conforme al mecanismo previsto en el artículo 26.1.d) de esta Ley.

Como es obvio, las anteriores medidas suponen una modificación puntual de la Ley de Aguas, tal como se establece en la disposición final segunda, en la que se indica expresamente que la autorización de vertido a las aguas continentales de cuencas intercomunitarias se sustituirá por la emisión del informe preceptivo y vinculante del organismo de cuenca estatal regulado en esta Ley.

No obstante, la anterior regulación no afecta al régimen económico financiero ni al resto de competencias estatales en materia de protección del dominio público hidráulico, como las relativas a la vigilancia e inspección o al ejercicio de la potestad sancionadora, de acuerdo con la disposición final primera. En este sentido, cuando las características del vertido hayan sido fijadas por el órgano autonómico, por no haberse emitido el informe vinculante del organismo de cuenca, éste liquidará el canon de control de vertidos de acuerdo con las condiciones establecidas en la autorización ambiental integrada que, a estos efectos, deberá ser puesta a disposición de aquél por el órgano autonómico competente para otorgarla.

## 8

Finalmente, otro mecanismo de integración y simplificación administrativa, siguiendo las pautas marcadas en la Directiva 96/61/CE, es la posibilidad de que las Comunidades Autónomas incluyan en el procedimiento de otorgamiento de la autorización ambiental integrada las actuaciones en materia de evaluación ambiental que resulten de su competencia y las exigidas por la normativa sobre riesgos de accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas, y aquellas otras previstas en su normativa ambiental.

Igualmente, cuando corresponda a la Administración General del Estado la competencia para formular la declaración de impacto ambiental se remitirá una copia de la misma al órgano autonómico, que deberá incorporar su contenido a la autorización ambiental integrada. En estos casos, además, se reconoce expresamente la posibilidad de utilizar fórmulas de colaboración con las Comunidades Autónomas mediante figuras como, entre otras, la encomienda de gestión regulada en el artículo 15 de la Ley 30/1992, de 26 de noviembre, de Régimen Jurídico de las Administraciones Públicas y del Procedimiento Administrativo Común.

## 9

Ante un procedimiento tan complejo para otorgar la autorización ambiental integrada, que coordina e integra diferentes actos administrativos de Administraciones diversas, ha sido preciso establecer un régimen singular de impugnación para los supuestos en los que se hayan emitido informes vinculantes.

De esta forma, cuando un informe preceptivo y vinculante impidiese el otorgamiento de la autorización, dicho informe podrá ser recurrido, en vía judicial o administrativa, según corresponda, independientemente de la resolución que ponga fin al procedimiento y, por tanto, contra la misma Administración que lo hubiera emitido, de conformidad con lo establecido en el artículo 107.1 de la Ley 30/1992, de 26 de noviembre, de Régimen

Jurídico de las Administraciones Públicas y del Procedimiento Administrativo Común, respecto de la impugnación de los actos de trámite que deciden directa o indirectamente sobre el fondo del asunto en un procedimiento.

En cambio, cuando el informe vinculante sea favorable pero sujete la autorización a condiciones con las que no estuviera de acuerdo el solicitante, éstas estarán necesariamente incorporadas en la resolución que ponga fin al procedimiento mediante el otorgamiento de la autorización ambiental integrada, por lo que si el recurso que procediera tuviera carácter administrativo se interpondrá directamente contra dicha resolución del órgano autonómico, que deberá dar traslado del recurso al órgano que hubiera informado, puesto que es, en definitiva, el que ha fijado las condiciones con las que no está de acuerdo el recurrente y, por tanto, quien debe pronunciarse sobre este aspecto del recurso. En el caso de que dicho órgano informante emitiera alegaciones en el plazo de quince días, tales alegaciones serán vinculantes para el órgano administrativo que debe resolver el recurso.

Por último, cuando en el recurso contencioso-administrativo que se pudiera interponer contra la resolución del órgano autonómico que pusiera fin a la vía administrativa se dedujeran pretensiones que afecten a los informes preceptivos y vinculantes, se establece que la Administración que los hubiera emitido tendrá la consideración de codemandada, conforme al artículo 21.1.a) de la Ley 29/1998, de 13 de julio, reguladora de la Jurisdicción Contencioso-Administrativa, a fin de posibilitar la defensa de la legalidad de los citados informes por la propia Administración autora de los mismos, así como su disposición del objeto del proceso a través de figuras como el allanamiento o la transacción judicial.

Como se aprecia, el anterior régimen jurídico de impugnación cobra una especial relevancia cuando en el funcionamiento de las instalaciones afectadas se producen vertidos a las aguas continentales de cuencas intercomunitarias, en la medida en que permite salvaguardar la competencia estatal en esta materia.

## 10

Por lo que respecta al régimen sancionador, se ha tipificado un régimen específico de infracciones y sanciones, sin perjuicio de lo establecido en la legislación sectorial, que seguirá siendo aplicable. No obstante, en aquellos supuestos donde de unos mismos hechos y fundamentos jurídicos pudiera derivarse una concurrencia entre las sanciones previstas en esta Ley y las de la legislación sectorial aplicable, se impondrá la de mayor gravedad.

La Ley prevé igualmente la obligación de reposición de la situación alterada a su estado anterior, así como el pago de la correspondiente indemnización por los daños y perjuicios que, en su caso, se hayan irrogado, con la determinación expresa de que cuando tales daños se hayan causado a las Administraciones públicas, la indemnización que corresponda se determinará y recaudará en vía administrativa. Además de ello, se establece que la resolución que ponga fin al procedimiento sancionador podrá determinar tanto la obligación de reponer como la de tener que indemnizar los daños y perjuicios, y cuando no se hubiese determinado tal circunstancia se podrá llevar a cabo mediante un procedimiento administrativo complementario.

Asimismo, se contempla la posibilidad de imponer multas coercitivas en caso de incumplimiento de la obligación de reponer la situación alterada a su estado anterior.

## 11

Por otro lado, en esta Ley se incorporan también todos aquellos aspectos de la Directiva 1999/13/CE, del Consejo, de 11 de marzo, relativa a las emisiones de compuestos orgánicos volátiles debidas al uso de disolventes orgánicos en determinadas actividades e instalaciones, que están supeditados al principio de reserva de Ley, con la finalidad de que, en vía reglamentaria, se pueda hacer una correcta incorporación de los aspectos técnicos de la mencionada Directiva.

En este sentido, en la disposición final quinta se faculta al Gobierno para determinar que determinadas actividades no incluidas en las categorías del anejo 1 puedan quedar sometidas a notificación y registro por parte de la Comunidad Autónoma donde se ubiquen. En tal caso, se fijarían también los requisitos a los que deberá ajustarse el funcionamiento de dichas actividades y si se produjeran incumplimientos por parte de los titulares se aplicará el régimen sancionador establecido en esta Ley, con excepción, como es obvio, de los preceptos relativos a la exigencia de la autorización ambiental integrada, debido a que éstas actividades únicamente estarían sometidas a notificación y registro autonómico.

Además de lo anterior, en el anejo 2 se incluye la normativa reguladora de los compuestos orgánicos volátiles entre la que se tomará como referencia para aplicar niveles límite de emisión mínimos, en ausencia de regulación específica y de acuerdo con el artículo 7.2, ya que tal mención no figuraba en el anejo 2 de la Directiva 96/61/CE por haberse aprobado con anterioridad a la mencionada Directiva 1999/13/CE.

## 12

En la parte final de la Ley se incluyen, en primer término, dos disposiciones adicionales referidas respectivamente a la colaboración con las Comunidades Autónomas en materia de evaluación de impacto ambiental y al régimen sancionador relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono.

Esta última previsión, recogida en la disposición adicional segunda, viene impuesta por el Reglamento (CE) 2037/2000, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 29 de junio, sobre las sustancias que agotan la capa de ozono, cuyo artículo 21 dispone que «los Estados miembros determinarán las sanciones necesarias aplicables a las infracciones del presente Reglamento».

Las conductas objeto de sanción a que se refiere el citado Reglamento encuentran cobertura legal en los tipos de infracción establecidos en la Ley Orgánica 12/1995, de 12 de diciembre, de represión del contrabando, que en su artículo 1 define «géneros prohibidos» como todos aquellos cuya importación, exportación, circulación, tenencia, comercio o producción esté prohibida expresamente por disposición con rango de ley o por reglamento de la Unión Europea. La tipificación recogida en su artículo 2 se refiere, asimismo, a quienes «realicen operaciones de importación, exportación, producción, comercio, tenencia, circulación o rehabilitación de géneros estancados o prohibidos, sin cumplir los requisitos establecidos por las leyes».

## 13

El carácter integrador de la nueva autorización ambiental que se crea con esta Ley hace necesario derogar las diferentes normas sectoriales en las que se regulan autorizaciones ambientales de competencia autonómica, enumeradas en la disposición derogatoria, si bien úni-

camente en aquellos aspectos que se regulan en esta Ley, incluyéndolos en la autorización ambiental integrada, esto es, en lo referente a los procedimientos de solicitud, concesión, revisión y cumplimiento de las respectivas autorizaciones, por lo que permanecen vigentes los demás preceptos de la mencionada legislación sectorial que regulan el resto de medidas del régimen de intervención ambiental en cada una de las materias.

En concreto, las autorizaciones ambientales que resultan derogadas a la entrada en vigor de esta Ley son las de producción y gestión de residuos, incluidas las de incineración, vertidos a las aguas continentales de cuencas intracomunitarias y vertidos al dominio público marítimo-terrestre, desde tierra al mar, y contaminación atmosférica. Además de ello, y por exigencias de la Directiva 96/61/CE, se deroga el régimen de excepciones en materia de vertido de sustancias peligrosas.

Del mismo modo, se produce una modificación puntual de la Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos, debido a que esta última excluye, con carácter básico, a las actividades de gestión de residuos urbanos realizadas por los Entes locales del régimen de autorización administrativa exigido, con carácter general, a las actividades de valorización y eliminación de residuos. Por el contrario, en el anejo 1 de la Directiva 96/61/CE se incluyen todos los vertederos que reciban más de diez toneladas diarias o que tengan una capacidad de más de veinticinco mil toneladas, con exclusión de los vertederos de residuos inertes, sin prever ninguna excepción para los vertederos de residuos urbanos, por lo que debe entenderse que también en estos casos será exigible el permiso escrito establecido en el artículo 8 de la mencionada directiva y, consecuentemente, la autorización ambiental integrada regulada en esta Ley.

Igualmente, se modifica la Ley 38/1972, de 22 de diciembre, de protección del ambiente atmosférico, para adecuar el importe de las sanciones previstas en la misma a las cuantías establecidas en la legislación ambiental recientemente aprobada.

