

Universidad de **Cádiz**

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

Facultad: CIENCIAS

Titulación: INGENIERÍA QUÍMICA

Título: Dimensionamiento de la capacidad de
tratamiento óptima de una planta para la oxi-
dación de residuos en agua supercrítica

Autor: Jorge CASAL GIL

Fecha: Julio 2007





Resumen

La continua innovación tecnológica junto con el aumento en el consumo de los recursos naturales llevan a un aumento de la contaminación en los procesos productivos en cualquiera de las tres formas posibles: líquida, sólida o gaseosa. Por este motivo la búsqueda de métodos de eliminación de esta contaminación es constante, siempre con el objetivo de que sean efectivos y respeten el medio ambiente; evitando el traslado de un medio a otro como ha ocurrido tiempo atrás.

Dentro de los métodos de eliminación se halla la oxidación en agua supercrítica, en adelante OASC, que está demostrando ser un método efectivo al permitir obtener efluentes de elevada pureza. El inconveniente de esta tecnología son sus elevados costes de inmovilizado y operación, debido a las severas condiciones de presión y temperaturas que se alcanzan durante la operación.

El objetivo del presente proyecto es dimensionar la capacidad de tratamiento óptima de una planta para la oxidación de residuos mediante agua supercrítica, buscando aquella planta cuyos costes de operación e inmovilizado sean los menores posibles, así como el desarrollo de un software que permita la estimación de cualquier instalación a partir de valores iniciales establecidos por el usuario; el software optimizará la función objetivo minimizando el coste de tratamiento por unidad de volumen tratado (€m^3).

El primer paso será realizar la búsqueda de las variables que resultan claves en el diseño de los equipos principales, reactor e intercambiador de calor, mediante el empleo del proceso de selección de variables por lo que será necesario conocer todas las ecuaciones que participan en el diseño de los equipos. El resto de equipos principales, bomba y compresor, vendrán determinados por la capacidad de la planta. Es decir, se seleccionarán una vez conocidas las condiciones de trabajo que afectan a estos equipos, caudal a tratar y exceso de aire, que se elijan para la instalación.

Tras esto se desarrollarán los algoritmos obtenidos durante la selección de variables realizadas. De esta forma, se conocerán cada uno de los pasos a dar durante los cálculos y que se mostrarán en un ejemplo para cada uno de los equipos. Así, será posible conocer las dimensiones físicas de los equipos. Para todo ello será necesario conocer las propiedades termo-físicas tanto de las especies a eliminar (que se considerarán siempre las del agua al ser baja la proporción de dichas especies en el residuo), como de los materiales a emplear en la instalación.

También se hace necesario comprobar que los tubos que se han seleccionado para el diseño son capaces de soportar la presión y temperatura de operación; por lo que se seguirá lo dictado por la norma ASME B31.1. Para los materiales de los tubos se han elegido dos materiales que son capaces de soportar las condiciones de operación y las severas condiciones de corrosión que se producen en los procesos OASC.

Una vez hecho esto se procederá a la optimización de las funciones de coste desarrolladas a partir de diversas ofertas recibidas, y que han sido tratadas teniendo presente los índices de coste de plantas de ingeniería química (CEPCI). Esto permite una actualización de dichos costes a fecha actual. Además, se han evaluado los costes de operación y el coste que supondrían dos operarios para poder obtener valores mucho más precisos.

Para la optimización se ha elegido el método de Rosenbrock, que permite trabajar con funciones de varias variables y que no presentan ningún tipo de restricción. Además, de él se dispone del código necesario para su programación lo que facilita su inclusión en la aplicación que se desarrollará a continuación.

La idea de desarrollar una aplicación informática en el entorno de Windows parte de la complejidad de los datos y cálculos que se manejan en los procesos OASC, esto permite disponer dentro de un mismo entorno todos los cálculos necesarios para el diseño de una instalación de este tipo, así como simular plantas que pudieran tener aplicación industrial. Para desarrollar dicha aplicación se ha recurrido a un lenguaje de programación muy común en el día a día, que es VisualBasic .NET, y que permite el

diseño del aspecto final que tendrá la aplicación para el usuario así como una mayor sencillez en la conversión de los cálculos al lenguaje elegido.