Por último, esta Ley tiene la consideración de legislación básica sobre protección del medio ambiente, de conformidad con lo establecido en el artículo 149.1.23.<sup>a</sup> de la Constitución.

## TÍTULO I

## Disposiciones generales

Artículo 1. *Objeto.*

Esta Ley tiene por objeto evitar o, cuando ello no sea posible, reducir y controlar la contaminación de la atmósfera, del agua y del suelo, mediante el establecimiento de un sistema de prevención y control integrados de la contaminación, con el fin de alcanzar una elevada protección del medio ambiente en su conjunto.

Artículo 2. *Ámbito de aplicación.*

Sin perjuicio de lo establecido en la disposición final quinta, esta Ley será aplicable a las instalaciones de titularidad pública o privada en las que se desarrolle alguna de las actividades industriales incluidas en las categorías enumeradas en el anejo 1, con excepción de las instalaciones o partes de las mismas utilizadas para la investigación, desarrollo y experimentación de nuevos productos y procesos.

### Artículo 3. *Definiciones.*

A efectos de lo dispuesto en esta Ley, se entenderá por:

a) «Autorización ambiental integrada»: es la resolución del órgano competente de la Comunidad Autónoma en la que se ubique la instalación, por la que se permite, a los solos efectos de la protección del medio ambiente y de la salud de las personas, explotar la totalidad o parte de una instalación, bajo determinadas condiciones destinadas a garantizar que la misma cumple el objeto y las disposiciones de esta Ley. Tal autorización podrá ser válida para una o más instalaciones o partes de instalaciones que tengan la misma ubicación y sean explotadas por el mismo titular.

b) «Autorizaciones sustantivas»: las autorizaciones de industrias o instalaciones industriales que estén legal o reglamentariamente sometidas a autorización administrativa previa, de conformidad con el artículo 4 de la Ley 21/1992, de 16 de julio, de Industria. En particular, tendrán esta consideración las autorizaciones establecidas en la Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del Sector Eléctrico; en la Ley 34/1998, de 7 de octubre, del Sector de Hidrocarburos, y en el capítulo II de la Ley Orgánica 1/1992, de 21 de febrero, sobre protección de la seguridad ciudadana, en lo referente a las instalaciones químicas para la fabricación de explosivos.

c) «Instalación»: cualquier unidad técnica fija en donde se desarrolle una o más de las actividades industriales enumeradas en el anejo 1 de la presente Ley, así como cualesquiera otras actividades directamente relacionadas con aquellas que guarden relación de índole técnica con las actividades llevadas a cabo en dicho lugar y puedan tener repercusiones sobre las emisiones y la contaminación.

d) «Instalación existente»: cualquier instalación en funcionamiento y autorizada con anterioridad a la fecha de entrada en vigor de la presente Ley, o que haya solicitado las correspondientes autorizaciones exigibles por la normativa aplicable, siempre que se ponga en funcionamiento a más tardar doce meses después de dicha fecha.

e) «Modificación sustancial»: cualquier modificación realizada en una instalación que en opinión del órgano competente para otorgar la autorización ambiental integrada y de acuerdo con los criterios establecidos en el artículo 10.2 pueda tener repercusiones perjudiciales o importantes en la seguridad, la salud de las personas o el medio ambiente.

f) «Modificación no sustancial»: cualquier modificación de las características o del funcionamiento, o de la extensión de la instalación, que, sin tener la consideración de sustancial, pueda tener consecuencias en la seguridad, la salud de las personas o el medio ambiente.

g) «Titular»: cualquier persona física o jurídica que explote o posea la instalación.

h) «Órgano competente para otorgar la autorización ambiental integrada»: el órgano designado por la Comunidad Autónoma en la que se ubique la instalación objeto de la autorización. En tanto no se produzca una designación específica por parte de la Comunidad Autónoma, se entenderá competente el órgano de dicha Administración que ostente las competencias en materia de medio ambiente.

i) «Contaminación»: la introducción directa o indirecta, mediante la actividad humana, de sustancias, vibraciones, calor o ruido en la atmósfera, el agua o el suelo, que puedan tener efectos perjudiciales para la salud humana o la calidad del medio ambiente, o que puedan causar daños a los bienes materiales o deteriorar o perjudicar el disfrute u otras utilidades legítimas del medio ambiente.

j) «Sustancia»: los elementos químicos y sus compuestos con la excepción de las sustancias radioactivas reguladas en la Ley 25/1964, de 29 de abril, sobre Energía Nuclear, y de los organismos modificados genéticamente regulados en la Ley 15/1994, de 3 de junio, por la que se establece el régimen jurídico de la utilización confinada, liberación voluntaria y comercialización de organismos modificados genéticamente, a fin de prevenir los riesgos para la salud humana y el medio ambiente, y en sus correspondientes normas de desarrollo o normativa que las sustituya.

k) «Emisión»: la expulsión a la atmósfera, al agua o al suelo de sustancias, vibraciones, calor o ruido procedentes de forma directa o indirecta de fuentes puntuales o difusas de la instalación.

l) «Valores límite de emisión»: la masa o la energía expresada en relación con determinados parámetros específicos, la concentración o el nivel de una emisión, cuyo valor no debe superarse dentro de uno o varios períodos determinados. Los valores límite de emisión de las sustancias se aplicarán generalmente en el punto en que las emisiones salgan de la instalación y en su determinación no se tendrá en cuenta una posible dilución. En lo que se refiere a los vertidos indirectos al agua, y sin perjuicio de la normativa relativa a la contaminación causada por determinadas sustancias peligrosas vertidas en el medio acuático, podrá tenerse en cuenta el efecto de una estación de depuración en el momento de determinar los valores límite de emisión de la instalación, siempre y cuando se alcance un nivel equivalente de protección del medio ambiente en su conjunto y ello no conduzca a cargas contaminantes más elevadas en el entorno.

m) «Normas de calidad medioambiental»: el conjunto de requisitos establecidos por la normativa aplicable que deben cumplirse en un momento dado en un entorno determinado o en una parte determinada de éste.

n) «Parámetros o medidas técnicas equivalentes»: parámetros o medidas de referencia que, con carácter supletorio o complementario, se considerarán cuando las características de la instalación no permitan una determinación adecuada de valores límite de emisión o cuando no exista normativa aplicable.

ñ) «Mejores técnicas disponibles»: la fase más eficaz y avanzada de desarrollo de las actividades y de sus modalidades de explotación, que demuestren la capacidad práctica de determinadas técnicas para constituir, en principio, la base de los valores límite de emisión destinados a evitar o, cuando ello no sea posible, reducir en general las emisiones y el impacto en el conjunto del medio ambiente y de la salud de las personas. Para su determinación se deberán tomar en consideración los aspectos que se enumeran en el anejo 4 de esta Ley.

A estos efectos, se entenderá por:

«Técnicas»: la tecnología utilizada, junto con la forma en que la instalación esté diseñada, construida, mantenida, explotada o paralizada.

«Disponibles»: las técnicas desarrolladas a una escala que permita su aplicación en el contexto del correspondiente sector industrial, en condiciones económicas y técnicamente viables, tomando en consideración los costes y los beneficios, tanto si las técnicas se utilizan o producen en España, como si no, siempre que el titular pueda tener acceso a ellas en condiciones razonables.

«Mejores»: las técnicas más eficaces para alcanzar un alto nivel general de protección del medio ambiente en su conjunto y de la salud de las personas.

#### Artículo 4. *Principios informadores de la autorización ambiental integrada.*

1. Al otorgar la autorización ambiental integrada, el órgano competente deberá tener en cuenta que en el funcionamiento de las instalaciones:

a) Se adopten las medidas adecuadas para prevenir la contaminación, particularmente mediante la aplicación de las mejores técnicas disponibles.

b) Se evite la producción de residuos o, si esto no fuera posible, se gestionen mediante procedimientos de valorización, preferentemente mediante reciclado o reutilización. En el supuesto de que tampoco fuera factible la aplicación de dichos procedimientos, por razones técnicas o económicas, los residuos se eliminarán de forma que se evite o reduzca al máximo su repercusión en el medio ambiente, de acuerdo con la normativa aplicable en la materia.

c) Se utilice la energía, el agua, las materias primas y otros recursos de manera eficiente.

d) Se adopten las medidas necesarias para prevenir los accidentes graves y limitar sus consecuencias sobre la salud de las personas y el medio ambiente, de acuerdo con la normativa aplicable.

e) Se establezcan las medidas necesarias para evitar cualquier riesgo de contaminación cuando cese la explotación de la instalación y para que el lugar donde se ubique quede en un estado satisfactorio de acuerdo con la normativa aplicable.

2. Los órganos competentes deberán tener en cuenta los principios anteriores al establecer las condiciones de la autorización ambiental integrada regulada en el Título III de esta Ley.

#### Artículo 5. *Obligaciones de los titulares de las instalaciones.*

Los titulares de las instalaciones en donde se desarrolle alguna de las actividades industriales incluidas en el ámbito de aplicación de esta Ley deberán:

a) Disponer de la autorización ambiental integrada y cumplir las condiciones establecidas en la misma.

b) Cumplir las obligaciones de control y suministro de información previstas por la legislación sectorial aplicable y por la propia autorización ambiental integrada.

c) Comunicar al órgano competente para otorgar la autorización ambiental integrada cualquier modificación, sustancial o no, que se proponga realizar en la instalación.

d) Comunicar al órgano competente para otorgar la autorización ambiental integrada la transmisión de su titularidad.

e) Informar inmediatamente al órgano competente para otorgar la autorización ambiental integrada de cualquier incidente o accidente que pueda afectar al medio ambiente.

f) Prestar la asistencia y colaboración necesarias a quienes realicen las actuaciones de vigilancia, inspección y control.

g) Cumplir cualesquiera otras obligaciones establecidas en esta Ley y demás disposiciones que sean de aplicación.

#### Artículo 6. *Cooperación interadministrativa.*

Para la aplicación de esta Ley, las Administraciones públicas ajustarán sus actuaciones a los principios de información mutua, cooperación y colaboración. En particular, deberán prestarse la debida asistencia para asegurar la eficacia y coherencia de sus actuaciones, especialmente en la tramitación de la autorización ambiental integrada.

## TÍTULO II

### Valores límite de emisión y mejores técnicas disponibles

#### Artículo 7. *Valores límite de emisión y medidas técnicas equivalentes.*

1. Para la determinación en la autorización ambiental integrada de los valores límite de emisión, se deberá tener en cuenta:

a) La información suministrada, de acuerdo con lo establecido en el artículo 8.1, por la Administración General del Estado sobre las mejores técnicas disponibles, sin prescribir la utilización de una técnica o tecnología específica.

b) Las características técnicas de las instalaciones en donde se desarrolle alguna de las actividades industriales enumeradas en el anejo 1, su implantación geográfica y las condiciones locales del medio ambiente.

c) La naturaleza de las emisiones y su potencial traslado de un medio a otro.

d) Los planes nacionales aprobados, en su caso, para dar cumplimiento a compromisos establecidos en la normativa comunitaria o en tratados internacionales suscritos por el Estado español o por la Unión Europea.

e) La incidencia de las emisiones en la salud humana potencialmente afectada y en las condiciones generales de la sanidad animal.

f) Los valores límite de emisión fijados, en su caso, por la normativa en vigor en la fecha de la autorización.

2. El Gobierno, sin perjuicio de las normas adicionales de protección que dicten las Comunidades Autónomas, podrá establecer valores límite de emisión para las sustancias contaminantes, en particular para las enumeradas en el anejo 3, y para las actividades industriales incluidas en el ámbito de aplicación de esta Ley. Mientras no se fijen tales valores deberán cumplirse, como mínimo, los establecidos en las normas enumeradas en el anejo 2 y, en su caso, en las normas adicionales de protección dictadas por las Comunidades Autónomas.

3. El Gobierno, en el ejercicio de su potestad reglamentaria, y sin perjuicio de las normas adicionales de protección que dicten las Comunidades Autónomas, podrá establecer, de manera motivada, obligaciones particulares para determinadas actividades enumeradas en el anejo 1, que sustituirán a las condiciones específicas de la autorización ambiental integrada, siempre que se garantice un nivel equivalente de protección del medio ambiente en su conjunto. En todo caso, el establecimiento de dichas obligaciones no eximirá de obtener la autorización ambiental integrada.

4. En los supuestos que reglamentariamente se determinen, se podrán establecer parámetros o medidas técnicas de carácter equivalente que complementen o sustituyan a los valores límite de emisión regulados en este artículo.

#### Artículo 8. *Información, comunicación y acceso a la información.*

1. La Administración General del Estado suministrará a las Comunidades Autónomas la información que obre en su poder sobre las mejores técnicas disponibles, sus prescripciones de control y su evolución y, en su caso, elaborará guías sectoriales sobre las mismas y su aplicación para la determinación de los valores límite de emisión.

2. Cada Comunidad Autónoma deberá disponer de información sistematizada sobre:

a) Las principales emisiones y los focos de las mismas.

b) Los valores límite de emisión autorizados, así como las mejores técnicas disponibles, las características técnicas de la instalación y las condiciones locales del medio ambiente en que se hayan basado dichos valores y demás medidas que, en su caso, se hayan establecido en las autorizaciones ambientales integradas concedidas.

3. Los titulares de las instalaciones notificarán, al menos una vez al año, a las Comunidades Autónomas en las que estén ubicadas, los datos sobre las emisiones correspondientes a la instalación.

4. Las Comunidades Autónomas remitirán la anterior información al Ministerio de Medio Ambiente en el plazo máximo de tres meses desde la entrada en vigor de esta Ley, y posteriormente con una periodicidad mínima anual, a efectos de la elaboración del Inventario Estatal de Emisiones y su comunicación a la Comisión Europea, de conformidad con el artículo 10 de la Ley 30/1992, de 26 de noviembre, de Régimen Jurídico de las Administraciones Públicas y del Procedimiento Administrativo Común, modificada por la Ley 4/1999, de 13 de enero.

5. La información regulada en este artículo será pública de acuerdo con lo previsto en la Ley 38/1995, de 12 de diciembre, sobre el derecho de acceso a la información en materia de medio ambiente.

## TÍTULO III

### Régimen jurídico de la autorización ambiental integrada

#### CAPÍTULO I

##### Finalidad y aplicación

Artículo 9. *Instalaciones sometidas a la autorización ambiental integrada.*

Se somete a autorización ambiental integrada la construcción, montaje, explotación o traslado, así como la modificación sustancial, de las instalaciones en las que se desarrollen alguna de las actividades incluidas en el anejo 1.

Artículo 10. *Modificación de la instalación.*

1. La modificación de una instalación sometida a autorización ambiental integrada podrá ser sustancial o no sustancial.

2. A fin de calificar la modificación de una instalación como sustancial se tendrá en cuenta la mayor incidencia de la modificación proyectada sobre la seguridad, la salud de las personas y el medio ambiente, en los siguientes aspectos:

- El tamaño y producción de la instalación.
- Los recursos naturales utilizados por la misma.
- Su consumo de agua y energía.
- El volumen, peso y tipología de los residuos generados.
- La calidad y capacidad regenerativa de los recursos naturales de las áreas geográficas que puedan verse afectadas.
- El grado de contaminación producido.
- El riesgo de accidente.
- La incorporación o aumento en el uso de sustancias peligrosas.

3. El titular de una instalación que pretenda llevar a cabo una modificación de la misma deberá comunicarlo al órgano competente para otorgar la autorización ambiental integrada, indicando razonadamente, en atención a los criterios señalados en el apartado anterior, si considera que se trata de una modificación sustancial o no sustancial. A esta comunicación se acompañarán los documentos justificativos de las razones expuestas.

4. Cuando el titular de la instalación considere que la modificación proyectada no es sustancial podrá llevarla a cabo, siempre que el órgano competente para otorgar la autorización ambiental integrada no manifieste lo contrario en el plazo de un mes.

5. Cuando la modificación proyectada sea considerada por el propio titular o por el órgano competente de la Comunidad Autónoma como sustancial, ésta no podrá llevarse a cabo, en tanto no sea otorgada una nueva autorización ambiental integrada.

Artículo 11. *Finalidad de la autorización ambiental integrada.*

1. La finalidad de la autorización ambiental integrada es:

a) Establecer todas aquellas condiciones que garanticen el cumplimiento del objeto de esta Ley por parte de las instalaciones sometidas a la misma, a través de un procedimiento que asegure la coordinación de las distintas Administraciones públicas que deben intervenir en la concesión de dicha autorización para agilizar trámites y reducir las cargas administrativas de los particulares.

b) Disponer de un sistema de prevención y control de la contaminación, que integre en un solo acto de intervención administrativa todas las autorizaciones ambientales existentes en materia de producción y gestión de residuos, incluidas las de incineración de residuos municipales y peligrosos y, en su caso, las de vertido de residuos; de vertidos a las aguas continentales, incluidos los vertidos al sistema integral de saneamiento, y de vertidos desde tierra al mar, así como las determinaciones de carácter ambiental en materia de contaminación atmosférica, incluidas las referentes a los compuestos orgánicos volátiles.

2. El otorgamiento de la autorización ambiental integrada, así como la modificación a que se refiere el artículo 26 prece­derá en su caso a las demás autorizaciones sustantivas o licencias que sean obligatorias, entre otras:

a) Autorizaciones sustantivas de las industrias señaladas en el párrafo b) del artículo 3.

b) Licencia municipal de actividades clasificadas regulada en el Decreto 2414/1961, de 30 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de Actividades Molestas, Insalubres, Nocivas y Peligrosas, o en la normativa autonómica que resulte de aplicación, sin perjuicio de los mecanismos de coordinación establecidos en el capítulo III.

3. La autorización ambiental integrada se otorgará sin perjuicio de las autorizaciones o concesiones que deban exigirse para la ocupación o utilización del dominio público, de conformidad con lo establecido en la Ley de Aguas, texto refundido aprobado mediante Real Decreto legislativo 1/2001, de 20 de julio, y en la Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas, y demás normativa que resulte de aplicación.

Se exceptúan de lo establecido en este apartado, las autorizaciones de vertidos a las aguas continentales y al dominio público marítimo terrestre, desde tierra al mar, que se incluyen en la autorización ambiental integrada, de acuerdo con esta Ley.

4. Las Comunidades Autónomas dispondrán lo necesario para posibilitar la inclusión en el procedimiento de otorgamiento de la autorización ambiental integrada, de las siguientes actuaciones:

a) Las actuaciones en materia de evaluación de impacto ambiental, u otras figuras de evaluación ambiental previstas en la normativa autonómica, cuando así sea exigible y la competencia para ello sea de la Comunidad Autónoma.

b) Las actuaciones de los órganos que, en su caso, deban intervenir en virtud de lo establecido en el Real Decreto 1254/1999, de 16 de julio, sobre medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas.

c) Aquellas otras actuaciones que estén previstas en su normativa autonómica ambiental.

## CAPÍTULO II

### Solicitud y concesión de la autorización ambiental integrada

#### Artículo 12. *Contenido de la solicitud.*

1. La solicitud de la autorización ambiental integrada contendrá, al menos, la siguiente documentación, sin perjuicio de lo que a estos efectos determinen las Comunidades Autónomas:

a) Proyecto básico que incluya, al menos, los siguientes aspectos:

Descripción detallada y alcance de la actividad y de las instalaciones, los procesos productivos y el tipo de producto.

Documentación requerida para la obtención de la correspondiente licencia municipal de actividades clasificadas regulada en el Decreto 2414/1961, de 30 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de Actividades Molestas, Insalubres, Nocivas y Peligrosas, o en las disposiciones autonómicas que resulten de aplicación, sin perjuicio de lo establecido en el apartado 2 del artículo 29.

En caso de modificación sustancial de una instalación ya autorizada, la parte o partes de la misma afectadas por la referida modificación.

Estado ambiental del lugar en el que se ubicará la instalación y los posibles impactos que se prevean, incluidos aquellos que puedan originarse al cesar la explotación de la misma.

Recursos naturales, materias primas y auxiliares, sustancias, agua y energía empleadas o generadas en la instalación.

Fuentes generadoras de las emisiones de la instalación.

Tipo y cantidad de las emisiones previsibles de la instalación al aire, a las aguas y al suelo, así como, en su caso, tipo y cantidad de los residuos que se vayan a generar, y la determinación de sus efectos significativos sobre el medio ambiente.

Tecnología prevista y otras técnicas utilizadas para prevenir y evitar las emisiones procedentes de la instalación o, y si ello no fuera posible, para reducirlas.

Medidas relativas a la prevención, reducción y gestión de los residuos generados.

Sistemas y medidas previstos para reducir y controlar las emisiones y los vertidos.

Las demás medidas propuestas para cumplir los principios a los que se refiere el artículo 4 de la Ley.

Un breve resumen de las principales alternativas estudiadas por el solicitante, si las hubiera.

b) Informe del Ayuntamiento en cuyo territorio se ubique la instalación, acreditativo de la compatibilidad

del proyecto con el planeamiento urbanístico, de acuerdo con lo establecido en el artículo 15.

c) En su caso, la documentación exigida por la legislación de aguas para la autorización de vertidos a las aguas continentales y por la legislación de costas para la autorización de vertidos desde tierra al mar.