Al englobar todos los cálculos en un solo lugar resultará más fácil para el usuario su interpretación, al no tener que andar moviéndose de hoja en hoja como le ocurriría si, por ejemplo, emplease una hoja de cálculo. Además se evita el continuo juego que supone el andar modificando la identificación de las celdas al querer modificar algún cálculo del proceso.

	<u>Pág.</u>
1. Índice.....	1
2. Memoria Descriptiva.....	3
2.1. Introducción.....	3
2.2. Definición de residuos peligrosos (RP).....	5
2.3. Características de los residuos fenólicos.....	7
2.4. Características de los residuos de taladrinas.....	8
2.5. Oxidación hidrotérmica en condiciones supercríticas.....	12
2.6. Diagrama de una instalación OASC.....	20
2.7. Optimización de una planta de oxidación de residuos en agua supercrítica.....	22
2.8. Descripción de los equipos.....	25
3. Anexos de cálculo a la Memoria Descriptiva	
3.1. Anexo de selección de las variables de diseño.....	31
3.1.1. Selección de variables de diseño del reactor.....	34
3.1.2. Selección de variables de diseño del intercambiador de calor.....	38
3.2. Anexo de cálculo del reactor tubular.....	50
3.3. Anexo de cálculo del intercambiador de calor.....	68
3.3.1. Tramo supercrítico.....	82
3.3.2. Tramo de transición.....	86
3.3.3. Tramo subcrítico.....	88
3.3.4. Intercambiador de calor global.....	90

3.4. Anexo de cálculo de tuberías.....	94
3.5. Anexo de cálculo de optimización.....	103
3.5.1. Estimación del inmovilizado necesario para los elementos principales del equipo.....	104
3.5.1.1.Compresor.....	108
3.5.1.2.Tuberías.....	113
3.5.1.3.Bombas.....	116
3.5.2. Cálculo del inmovilizado.....	118
3.5.3. Optimización.....	128
3.6. Anexo de programación.....	137
Pliego de Condiciones.....	183
Generales.....	185
Particulares.....	203
Glosario.....	205
Bibliografía.....	208

2. Memoria Descriptiva

2.1 Introducción

El crecimiento de la población, junto con la mejora tecnológica, experimentada desde los años 80 han generado un mayor consumo de los recursos naturales, lo que conlleva un aumento de la contaminación en cualquiera de sus presentaciones: sólida, líquida o gaseosa.

Es por ello que se mantiene una búsqueda constante de métodos de eliminación efectivos y, a la vez, respetuosos con el medio ambiente.

Los problemas de contaminación han adquirido carácter internacional asociados a la disminución de la capa de ozono, como el del cambio climático, obligando a la búsqueda de grandes consensos entre un gran número de países, como el Protocolo de Kyoto (firmado el 11 de diciembre de 1997), que permitan un mayor control de las fuentes de contaminación.

Se busca el continuar creciendo económica e industrialmente con una mayor implicación de las empresas en la conservación del medio ambiente, lo que ha llevado a éstas a hacer grandes inversiones en políticas propias sobre medio ambiente. Además, a ello hay que añadir la obligación de cumplir distintas normativas impuestas por la Administración en materia ambiental y que pueden acarrear grandes multas a dichas empresas.

Históricamente, el principal problema planteado por los residuos era el de su eliminación. Hasta hace relativamente poco tiempo, finales de los años setenta, el destino que se les daba a los residuos era un tratamiento o se vertían a los distintos medios sin más. En general, el tratamiento de los residuos lo que hacía en ocasiones era trasladar la contaminación de un medio a otro, por ejemplo un tratamiento de aguas trae

consigo la producción de lodos que deben ser eliminados de alguna forma. La incineración de residuos sólidos produce gases, partículas y vapores que contaminarán el aire si no se realiza un tratamiento adecuado.

Desde los años setenta hasta nuestros días, el enfoque de la gestión medioambiental ha variado radicalmente a nivel mundial. Al examinar los distintos programas de actuación sobre el medio ambiente de la Unión Europea se observa el cambio de actuación con respecto a esta gestión. En el primer programa (1973-1976), la gestión estaba encaminada fundamentalmente al tratamiento y eliminación de residuos. El segundo (1977-1981), tercer (1982-1986) y cuarto programa (1987-1992) entran cada vez más de lleno en lo que se ha dado a conocer como *minimización de los residuos*, es decir, evitar que estos lleguen a producirse para no tener que tratarlos o eliminarlos. Por último, el quinto (1993-2000) sigue profundizando en la minimización de los residuos, estableciendo una jerarquía de opciones a la hora de gestionarlos:

1. La no generación de residuos.
2. Fomento de reutilización y reciclaje.
3. Optimización del tratamiento o eliminación.

Es en esta tercera opción donde queda enmarcado el presente proyecto.

2.2 Definición de residuos peligrosos (RP)

La ley 10/1998, de 14 de mayo, corresponde a la Ley Básica de Residuos Peligrosos, que de acuerdo con las prescripciones generales de la Directiva 78/319/CEE, define los Residuos Peligrosos como: *“Los materiales sólidos, pastosos, líquidos, así como los gaseosos contenidos en recipientes, que siendo resultado de un proceso de producción, transformación, utilización o consumo, su productor destine al abandono y contengan en su composición alguna de las sustancias y materias que figuran en el Anexo de la presente ley en cantidades o proporciones que representen un riesgo para la salud humana, recursos naturales y medio ambiente”*.

Esta ley deja al Gobierno la facultad para establecer esas concentraciones o cantidades. En la Tabla 1 se presentan los residuos considerados como tóxicos y peligrosos recogidos en el Anexo de la citada ley.

La ley española ha seguido la Directiva 78/319/CEE, con la inclusión de tres sustancias: los aceites usados, los residuos procedentes de la industria del dióxido de titanio, los policlorobifenilos (PCBs) y policlorotrifenilos (PCTs), que en la normativa comunitaria encuentran desarrollo independiente.

La gestión de los RP deberá asegurar que el destino final de los residuos no suponga un peligro para la salud humana, los recursos naturales y el medio ambiente, sin que en ningún caso el método de eliminación propuesto signifique un simple traslado de la contaminación de un medio receptor a otro, como podría ser el caso de la deposición sobre el terreno o la incineración no controlada que podría llevar la contaminación a las aguas o a la atmósfera.

Según el artículo 7 de la citada ley, los gastos originados durante la gestión, incluyendo operaciones de recogida, almacenamiento, transporte, tratamiento y

eliminación correrán a cargo de las personas o entidades productoras o gestoras que las hayan llevado a cabo o estén obligadas a hacerlo.

1. Arsénico y sus compuestos.	2. Mercurio y sus compuestos.
3. Compuestos organohalogenados, con exclusión de los polímeros inertes.	4. Talio y sus compuestos.
5. Los productos a base de alquitrán procedentes de operaciones de refinado y los residuos alquitranados procedentes de operaciones de destilación.	6. Compuestos de cromo hexavalente.
7. Plomo y sus compuestos.	8. Antimonio y sus compuestos.
9. El fenol y los compuestos fenólicos.	10. Residuos procedentes de la industria del titanio.
11. Isocianatos.	12. Cadmio y sus compuestos.
13. Los aceites minerales y sintéticos, incluyendo las mezclas aguas – aceite y las emulsiones.	14. Los disolventes orgánicos.
15. Los biocidas y las sustancias fitosanitarias.	16. Berilio y sus compuestos.
17. Los compuestos farmacéuticos.	18. Los peróxidos, cloratos, percloratos y nitruros.
19. Los éteres.	20. las sustancias químicas de laboratorio no identificables y/o nuevas, cuyos efectos sobre el medio ambiente no sean conocidos.
21. El amianto (polvos y fibras).	22. Selenio y sus compuestos.
23. Teluro y sus compuestos.	24. Cianuros orgánicos e inorgánicos.
25. Compuestos aromáticos policíclicos.	26. Carbonilos metálicos.
27. Compuestos solubles de cobre.	28. Sustancias ácidas y básicas utilizadas en los tratamientos de superficie de los metales.
29. Los disolventes clorados.	30. Otros.

Tabla 1: Relación de sustancias o materias consideradas peligrosas (10/1998 Abril, Ley Básica de Residuos Peligrosos). En negrita se indican los residuos objeto del presente proyecto.