Cuando se trate de vertidos a las aguas continentales de cuencas intercomunitarias, esta documentación será inmediatamente remitida al organismo de cuenca por el órgano de la Comunidad Autónoma ante el que se haya presentado la solicitud, a fin de que manifieste si es preciso requerir al solicitante que subsane la falta o acompañe los documentos preceptivos.

d) La determinación de los datos que, a juicio del solicitante, gocen de confidencialidad de acuerdo con las disposiciones vigentes.

e) Cualquier otra documentación acreditativa del cumplimiento de requisitos establecidos en la legislación sectorial aplicable incluida, en su caso, la referida a fianzas o seguros obligatorios que sean exigibles de conformidad con la referida legislación sectorial.

f) Cualquier otra documentación e información que se determine en la normativa aplicable.

2. A la solicitud de la autorización ambiental integrada se acompañará un resumen no técnico de todas las indicaciones especificadas en los párrafos anteriores, para facilitar su comprensión a efectos del trámite de información pública.

3. En los supuestos previstos en el apartado 4 del artículo anterior, la solicitud de la autorización ambiental integrada incluirá, además, el estudio de impacto ambiental y demás documentación exigida por la legislación que resulte de aplicación.

#### Artículo 13. *Presentación de la solicitud.*

La solicitud de autorización ambiental integrada se presentará ante el órgano designado por la Comunidad Autónoma en cuyo ámbito territorial se ubique la instalación, sin perjuicio de lo establecido en el artículo 38.4 de la Ley 30/1992, de 26 de noviembre, de Régimen Jurídico de las Administraciones Públicas y del Procedimiento Administrativo Común.

En tanto no se produzca una designación específica por parte de la Comunidad Autónoma, la solicitud se presentará en el órgano de dicha Administración que ostente las competencias en materia de medio ambiente.

#### Artículo 14. *Tramitación.*

En todos aquellos aspectos no regulados en esta Ley, el procedimiento para otorgar la autorización ambiental integrada se ajustará a lo establecido en la Ley 30/1992, de 26 de noviembre, de Régimen Jurídico de las Administraciones Públicas y del Procedimiento Administrativo Común.

#### Artículo 15. *Informe urbanístico.*

Previa solicitud del interesado, el Ayuntamiento en cuyo territorio se ubique la instalación deberá emitir el informe al que se refiere el artículo 12.1.b) de esta Ley en el plazo máximo de treinta días. En caso de no hacerlo, dicho informe se suplirá con una copia de la solicitud del mismo.

En todo caso, si el informe urbanístico regulado en este artículo fuera negativo, con independencia del momento en que se haya emitido, pero siempre que se haya recibido en la Comunidad Autónoma con anterioridad al otorgamiento de la autorización ambiental integrada, el órgano competente para otorgar dicha autorización dictará resolución motivada poniendo fin al procedimiento y archivará las actuaciones.

#### Artículo 16. *Información pública.*

1. Una vez completada la documentación, de acuerdo con lo establecido en los artículos anteriores, se abrirá un período de información pública que no será inferior a treinta días.

2. El período de información pública será común para aquellos procedimientos cuyas actuaciones se integran en el de la autorización ambiental integrada así como, en su caso, para los procedimientos de autorizaciones sustantivas de las industrias señaladas en el párrafo b) del artículo 3.

3. Se exceptuarán del trámite de información pública aquellos datos de la solicitud que, de acuerdo con las disposiciones vigentes, gocen de confidencialidad.

#### Artículo 17. *Informes.*

Una vez concluido el período de información pública, el órgano competente para otorgar la autorización ambiental integrada remitirá copia del expediente, junto con las alegaciones y observaciones recibidas, a los órganos que deban pronunciarse sobre las diferentes materias de su competencia.

#### Artículo 18. *Informe del Ayuntamiento.*

El Ayuntamiento en cuyo territorio se ubique la instalación, una vez recibida la documentación a la que se refiere el artículo anterior emitirá, en el plazo de treinta días desde la recepción del expediente, un informe sobre la adecuación de la instalación analizada a todos aquellos aspectos que sean de su competencia. De no emitirse el informe en el plazo señalado se proseguirán las actuaciones. No obstante, el informe emitido fuera de plazo pero recibido antes de dictar resolución deberá ser valorado por el órgano competente de la Comunidad Autónoma.

#### Artículo 19. *Informe del organismo de cuenca.*

1. En los supuestos en los que la actividad sometida a autorización ambiental integrada precise, de acuerdo con la legislación de aguas, autorización de vertido al dominio público hidráulico de cuencas intercomunitarias, el organismo de cuenca competente deberá emitir un informe sobre la admisibilidad del vertido y, en su caso, determinar las características del mismo y las medidas correctoras a adoptar a fin de preservar el buen estado ecológico de las aguas.

2. El informe regulado en el apartado anterior tendrá carácter preceptivo y vinculante y deberá emitirse en el plazo máximo de seis meses desde la recepción del expediente.

En caso de no emitirse el informe en el plazo señalado en el párrafo anterior, el órgano competente para otorgar la autorización ambiental integrada requerirá al organismo de cuenca para que emita con carácter urgente el citado informe en el plazo máximo de un mes.

Transcurrido el plazo previsto desde el requerimiento al organismo de cuenca sin que éste hubiese emitido el informe, se podrán proseguir las actuaciones. No obstante, el informe recibido fuera del plazo señalado y antes del otorgamiento de la autorización ambiental integrada, deberá ser tenido en consideración por el órgano competente de la Comunidad Autónoma.

3. Transcurridos los plazos previstos en el apartado anterior sin que el organismo de cuenca hubiese emitido el informe requerido, se podrá otorgar la autorización ambiental integrada, contemplando en la misma las características del vertido y las medidas correctoras

requeridas, que se establecerán de conformidad con la legislación sectorial aplicable.

4. Si el informe vinculante regulado en este artículo considerase que es inadmisibile el vertido y, consecuentemente, impidiere el otorgamiento de la autorización ambiental integrada, el órgano competente para otorgar la autorización ambiental integrada dictará resolución motivada denegando la autorización.

#### Artículo 20. *Propuesta de resolución y trámite de audiencia.*

1. El órgano competente para otorgar la autorización ambiental integrada, tras realizar una evaluación ambiental del proyecto en su conjunto, elaborará una propuesta de resolución que, ajustada al contenido establecido en el artículo 22 de esta Ley, incorporará las condiciones que resulten de los informes vinculantes emitidos, tras un trámite de audiencia a los interesados.

2. Cuando en el trámite de audiencia al que se refiere el apartado anterior se hubiesen realizado alegaciones, se dará traslado de las mismas, junto con la propuesta de resolución, a los órganos competentes para emitir informes vinculantes en trámites anteriores para que, en el plazo máximo de quince días, manifiesten lo que estimen conveniente, que igualmente tendrá carácter vinculante en los aspectos referidos a materias de su competencia.

#### Artículo 21. *Resolución.*

1. El órgano competente para otorgar la autorización ambiental integrada dictará la resolución que ponga fin al procedimiento en el plazo máximo de diez meses.

2. Transcurrido el plazo máximo de diez meses sin haberse notificado resolución expresa, podrá entenderse desestimada la solicitud presentada.

#### Artículo 22. *Contenido de la autorización ambiental integrada.*

1. La autorización ambiental integrada tendrá el contenido mínimo siguiente:

a) Los valores límite de emisión basados en las mejores técnicas disponibles, de acuerdo con el artículo 7, para las sustancias contaminantes, en particular para las enumeradas en el anejo 3, que puedan ser emitidas por la instalación y, en su caso, los parámetros o las medidas técnicas equivalentes que los completen o sustituyan.

b) Las prescripciones que garanticen, en su caso, la protección del suelo y de las aguas subterráneas.

c) Los procedimientos y métodos que se vayan a emplear para la gestión de los residuos generados por la instalación.

d) Las prescripciones que garanticen, en su caso, la minimización de la contaminación a larga distancia o transfronteriza.

e) Los sistemas y procedimientos para el tratamiento y control de todo tipo de emisiones y residuos, con especificación de la metodología de medición, su frecuencia y los procedimientos para evaluar las mediciones.

f) Las medidas relativas a las condiciones de explotación en situaciones distintas de las normales que puedan afectar al medio ambiente, como los casos de puesta en marcha, fugas, fallos de funcionamiento, paradas temporales o el cierre definitivo.

g) Cualquier otra medida o condición establecida por la legislación sectorial aplicable.

2. La autorización ambiental integrada podrá incluir excepciones temporales de los valores límite de emisión

aplicables cuando el titular de la instalación presente alguna de las siguientes medidas, que deberán ser aprobadas por la Administración competente e incluirse en la autorización ambiental integrada, formando parte de su contenido:

a) Un plan de rehabilitación que garantice el cumplimiento de los valores límite de emisión en el plazo máximo de seis meses.

b) Un proyecto que implique una reducción de la contaminación.

3. Cuando para el cumplimiento de los requisitos de calidad medioambiental, exigibles de acuerdo con la legislación aplicable, sea necesario la aplicación de condiciones más rigurosas que las que se puedan alcanzar mediante el empleo de las mejores técnicas disponibles, la autorización ambiental integrada exigirá la aplicación de condiciones complementarias, sin perjuicio de otras medidas que puedan adoptarse para respetar las normas de calidad medioambiental.

4. Para las instalaciones en las que se desarrollen algunas de las categorías de actividades incluidas en el epígrafe 9.3 del anejo 1 de esta Ley, los órganos competentes deberán tener en cuenta, a la hora de fijar las prescripciones sobre gestión y control de los residuos en la autorización ambiental integrada, las consideraciones prácticas específicas de dichas actividades, teniendo en cuenta los costes y las ventajas de las medidas que se vayan a adoptar.

5. En el supuesto previsto en el artículo 11.4, la autorización ambiental integrada contendrá, además, cuando así sea exigible:

a) La declaración de impacto ambiental u otras figuras de evaluación ambiental establecidas en la normativa que resulte de aplicación.

b) Las condiciones preventivas y de control necesarias en materia de accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas de acuerdo con el Real Decreto 1254/1999, de 16 de julio, y demás normativa que resulte de aplicación.

#### Artículo 23. *Notificación y publicidad.*

1. El órgano competente para otorgar la autorización ambiental integrada notificará la resolución a los interesados, al Ayuntamiento donde se ubique la instalación, a los distintos órganos que hubiesen emitido informes vinculantes y, en su caso, al órgano estatal competente para otorgar las autorizaciones sustantivas señaladas en el artículo 11.2.a) de esta Ley.

2. Las personas físicas o jurídicas tienen derecho a acceder a las resoluciones de las autorizaciones ambientales integradas, así como a sus actualizaciones posteriores, de conformidad con la legislación sobre acceso a la información en materia de medio ambiente.

3. Las Comunidades Autónomas darán publicidad en sus respectivos boletines oficiales a las resoluciones administrativas mediante las que se hubieran otorgado o modificado las autorizaciones ambientales integradas.

#### Artículo 24. *Impugnación.*

1. Los interesados podrán oponerse a los informes vinculantes emitidos en el procedimiento regulado en esta Ley mediante la impugnación de la resolución administrativa que ponga fin al procedimiento de otorgamiento de la autorización ambiental integrada, sin perjuicio de lo establecido en el artículo 107.1 de la Ley 30/1992, de 26 de noviembre, de Régimen Jurídico de las Administraciones Públicas y del Procedimiento Administrativo Común, para los casos en que los citados informes vinculantes impidiesen el otorgamiento de dicha autorización.

2. Cuando la impugnación, en vía administrativa, de la resolución que ponga fin al procedimiento de otorgamiento de la autorización ambiental integrada afecte a las condiciones establecidas en los informes vinculantes, el órgano de la Comunidad Autónoma competente para resolver el recurso dará traslado del mismo a los órganos que los hubiesen emitido, con el fin de que éstos, si lo estiman oportuno, presenten alegaciones en el plazo de quince días. De emitirse en plazo, las citadas alegaciones serán vinculantes para la resolución del recurso.

3. Si en el recurso contencioso-administrativo que se pudiera interponer contra la resolución que ponga fin a la vía administrativa se dedujeran pretensiones relativas a los informes preceptivos y vinculantes, la Administración que los hubiera emitido tendrá la consideración de codemandada, conforme a lo establecido en la Ley 29/1998, de 13 de julio, reguladora de la Jurisdicción Contencioso-Administrativa.

#### Artículo 25. *Renovación de la autorización ambiental integrada.*

1. La autorización ambiental integrada, con todas sus condiciones, incluidas las relativas a vertidos al dominio público hidráulico y marítimo terrestre, desde tierra al mar, se otorgará por un plazo máximo de ocho años, transcurrido el cual deberá ser renovada y, en su caso, actualizada por períodos sucesivos.

2. Con una antelación mínima de diez meses antes del vencimiento del plazo de vigencia de la autorización ambiental integrada, su titular solicitará su renovación, que se tramitará por un procedimiento simplificado que se establecerá reglamentariamente.

3. Si, vencido el plazo de vigencia de la autorización ambiental integrada, el órgano competente para otorgarla no hubiera dictado resolución expresa sobre la solicitud de renovación a que se refiere el apartado anterior, ésta se entenderá estimada y, consecuentemente, renovada la autorización ambiental integrada en las mismas condiciones.

#### Artículo 26. *Modificación de la autorización ambiental integrada.*

1. En cualquier caso, la autorización ambiental integrada podrá ser modificada de oficio cuando:

a) La contaminación producida por la instalación haga conveniente la revisión de los valores límite de emisión impuestos o la adopción de otros nuevos.

b) Resulte posible reducir significativamente las emisiones sin imponer costes excesivos a consecuencia de importantes cambios en las mejores técnicas disponibles.

c) La seguridad de funcionamiento del proceso o actividad haga necesario emplear otras técnicas.

d) El organismo de cuenca, conforme a lo establecido en la legislación de aguas, estime que existen circunstancias que justifiquen la revisión o modificación de la autorización ambiental integrada en lo relativo a vertidos al dominio público hidráulico de cuencas intercomunitarias. En este supuesto, el organismo de cuenca requerirá, mediante informe vinculante, al órgano competente para otorgar la autorización ambiental integrada, a fin de que inicie el procedimiento de modificación en un plazo máximo de veinte días.

e) Así lo exija la legislación sectorial que resulte de aplicación a la instalación.

2. La modificación a que se refiere el apartado anterior no dará derecho a indemnización y se tramitará por un procedimiento simplificado que se establecerá reglamentariamente.

## Artículo 27. *Actividades con efectos transfronterizos.*

1. En el supuesto de que el órgano competente de la Comunidad Autónoma estime que el funcionamiento de la instalación para la que se solicita la autorización ambiental integrada pudiera tener efectos ambientales negativos y significativos en otro Estado miembro de la Unión Europea, o cuando así lo considere otro Estado miembro, se remitirá una copia de la solicitud a dicho Estado, para que se puedan formular las alegaciones que se estimen oportunas, antes de que recaiga resolución definitiva. Igualmente, se remitirá al Estado miembro afectado la resolución que finalmente se adopte, en relación con la solicitud de autorización ambiental integrada.

2. A los efectos previstos en el apartado anterior, el órgano competente de la Comunidad Autónoma se relacionará con el Estado miembro potencialmente afectado a través del Ministerio de Asuntos Exteriores.

## CAPÍTULO III

### Coordinación con otros mecanismos de intervención ambiental

#### Artículo 28. *Coordinación con el procedimiento de evaluación de impacto ambiental.*

Cuando corresponda al órgano ambiental de la Administración General del Estado la formulación de la declaración de impacto ambiental, de acuerdo con lo establecido en el Real Decreto legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de Evaluación de Impacto Ambiental, y su normativa de desarrollo, no podrá otorgarse la autorización ambiental integrada ni, en su caso, las autorizaciones sustantivas de las industrias señaladas en el artículo 3.b), sin que previamente se haya dictado dicha declaración.

A estos efectos, el órgano ambiental estatal, tan pronto como haya formulado la declaración de impacto ambiental o tras la resolución por el Consejo de Ministros de discrepancias con el órgano competente para conceder la autorización sustantiva, remitirá una copia de la misma al órgano competente de la Comunidad Autónoma y, en su caso, al órgano estatal para otorgar las autorizaciones sustantivas señaladas en el artículo 3.b), que deberán incorporar su condicionado al contenido de la autorización ambiental integrada, así como al de las autorizaciones sustantivas que sean exigibles.

#### Artículo 29. *Coordinación con el régimen aplicable en materia de actividades clasificadas.*

1. El procedimiento para el otorgamiento de la autorización ambiental integrada sustituirá al procedimiento para el otorgamiento de la licencia municipal de actividades clasificadas regulado por el Decreto 2414/1961, de 30 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de Actividades Molestas, Insalubres, Nocivas y Peligrosas, salvo en lo referente a la resolución definitiva de la autoridad municipal. A estos efectos, la autorización ambiental integrada será, en su caso, vinculante para la autoridad municipal cuando implique la denegación de licencias o la imposición de medidas correctoras, así como en lo referente a todos los aspectos medioambientales recogidos en el artículo 22.

2. Lo dispuesto en el apartado anterior se entiende sin perjuicio de las normas autonómicas sobre actividades clasificadas que, en su caso, fueran aplicables.

## TÍTULO IV

### Disciplina ambiental

#### Artículo 30. *Control e inspección.*

1. Las Comunidades Autónomas serán las competentes para adoptar las medidas de control e inspección necesarias para garantizar el cumplimiento de esta Ley sin perjuicio de la competencia estatal en esta materia respecto de los vertidos a cuencas intercomunitarias.

2. Los resultados de las actuaciones de control e inspección deberán ponerse a disposición del público, sin más limitaciones que las establecidas en la legislación sobre el derecho de acceso a la información en materia de medio ambiente.

#### Artículo 31. *Infracciones.*

1. Sin perjuicio de las infracciones que, en su caso, establezca la legislación sectorial y de las que puedan establecer las Comunidades Autónomas, las infracciones en materia de prevención y control integrados de la contaminación se clasifican en muy graves, graves y leves.

2. Son infracciones muy graves:

a) Ejercer la actividad o llevar a cabo una modificación sustancial de la misma sin la preceptiva autorización ambiental integrada, siempre que se haya producido un daño o deterioro grave para el medio ambiente o se haya puesto en peligro grave la seguridad o salud de las personas.

b) Incumplir las condiciones establecidas en la autorización ambiental integrada, siempre que se haya producido un daño o deterioro grave para el medio ambiente o se haya puesto en peligro grave la seguridad o salud de las personas.

c) Incumplir las obligaciones derivadas de las medidas provisionales previstas en el artículo 35 de esta Ley.

d) Ejercer la actividad incumpliendo las obligaciones fijadas en las disposiciones que hayan establecido la exigencia de notificación y registro por parte de las Comunidades Autónomas, de acuerdo con la disposición final quinta, siempre que se haya producido un daño o deterioro grave para el medio ambiente o se haya puesto en peligro grave la seguridad o salud de las personas.

3. Son infracciones graves:

a) Ejercer la actividad o llevar a cabo una modificación sustancial de la misma sin la preceptiva autorización ambiental integrada, sin que se haya producido un daño o deterioro grave para el medio ambiente o sin que se haya puesto en peligro grave la seguridad o salud de las personas.

b) Incumplir las condiciones establecidas en la autorización ambiental integrada, sin que se haya producido un daño o deterioro grave para el medio ambiente o sin que se haya puesto en peligro grave la seguridad o salud de las personas.

c) Ocultar o alterar maliciosamente la información exigida en los procedimientos regulados en esta Ley.

d) Transmitir la titularidad de la autorización ambiental integrada sin comunicarlo al órgano competente para otorgar la misma.

e) No comunicar al órgano competente de la Comunidad Autónoma las modificaciones realizadas en la instalación, siempre que no revistan el carácter de sustanciales.

f) No informar inmediatamente al órgano competente de la Comunidad Autónoma de cualquier incidente

o accidente que afecte de forma significativa al medio ambiente.

g) Impedir, retrasar u obstruir la actividad de inspección o control.

h) Ejercer la actividad incumpliendo las obligaciones fijadas en las disposiciones que hayan establecido la exigencia de notificación y registro por parte de las Comunidades Autónomas, de acuerdo con la disposición final quinta, siempre que se haya producido un daño o deterioro para el medio ambiente o se haya puesto en peligro la seguridad o salud de las personas, que en ninguno de los dos casos tenga la consideración de grave.

#### 4. Son infracciones leves:

a) No realizar las notificaciones preceptivas a las Administraciones públicas, en los supuestos regulados en la disposición final quinta, sin que se haya producido ningún tipo de daño o deterioro para el medio ambiente ni se haya puesto en peligro la seguridad o salud de las personas.

b) El incumplimiento de las prescripciones establecidas en esta Ley o en las normas aprobadas conforme a la misma, cuando no esté tipificado como infracción muy grave o grave.

### Artículo 32. Sanciones.

1. Las infracciones tipificadas en el artículo anterior podrán dar lugar a la imposición de todas o algunas de las siguientes sanciones:

a) En el caso de infracción muy grave:

Multa desde 200.001 hasta 2.000.000 de euros.

Clausura definitiva, total o parcial, de las instalaciones.

Clausura temporal, total o parcial, de las instalaciones por un período no inferior a dos años ni superior a cinco.

Inhabilitación para el ejercicio de la actividad por un período no inferior a un año ni superior a dos.

Revocación de la autorización o suspensión de la misma por un tiempo no inferior a un año ni superior a cinco.