2.3 Características de los residuos fenólicos.

Algunas de las principales características del fenol y sus derivados son las siguientes:

- Son muy tóxicos, principalmente por su acción sobre el sistema nervioso. La ingestión de un gramo de fenol puede ser fatal en seres humanos. Los fenoles se consideran tóxicos para algunas formas de vida en condiciones superiores a 50 ppb, y presentan, además, poder bactericida y bacteriostático.
- Presentan una demanda de oxígeno elevada (estequiométricamente 2,4 mg de oxígeno por mg de fenol), con lo cual contribuyen en gran medida al agotamiento del oxígeno en las aguas receptoras.
- Las aguas contaminadas con residuos fenólicos desprenden un intenso y nocivo olor, particularmente tras la cloración. Normalmente no se detecta sabor para concentraciones inferiores a 1 ppm, pero en algunos casos llega a percibirse para concentraciones de 0,1 a 0,01 ppm. El cloro que se añade al agua potable se combina con los fenoles dando lugar a compuestos difícilmente degradables y aun más tóxicos.

En base a la legislación comunitaria, en España la concentración media máxima permisible de fenol en vertidos a aguas continentales es de 0,5 ppm, y el límite de fenoles en aguas para consumo humano es de 0,5 ppb (D.O.C.E. 80/778/CEE).

Aunque en muchos procesos industriales se generan vertidos con algún compuesto de tipo fenólico, los efluentes fenólicos se producen principalmente en plantas de coquización, refinerías de petróleo e industrias petroquímicas, industrias de plásticos, procesos de gasificación y licuefacción del carbón, estañado electrolítico y plantas farmacéuticas.

El principal componente fenólico en los residuos procedentes de estas actividades suele ser el fenol, pero pueden también estar presentes fenoles dihidroxílicos e incluso trihidroxílicos. En la Tabla 2 (*García-Portilla y col., 1989*) se presenta la concentración de fenoles en varios efluentes industriales.

Industria	Concentración (ppm)
Coquerías	1000 – 2000
Gasificación y licuefacción del carbón	4000
Transformación del lignito	10000 – 15000
Fabricas de benceno	50
Refinerías de petróleo	2000 – 23000

Tabla 2. Concentración de fenol en diversas corrientes residuales. (*García – Portilla y col., 1989*)

2.4 Características de los residuos de taladrinas.

Se conoce como taladrinas, a los productos empleados como fluidos de corte y mecanizado, que se aplican al contacto pieza-herramienta para mejorar la operación en la que participan, esto es, para lograr un mejor acabado superficial, una producción más elevada y una vida más larga de la herramienta o la instalación.

Las funciones principales de los fluidos utilizados en la fabricación de piezas metálicas son:

- la lubricación, con objeto de prolongar la vida de las herramientas y reducir la energía de fricción,
- la refrigeración, con el fin de evitar un sobrecalentamiento de las piezas y herramientas,
- la evacuación de limaduras, indispensable para evitar el efecto abrasivo de las mismas y poder proseguir con la actividad en cuestión.

La composición de las taladrinas se elige en función del objeto básico de la operación teniendo siempre en cuenta que el mejor lubricante es el aceite y el mejor refrigerante es el agua. Pueden contener todas o parte de las sustancias que se indican en la Tabla 3.

Las taladrinas pueden clasificarse, de modo simplificado, en tres tipos:

- **Taladrinas en base a emulsiones de aceite.** El concentrado se aplica al 5% (variando del 3 al 10% según la clase) y contiene un 60 a 80% de aceites minerales o vegetales, un 20% de emulgentes, hasta un 10% de agua y un 10% de aditivos varios como anticorrosivos, bactericidas y aditivos de extrema presión. Se emplean en operaciones en las que la función lubricante de la taladrina es prioritaria, como la laminación y la embutición.
- **Taladrinas semi-sintéticas.** El concentrado se aplica entre el 2 y el 6% y contiene como base entre un 20 y 50% de agua, un 10 a 40% de aceite mineral o sintético, un 10 a 30% de emulgentes y un 10 a 30% de aditivos varios, básicamente anticorrosivos. Su uso se extiende a operaciones en las que la lubricación y refrigeración son importantes, como es el mecanizado (taladrado, fresado,...) y el rectificado.
- **Taladrinas sintéticas.** El concentrado se aplica de media al 2,5% (entre el 2 y el 5%). Su composición incluye un 40 – 60% de agua y aditivos varios como humectantes en un 20%, un 15 a 40% de anticorrosivos y un 10% de otros aditivos, pudiendo contener reducidas proporciones de aceite. Se emplea en operaciones en las que la función refrigerante de la taladrina es prioritaria, como es el mecanizado a alta velocidad y el rectificado.

Tipos de compuestos	Compuestos más empleados
Refrigerantes	Agua
Lubricantes	Aceite mineral (nafténicos, parafínicos...) Aceite vegetal/animal (aceite de colza...) Aceite sintético (glicoles...)
Emulgentes	Aniónicos (sulfonatos...) No iónicos (nonilfenoles, óxidos de etileno...)
Inhibidores de la corrosión	Aminas (monoditrietanolamina) Boratos Nitritos Otros (ácido butilbenzoico...)
Humectantes/estabilizantes	Alcoholes (poliglicoles) Fosfatos (fosfatos de aminas)
Biocidas	Formoles (triacinas y precursores) Fenoles
Aditivos extrema presión	Azufrados Clorados (parafinas cloradas) Otros (grasas, aditivos fosforados...)
Antiespumantes	Siliconas (alquil-aril polisiloxanos)
Complejantes	Orgánicos (EDTA...)
Colorantes	Diversos
Metales pesados	Molibdeno, cinc

Tabla 3. Compuestos típicos contenidos en gran parte en las taladrinas. (IHOBE, 1999).

Las taladrinas agotadas tienen cualidades irritantes y ecotóxicas debido a que contienen metales pesados, biocidas, gérmenes nocivos y productos de descomposición de carácter maloliente y/o tóxico, nitrosaminas, compuestos de boro, etc., que en caso de contacto con la piel pueden causar irritaciones y daños en los operarios. Por estas razones, la normativa española clasifica este residuo como peligroso. La Ley de Residuos 10/98 y los Reales decretos 833/88 y 952/97 regulan la manipulación y la gestión de estos residuos.

Los riesgos que entrañan estos aceites para la salud del usuario, tal y como señala la Nota Técnica de Prevención (NTP) 317 del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT) son:

- Afecciones cutáneas
- Alteraciones del tracto respiratorio
- Cáncer

Todo esto implica la necesidad incuestionable de tratar los vertidos procedentes de la utilización de las taladrinas previamente a su evacuación a los cauces receptores o a los colectores municipales. Por ello, es necesario conocer las ventajas y desventajas de las tecnologías de tratamiento más empleadas, tanto si se aplican en la propia fábrica como si se recurre a un gestor autorizado externo.

2.5 Oxidación hidrotérmica en condiciones supercríticas.

Los procesos de oxidación hidrotérmica se basan en la oxidación acuosa de residuos a elevadas presiones y temperaturas. La oxidación hidrotérmica en condiciones supercríticas, comúnmente denominada *Oxidación en Agua Supercrítica* (OASC), que tiene como antecedente a la oxidación húmeda, de la que se diferencia básicamente por operar en condiciones de presión y temperatura superiores a las que definen el punto crítico del agua (221 bar y 374°C).

Las especiales propiedades que presenta el agua en estado supercrítico han hecho que aumente el interés sobre su estudio como medio de reacción, principalmente para la oxidación de compuestos orgánicos, pero también como sustituto de disolventes orgánicos en reacciones químicas de síntesis.

Debido a la gran solubilidad de los compuestos orgánicos y del oxígeno en ella, puede considerarse un medio de reacción homogéneo, lo cual implica la eliminación de las limitaciones de transferencia de materia (O_2) de la fase gaseosa (aire) a la fase líquida (residuo). Esto, unido a la temperatura y densidad molecular del medio, posibilita que las reacciones de oxidación convencionales tengan lugar de forma rápida y completa en un reactor tubular, sin la necesidad de emplear medios mecánicos de agitación.

En la Fig. 1 se representa el diagrama de fases del agua. A lo largo de la curva de vaporización, a medida que aumenta la presión y la temperatura para las fases líquida y vapor en equilibrio, en el líquido disminuyen las interacciones moleculares debido a la expansión térmica. Por el contrario, para el vapor prevalece el efecto de la compresión frente al de expansión térmica produciéndose un aumento de las interacciones. De este modo, las propiedades del líquido y del vapor se van acercando hasta que, llegados al punto crítico, coinciden. En este punto existe una sola fase (supercrítica) con propiedades intermedias entre la región líquida y la región gaseosa.