Publicación, a través de los medios que se considere oportunos, de las sanciones impuestas, una vez que éstas hayan adquirido firmeza en vía administrativa o, en su caso, jurisdiccional, así como los nombres, apellidos o denominación o razón social de las personas físicas o jurídicas responsables y la índole y naturaleza de las infracciones.

b) En el caso de infracción grave:

Multa desde 20.001 hasta 200.000 euros.

Clausura temporal, total o parcial, de las instalaciones por un período máximo de dos años.

Inhabilitación para el ejercicio de la actividad por un período máximo de un año.

Revocación de la autorización o suspensión de la misma por un período máximo de un año.

c) En el caso de infracción leve:

Multa de hasta 20.000 euros.

2. Cuando la cuantía de la multa resulte inferior al beneficio obtenido por la comisión de la infracción, la sanción será aumentada, como mínimo, hasta el doble del importe en que se haya beneficiado el infractor.

### Artículo 33. Graduación de las sanciones.

En la imposición de las sanciones se deberá guardar la debida adecuación entre la gravedad del hecho constitutivo de la infracción y la sanción aplicada, conside-

rándose especialmente los siguientes criterios para la graduación de la sanción:

a) La existencia de intencionalidad o reiteración.

b) Los daños causados al medio ambiente o salud de las personas o el peligro creado para la seguridad de las mismas.

c) La reincidencia por comisión de más de una infracción tipificada en esta Ley cuando así haya sido declarado por resolución firme.

d) El beneficio obtenido por la comisión de la infracción.

### Artículo 34. Concurrencia de sanciones.

Cuando por unos mismos hechos y fundamentos jurídicos, el infractor pudiese ser sancionado con arreglo a esta Ley y a otra u otras leyes que fueran de aplicación, de las posibles sanciones se le impondrá la de mayor gravedad.

### Artículo 35. Medidas de carácter provisional.

1. Cuando se haya iniciado un procedimiento sancionador, el órgano competente para imponer la sanción podrá acordar, entre otras, alguna o algunas de las siguientes medidas provisionales:

a) Medidas de corrección, seguridad o control que impidan la continuidad en la producción del riesgo o del daño.

b) Precintado de aparatos o equipos.

c) Clausura temporal, parcial o total, de las instalaciones.

d) Parada de las instalaciones.

e) Suspensión temporal de la autorización para el ejercicio de la actividad.

2. Las medidas señaladas en el apartado anterior podrán ser acordadas antes de la iniciación del procedimiento administrativo sancionador, en las condiciones establecidas en el artículo 72.2 de la Ley 30/1992, de 26 de noviembre, de Régimen Jurídico de las Administraciones Públicas y del Procedimiento Administrativo Común.

### Artículo 36. Obligación de reponer y multas coercitivas.

1. Sin perjuicio de la sanción penal o administrativa que se imponga, el infractor estará obligado a la reposición o restauración de las cosas al estado anterior a la infracción cometida, así como, en su caso, a abonar la correspondiente indemnización por los daños y perjuicios causados. La indemnización por los daños y perjuicios causados a las Administraciones públicas se determinará y recaudará en vía administrativa.

2. Cuando el infractor no cumpliera la obligación de reposición o restauración establecida en el apartado anterior, el órgano competente podrá acordar la imposición de multas coercitivas cuya cuantía no superará un tercio de la multa prevista para el tipo de infracción cometida.

### Disposición adicional primera. Colaboración con las Comunidades Autónomas.

A los efectos de lo previsto en el artículo 28 de esta Ley, en aquellos supuestos en los que corresponda emitir la declaración de impacto ambiental a la Administración General del Estado, se arbitrarán fórmulas de colaboración con las Comunidades Autónomas para la coordinación del procedimiento de evaluación de impacto ambiental con el de la autorización ambiental integrada.

Disposición adicional segunda. *Régimen sancionador relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono.*

El incumplimiento de lo dispuesto en el Reglamento (CE) 2037/2000, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 29 de junio, sobre las sustancias que agotan la capa de ozono, será sancionado con arreglo al régimen establecido en la Ley Orgánica 12/1995, de 12 de diciembre, de Represión del Contrabando.

Disposición transitoria primera. *Régimen aplicable a las instalaciones existentes.*

Los titulares de las instalaciones existentes, definidas en el artículo 3.d) de esta Ley, deberán adaptarse a la misma antes del 30 de octubre de 2007, fecha en la que deberán contar con la pertinente autorización ambiental integrada.

A estos efectos, si la solicitud de la autorización ambiental integrada se presentara antes del día 1 de enero de 2007 y el órgano competente para otorgarla no hubiera dictado resolución expresa sobre la misma con anterioridad a la fecha señalada en el párrafo anterior, las instalaciones existentes podrán continuar en funcionamiento de forma provisional hasta que se dicte dicha resolución, siempre que cumplan todos los requisitos de carácter ambiental exigidos por la normativa sectorial aplicable.

Disposición transitoria segunda. *Procedimientos en curso.*

A los procedimientos de autorización ya iniciados antes de la entrada en vigor de esta Ley no les será de aplicación la misma, rigiéndose por la legislación aplicable, en los términos establecidos en el artículo 3.d).

En estos casos, y sin perjuicio del régimen previsto en esta Ley para las modificaciones sustanciales, una vez otorgada las autorizaciones serán renovadas en los plazos previstos en la legislación sectorial aplicable y en todo caso, al cabo de ocho años, cumpliendo lo establecido en esta Ley para las instalaciones existentes.

Disposición derogatoria única. *Incidencia en la legislación sectorial sobre concesión de determinadas autorizaciones ambientales.*

1. Quedan derogadas todas aquellas disposiciones que contravengan o se opongan a lo establecido en esta Ley.

2. En particular, se derogan, respecto de las actividades industriales incluidas en el ámbito de aplicación de esta Ley, las prescripciones establecidas en la legislación sectorial que se cita a continuación, en relación con los procedimientos de solicitud, concesión, revisión y cumplimiento de las siguientes autorizaciones ambientales:

Autorizaciones de producción y gestión de residuos reguladas en la Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos.

Autorizaciones de incineración de residuos municipales reguladas en el Real Decreto 1088/1992, de 11 de septiembre, por el que se establecen nuevas normas sobre la limitación de emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de grandes instalaciones de incineración de residuos municipales.

Autorizaciones de incineración de residuos peligrosos reguladas en el Real Decreto 1217/1997, de 18 de julio, relativo a la incineración de residuos peligrosos y de modificación del Real Decreto 1088/1992.

Autorizaciones de vertidos a las aguas continentales de cuencas intracomunitarias, reguladas en el texto

refundido de la Ley de Aguas, aprobado mediante Real Decreto legislativo 1/2001, de 20 de julio.

Autorizaciones de vertidos al dominio público marítimo terrestre, desde tierra al mar, reguladas en la Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas.

Autorizaciones e informes vinculantes en materia de contaminación atmosférica reguladas en la Ley 38/1972, de 22 de diciembre, de Protección del Ambiente Atmosférico y en sus normas de desarrollo

Se exceptúan de la derogación establecida en este apartado, los preceptos de esta Ley que regulan la exigencia de requisitos establecidos en la legislación sectorial aplicable, en particular los regulados en los artículos 5.b), 12.1.c), 12.1.e), 19.3, 22.1.g), 26.1.d), 26.1.e) y 31.

3. Igualmente, a la entrada en vigor de esta Ley quedan derogadas las excepciones previstas en el artículo 2 de la Orden de 12 de noviembre de 1987, sobre normas de emisión, objetivos de calidad y métodos de medición de referencia relativos a determinadas sustancias nocivas o peligrosas contenidas en los vertidos de aguas residuales y en el artículo 4 del Real Decreto 258/1989, de 10 de marzo, por el que se establece la normativa general sobre vertidos de sustancias peligrosas desde tierra al mar.

4. Queda derogada la Ley 4/1998, de 3 de marzo, por la que se establece el régimen sancionador previsto en el Reglamento (CE) 3093/1994, del Consejo, de 15 de diciembre, relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono.

Disposición final primera. *Adecuación al régimen establecido en el texto refundido de la Ley de Aguas, aprobado mediante Real Decreto legislativo 1/2001, de 20 de julio.*

1. El procedimiento previsto en la presente Ley para la autorización de los vertidos realizados por las actividades contempladas en el anejo 1 al dominio público hidráulico de cuencas intercomunitarias, no modifica el régimen económico financiero previsto por la legislación de aguas ni el resto de competencias que corresponden a la Administración General del Estado en materia de protección del dominio público hidráulico. En particular, no se alteran las competencias relativas a vigilancia e inspección ni la potestad sancionadora.

2. En el supuesto previsto en el artículo 19.3 de esta Ley, el organismo de cuenca correspondiente liquidará el canon de control de vertidos de acuerdo con las condiciones contenidas en la autorización ambiental integrada que, a estos efectos, deberá ser puesta a disposición de aquél por el órgano autonómico competente para otorgarla.

Disposición final segunda. *Modificación del texto refundido de la Ley de Aguas, aprobado mediante Real Decreto legislativo 1/2001, de 20 de julio.*

1. Se añade el siguiente párrafo al artículo 105.2.a) del texto refundido de la Ley de Aguas, aprobado mediante Real Decreto legislativo 1/2001, de 20 de julio:

«Cuando la autorización de vertido en cuencas intercomunitarias se hubiera integrado en la autorización ambiental integrada, el organismo de cuenca comunicará la revocación mediante la emisión de un informe preceptivo y vinculante a la Comunidad Autónoma competente, a efectos de su cumplimiento.»

2. Se añade una disposición adicional décima, con la siguiente redacción:

«Disposición adicional décima. *Vertidos a las aguas continentales de cuencas intercomunitarias.*

La autorización de vertidos a las aguas continentales de cuencas intercomunitarias de las actividades incluidas en el anejo 1 de la Ley de prevención y control integrados de la contaminación se incluirá en la autorización ambiental integrada regulada en la mencionada Ley, a cuyos efectos el pronunciamiento del organismo de cuenca sobre el otorgamiento de dicha autorización se sustituirá por los informes vinculantes regulados en la citada Ley y en su normativa de desarrollo.»

Disposición final tercera. *Modificación de la Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos.*

Se añade el siguiente párrafo en el apartado 2 del artículo 13 de la Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos:

«Se exceptúan de lo establecido en este apartado las actividades de eliminación, mediante depósito en vertedero, de residuos urbanos realizadas por los entes locales e incluidas en el ámbito de aplicación de la Ley de prevención y control integrados de la contaminación, que estarán sometidas a la autorización ambiental integrada regulada en la misma.»

Disposición final cuarta. *Modificación de la Ley 38/1972, de 22 de diciembre, de protección del ambiente atmosférico.*

El primer párrafo del apartado a) del artículo 12.1 de la Ley 38/1972, de 22 de diciembre, de protección del ambiente atmosférico, queda redactado como sigue:

«Con multa de hasta 30.000 euros, en el caso de infracciones leves, y con multa de 30.001 a 1.200.000 euros, en el caso de infracciones graves.»

Disposición final quinta. *Otras actividades distintas de las del anejo 1.*

El Gobierno, sin perjuicio de las normas adicionales de protección que dicten las Comunidades Autónomas, podrá establecer que determinadas categorías de actividades distintas de las enumeradas en el anejo 1 queden sometidas a notificación y registro por parte de la Comunidad Autónoma competente. En tal caso, las normas que establezcan la anterior exigencia determinarán igualmente los requisitos a los que deberá ajustarse el funcionamiento de dichas actividades y si se produjeran incumplimientos por parte de los titulares se aplicará el régimen sancionador establecido en esta Ley, con excepción de los preceptos relativos a la exigencia de la autorización ambiental integrada.

Disposición final sexta. *Fundamento constitucional.*

Esta Ley tiene la consideración de legislación básica sobre protección del medio ambiente de acuerdo con lo establecido en el artículo 149.1.23.ª de la Constitución.

Disposición final séptima. *Desarrollo reglamentario.*

1. Se faculta al Gobierno para el desarrollo reglamentario de esta Ley dentro del ámbito de sus competencias y, en particular, para modificar sus anejos con

la finalidad de adaptarlos a las modificaciones que, en su caso, sean introducidas por la normativa comunitaria.

2. El Gobierno, mediante Real Decreto, podrá actualizar la cuantía de las multas establecidas en el artículo 32 de esta Ley.

Disposición final octava. *Entrada en vigor.*

Esta Ley entrará en vigor al día siguiente de su publicación en el «Boletín Oficial del Estado».

Por tanto,  
Mando a todos los españoles, particulares y autoridades, que guarden y hagan guardar esta Ley.

Madrid, 1 de julio de 2002.

JUAN CARLOS R.

El Presidente del Gobierno,  
JOSÉ MARÍA AZNAR LÓPEZ

## ANEJO 1

### Categorías de actividades e instalaciones contempladas en el artículo 2

Nota: los valores umbral mencionados en cada una de las actividades relacionadas en la siguiente tabla se refieren, con carácter general, a capacidades de producción o a rendimientos. Si un mismo titular realiza varias actividades de la misma categoría en la misma instalación o en el emplazamiento, se sumarán las capacidades de dichas actividades.

#### 1. Instalaciones de combustión.

1.1 Instalaciones de combustión con una potencia térmica de combustión superior a 50 MW:

a) Instalaciones de producción de energía eléctrica en régimen ordinario o en régimen especial, en las que se produzca la combustión de combustibles fósiles, residuos o biomasa.

b) Instalaciones de cogeneración, calderas, hornos, generadores de vapor o cualquier otro equipamiento o instalación de combustión existente en una industria, sea ésta o no su actividad principal.

#### 1.2 Refinerías de petróleo y gas:

a) Instalaciones para el refinado de petróleo o de crudo de petróleo.

b) Instalaciones para la producción de gas combustible distinto del gas natural y gases licuados del petróleo.

#### 1.3 Coquerías.

1.4 Instalaciones de gasificación y licuefacción de carbón.

#### 2. Producción y transformación de metales.

2.1 Instalaciones de calcinación o sinterización de minerales metálicos incluido el mineral sulfurado.

2.2 Instalaciones para la producción de fundición o de aceros brutos (fusión primaria o secundaria), incluidas las correspondientes instalaciones de fundición continua de una capacidad de más de 2,5 toneladas por hora.

2.3 Instalaciones para la transformación de metales ferrosos:

a) Laminado en caliente con una capacidad superior a 20 toneladas de acero bruto por hora.

b) Forjado con martillos cuya energía de impacto sea superior a 50 kilojulios por martillo y cuando la potencia térmica utilizada sea superior a 20 MW.

c) Aplicación de capas de protección de metal fundido con una capacidad de tratamiento de más de 2 toneladas de acero bruto por hora.

2.4 Fundiciones de metales ferrosos con una capacidad de producción de más de 20 toneladas por día.

2.5 Instalaciones:

a) Para la producción de metales en bruto no ferrosos a partir de minerales, de concentrados o de materias primas secundarias mediante procedimientos metalúrgicos, químicos o electrolíticos.

b) Para la fusión de metales no ferrosos, inclusive la aleación, así como los productos de recuperación (refinado, moldeado en fundición) con una capacidad de fusión de más de 4 toneladas para el plomo y el cadmio o 20 toneladas para todos los demás metales, por día.

2.6 Instalaciones para el tratamiento de superficie de metales y materiales plásticos por procedimiento electrolítico o químico, cuando el volumen de las cubetas o de las líneas completas destinadas al tratamiento empleadas sea superior a 30 m<sup>3</sup>.

3. Industrias minerales.

3.1 Instalaciones de fabricación de cemento y/o clínker en hornos rotatorios con una capacidad de producción superior a 500 toneladas diarias, o de cal en hornos rotatorios con una capacidad de producción superior a 50 toneladas por día, o en hornos de otro tipo con una capacidad de producción superior a 50 toneladas por día.

3.2 Instalaciones para la obtención de amianto y para la fabricación de productos a base de amianto.

3.3 Instalaciones para la fabricación de vidrio incluida la fibra de vidrio, con una capacidad de fusión superior a 20 toneladas por día.

3.4 Instalaciones para la fundición de materiales minerales, incluida la fabricación de fibras minerales con una capacidad de fundición superior a 20 toneladas por día.

3.5 Instalaciones para la fabricación de productos cerámicos mediante horneado, en particular tejas, ladrillos, refractarios, azulejos o productos cerámicos ornamentales o de uso doméstico, con una capacidad de producción superior a 75 toneladas por día, y/o una capacidad de horneado de más de 4 m<sup>3</sup> y de más de 300 kg/m<sup>3</sup> de densidad de carga por horno.

4. Industrias químicas.

La fabricación, a efectos de las categorías de actividades de esta Ley, designa la fabricación a escala industrial, mediante transformación química de los productos o grupos de productos mencionados en los epígrafes 4.1 a 4.6.

4.1 Instalaciones químicas para la fabricación de productos químicos orgánicos de base, en particular:

a) Hidrocarburos simples (lineales o cíclicos, saturados o insaturados, alifáticos o aromáticos).

b) Hidrocarburos oxigenados, tales como alcoholes, aldehídos, cetonas, ácidos orgánicos, ésteres, acetatos, éteres, peróxidos, resinas, epóxidos.

c) Hidrocarburos sulfurados.

d) Hidrocarburos nitrogenados, en particular, aminas, amidas, compuestos nitrosos, nítricos o nitratos, nitrilos, cianatos e isocianatos.

e) Hidrocarburos fosforados.

f) Hidrocarburos halogenados.

g) Compuestos orgánicos metálicos.

h) Materias plásticas de base (polímeros, fibras sintéticas, fibras a base de celulosa).

i) Cauchos sintéticos.

j) Colorantes y pigmentos.

k) Tensioactivos y agentes de superficie.

4.2 Instalaciones químicas para la fabricación de productos químicos inorgánicos de base, como:

a) Gases y, en particular, el amoníaco, el cloro o el cloruro de hidrógeno, el flúor o fluoruro de hidrógeno, los óxidos de carbono, los compuestos de azufre, los óxidos del nitrógeno, el hidrógeno, el dióxido de azufre, el dicloruro de carbonilo.

b) Ácidos y, en particular, el ácido crómico, el ácido fluorhídrico, el ácido fosfórico, el ácido nítrico, el ácido clorhídrico, el ácido sulfúrico, el ácido sulfúrico fumante, los ácidos sulfurados.

c) Bases y, en particular, el hidróxido de amonio, el hidróxido potásico, el hidróxido sódico.

d) Sales como el cloruro de amonio, el clorato potásico, el carbonato potásico (potasa), el carbonato sódico (sosa), los perboratos, el nitrato argéntico.

e) No metales, óxidos metálicos u otros compuestos inorgánicos como el carburo de calcio, el silicio, el carburo de silicio.

4.3 Instalaciones químicas para la fabricación de fertilizantes a base de fósforo, de nitrógeno o de potasio (fertilizantes simples o compuestos).

4.4 Instalaciones químicas para la fabricación de productos de base fitofarmacéuticos y de biocidas.

4.5 Instalaciones químicas que utilicen un procedimiento químico o biológico para la fabricación de medicamentos de base.

4.6 Instalaciones químicas para la fabricación de explosivos.

5. Gestión de residuos.

Se excluyen de la siguiente enumeración las actividades e instalaciones en las que, en su caso, resulte de aplicación lo establecido en el artículo 14 de la Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos.

5.1 Instalaciones para la valorización de residuos peligrosos, incluida la gestión de aceites usados, o para la eliminación de dichos residuos en lugares distintos de los vertederos, de una capacidad de más de 10 toneladas por día.

5.2 Instalaciones para la incineración de los residuos municipales, de una capacidad de más de 3 toneladas por hora.

5.3 Instalaciones para la eliminación de los residuos no peligrosos, en lugares distintos de los vertederos, con una capacidad de más de 50 toneladas por día.

5.4 Vertederos de todo tipo de residuos que reciban más de 10 toneladas por día o que tengan una capacidad total de más de 25.000 toneladas con exclusión de los vertederos de residuos inertes.

6. Industria del papel y cartón.

6.1 Instalaciones industriales destinadas a la fabricación de:

a) Pasta de papel a partir de madera o de otras materias fibrosas.

b) Papel y cartón con una capacidad de producción de más de 20 toneladas diarias.

6.2 Instalaciones de producción y tratamiento de celulosa con una capacidad de producción superior a 20 toneladas diarias.

7. Industria textil.

7.1 Instalaciones para el tratamiento previo (operaciones de lavado, blanqueo, mercerización) o para el tinte de fibras o productos textiles cuando la capacidad de tratamiento supere las 10 toneladas diarias.

## 8. Industria del cuero.

8.1 Instalaciones para el curtido de cueros cuando la capacidad de tratamiento supere las 12 toneladas de productos acabados por día.

9. Industrias agroalimentarias y explotaciones ganaderas.

### 9.1 Instalaciones para:

a) Mataderos con una capacidad de producción de canales superior a 50 toneladas/día.

b) Tratamiento y transformación destinados a la fabricación de productos alimenticios a partir de:

b.1) Materia prima animal (que no sea la leche) de una capacidad de producción de productos acabados superior a 75 toneladas/día.

b.2) Materia prima vegetal de una capacidad de producción de productos acabados superior a 300 toneladas/día (valor medio trimestral).

c) Tratamiento y transformación de la leche, con una cantidad de leche recibida superior a 200 toneladas por día (valor medio anual).

9.2 Instalaciones para la eliminación o el aprovechamiento de canales o desechos de animales con una capacidad de tratamiento superior a 10 toneladas/día.

9.3 Instalaciones destinadas a la cría intensiva de aves de corral o de cerdos que dispongan de más de:

a) 40.000 emplazamientos si se trata de gallinas ponedoras o del número equivalente para otras orientaciones productivas de aves.

b) 2.000 emplazamientos para cerdos de cría (de más de 30 Kg).

c) 750 emplazamientos para cerdas.

## 10. Consumo de disolventes orgánicos.

10.1 Instalaciones para el tratamiento de superficies de materiales, de objetos o productos con utilización de disolventes orgánicos, en particular para aprestarlos, estamparlos, revestirlos y desengrasarlos, impermeabilizarlos, pegarlos, enlazarlos, limpiarlos o impregnarlos, con una capacidad de consumo de más de 150 Kg de disolvente por hora o más de 200 toneladas/año.

## 11. Industria del carbono.

11.1 Instalaciones para la fabricación de carbono sinterizado o electrografito por combustión o grafitación.

## ANEJO 2

### Normas contempladas en el apartado 2 del artículo 7 de la Ley

1. Real Decreto 108/1991, de 1 de febrero, sobre la prevención y reducción de la contaminación del medio ambiente producida por el amianto.

2. Ley de Aguas, texto refundido aprobado mediante Real Decreto legislativo 1/2001, de 20 de julio.

3. Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento de dominio público hidráulico.

4. Orden de 12 de noviembre de 1987, del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, sobre normas de emisión, objetivos de calidad y métodos de medición de referencia relativos a determinadas sustancias nocivas o peligrosas contenidas en el vertido de aguas residuales, desarrollada por las Ordenes de 13 de marzo de 1989 y de 28 de junio de 1991, y modificada por la Orden de 25 de mayo de 1992.

5. Real Decreto 258/1989, de 10 de marzo, por el que se establece la normativa general sobre vertidos

de sustancias peligrosas desde tierra a mar desarrollado por la Orden de 31 de octubre de 1989, por la que se establecen normas de emisión, objetivos de calidad, métodos de medida de referencia y procedimientos de control relativos a determinadas sustancias peligrosas contenidas en los vertidos desde tierra a mar modificada por la Orden de 9 de mayo de 1991 y desarrollada por la Orden de 28 de octubre de 1992 (del 2 al 6 y el 12).

6. Real Decreto 1088/1992, de 11 de septiembre, por el que se establecen nuevas normas sobre la limitación de emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de grandes instalaciones de incineración de residuos municipales.

7. Real Decreto 1217/1997, de 18 de julio, relativo a la incineración de residuos peligrosos y de modificación del Real Decreto 1088/1992.

8. Orden de 18 de abril de 1991, por la que se establecen normas para reducir la contaminación producida por los residuos de las industrias del dióxido de titanio.

9. Real Decreto 646/1991, de 22 de abril, por la que se establecen nuevas normas sobre la limitación a las emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de grandes instalaciones de combustión, modificado por el Real Decreto 1800/1995, de 3 de noviembre, y desarrollado por la Orden de 26 de diciembre de 1995.

10. Ley 10/1998, de 21 de abril, de residuos.

11. 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, modificado por el Real Decreto 952/1997, de 20 de junio, en lo no derogado por la Ley 10/1998, de 21 de abril, de residuos.

12. Orden de 28 de febrero de 1989, sobre gestión de los aceites usados, modificada por Orden de 13 de junio de 1990.

13. Ley 38/1972, de 22 de diciembre, de Protección del Medio Ambiente Atmosférico.

14. Decreto 833/1975, de 6 de febrero, que desarrolla la Ley 38/1972, de 22 de diciembre, de Protección del Medio Ambiente Atmosférico, modificado parcialmente por el Real Decreto 1613/1985, de 1 de agosto, por el que se establecen nuevas normas de calidad del aire en lo referente a contaminación por dióxido de azufre y partículas, y el Real Decreto 717/1987, de 27 de mayo, por el que se establecen nuevas normas de calidad del aire en lo referente a contaminación por dióxido de nitrógeno y plomo.

15. Normativa sobre limitación de emisiones de compuestos orgánicos volátiles debidas al uso de disolventes en determinadas actividades e instalaciones industriales.

16. Todas aquellas normas aplicables que modifiquen o desarrollen la normativa anterior.

## ANEJO 3

### Lista de las principales sustancias contaminantes que se tomarán obligatoriamente en consideración si son pertinentes para fijar valores límite de emisiones

#### Atmósfera:

1. Óxido de azufre y otros compuestos de azufre.
2. Óxido de nitrógeno y otros compuestos de nitrógeno.
3. Monóxido de carbono.
4. Compuestos orgánicos volátiles.
5. Metales y sus compuestos.
6. Polvos.
7. Amianto (partículas en suspensión, fibras).

8. Cloro y sus compuestos.
9. Flúor y sus compuestos.
10. Arsénico y sus compuestos.
11. Cianuros.
12. Sustancias y preparados respecto de los cuales se haya demostrado que poseen propiedades cancerígenas, mutágenas o puedan afectar a la reproducción a través del aire.
13. Policlorodibenzodioxina y policlorodibenzofuranos.

#### Agua:

1. Compuestos organohalogenados y sustancias que puedan dar origen a compuestos de esta clase en el medio acuático.
2. Compuestos organofosforados.
3. Compuestos organoestánicos.
4. Sustancias y preparados cuyas propiedades cancerígenas, mutágenas o que puedan afectar a la reproducción en el medio acuático o vía el medio acuático estén demostradas.
5. Hidrocarburos persistentes y sustancias orgánicas tóxicas persistentes y bioacumulables.
6. Cianuros.
7. Metales y sus compuestos.
8. Arsénico y sus compuestos.
9. Biocidas y productos fitosanitarios.
10. Materias en suspensión.
11. Sustancias que contribuyen a la eutrofización (en particular nitratos y fosfatos).
12. Sustancias que ejercen una influencia desfavorable sobre el balance de oxígeno (y computables mediante parámetros tales como DBO, DQO).

#### ANEJO 4

**Aspectos que deben tenerse en cuenta con carácter general o en un supuesto particular cuando se determinen las mejores técnicas disponibles definidas en el artículo 3.º, teniendo en cuenta los costes y ventajas que pueden derivarse de una acción y los principios de precaución y prevención**

1. Uso de técnicas que produzcan pocos residuos.
2. Uso de sustancias menos peligrosas.
3. Desarrollo de las técnicas de recuperación y reciclado de sustancias generadas y utilizadas en el proceso, y de los residuos cuando proceda.
4. Procesos, instalaciones o método de funcionamiento comparables que hayan dado pruebas positivas a escala industrial.
5. Avances técnicos y evolución de los conocimientos científicos.
6. Carácter, efectos y volumen de las emisiones que se trate.
7. Fechas de entrada en funcionamiento de las instalaciones nuevas o existentes.
8. Plazo que requiere la instauración de una mejor técnica disponible.
9. Consumo y naturaleza de las materias primas (incluida el agua) utilizada en procedimientos de eficacia energética.
10. Necesidad de prevenir o reducir al mínimo el impacto global de las emisiones y de los riesgos en el medio ambiente.
11. Necesidad de prevenir cualquier riesgo de accidente o de reducir sus consecuencias para el medio ambiente.
12. Información publicada por la Comisión, en virtud del apartado 2 del artículo 16 de la Directiva 96/61/CE, del Consejo, de 24 de septiembre, relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación, o por organizaciones internacionales.

**12996** LEY 17/2002, de 1 de julio, del régimen de cesión de tributos del Estado a la Generalidad de Cataluña y de fijación del alcance y condiciones de dicha cesión.

JUAN CARLOS I

REY DE ESPAÑA

A todos los que la presente vieren y entendieren.  
Saber: Que las Cortes Generales han aprobado y Yo vengo en sancionar la siguiente Ley.

#### EXPOSICIÓN DE MOTIVOS

I

La Constitución Española dispone, en su artículo 156.1, que las Comunidades Autónomas gozarán de autonomía financiera para el desarrollo y ejecución de sus competencias, con arreglo a los principios de coordinación con la Hacienda estatal y de solidaridad entre todos los españoles; es decir, reconoce la necesidad de que dichos entes territoriales cuenten con recursos propios para hacer efectivas sus respectivas competencias como consecuencia de la propia configuración del Estado de las autonomías. Así, entre los recursos antes citados, se encuentran los impuestos cedidos total o parcialmente por el Estado tal y como, expresamente, recoge el artículo 157.1.a) del texto constitucional; con el mandato, además, de una regulación, mediante ley orgánica, del ejercicio de las competencias que recoge el apartado 1 del artículo 157 citado.

Constituye, por tanto, la Ley Orgánica 8/1980, de 22 de septiembre, de Financiación de las Comunidades Autónomas (LOFCA) —recientemente modificada por la Ley Orgánica 7/2001, de 27 de diciembre, de modificación de la Ley Orgánica 8/1980, de 22 de septiembre, de Financiación de las Comunidades Autónomas—, el marco orgánico general por el que ha de regirse el régimen de cesión de tributos del Estado a las Comunidades Autónomas. En la referida modificación efectuada en la LOFCA se ha incorporado un nuevo catálogo de tributos susceptibles de cesión que, si bien no produce variación respecto a los tributos ya cedidos, sí produce, sin embargo, una importante innovación al retirar aquellas referencias genéricas a la «imposición general sobre las ventas en su fase minorista» y a «los impuestos sobre consumos específicos en su fase minorista, salvo los recaudados mediante monopolios fiscales»; catálogo en el que ya figura el nuevo Impuesto sobre las Ventas Minoristas de Determinados Hidrocarburos. De esta manera la LOFCA ha incorporado el Acuerdo del Consejo de Política Fiscal y Financiera de 27 de julio de 2001, el cual ha aprobado un nuevo sistema de financiación autonómica que incide sustancialmente en el régimen general de cesión de tributos.

Además, ese marco orgánico general se ha visto completado con la promulgación de la Ley 21/2001, de 27 de diciembre, por la que se regulan las medidas fiscales y administrativas del nuevo sistema de financiación de las Comunidades Autónomas de régimen común y Ciudades con Estatuto de Autonomía, derogando las hasta ahora vigentes Ley 30/1983, de 28 de diciembre, reguladora de la cesión de tributos del Estado a las Comunidades Autónomas —expresamente aplicable a las Comunidades Autónomas de Andalucía, Extremadura y Castilla-La Mancha—, y Ley 14/1996, de 30 de diciembre, de cesión de tributos del Estado a las Comunidades Autónomas y de medidas fiscales complementarias, pero derogación que quedará sin efecto para aquellas Comunidades Autónomas que no cumplan los requisitos del