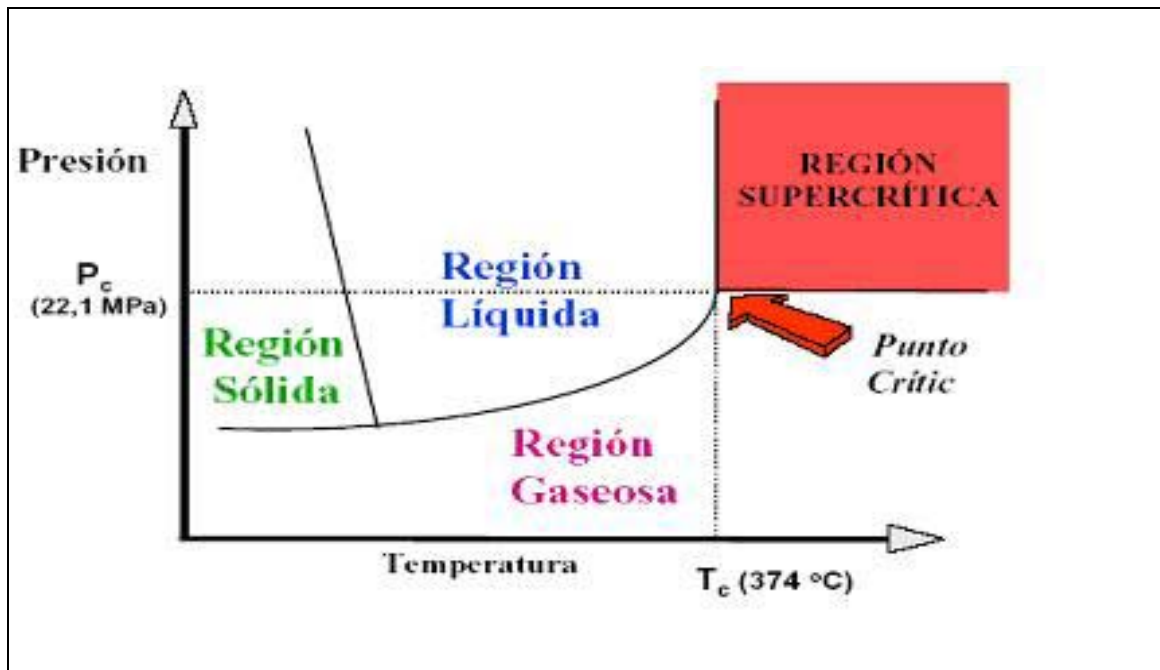


Fig. 1. Diagrama de fases del agua

Las principales características del agua supercrítica son:

1. **Densidad.** En las cercanías del punto crítico la densidad es una función extremadamente dependiente de la presión, ya que el fluido es altamente compresible. De esta forma las propiedades dependientes de la densidad, tales como el parámetro de solubilidad, la constante dieléctrica del disolvente y el volumen molar parcial del soluto sufren grandes cambios al producirse pequeñas variaciones en la presión y la temperatura.

Las propiedades del agua supercrítica podrán controlarse desde valores cercanos a los del líquido hasta valores próximos a los del estado gaseoso, simplemente variando las condiciones de presión y temperatura. En el punto crítico la densidad del agua es de 325 Kg/m^3 .

2. **Constante dieléctrica.** La constante dieléctrica del agua a 25 °C y 1 atm tiene un valor de 80 y es consecuencia de las uniones entre distintas moléculas por puentes de hidrógeno. Sin embargo, la constante dieléctrica disminuye hasta un valor entre 5 y 10 en las proximidades del punto crítico y hasta 1 – 2 a 450°C (Uematsu y Frank, 1980); por lo que el agua supercrítica tiene un comportamiento más parecido a un disolvente apolar que a uno polar. Las interacciones que predominan en estas condiciones son las dipolo – dipolo. Así, el agua como fluido supercrítico es un disolvente eficaz para compuestos orgánicos y es completamente miscible con gran cantidad de gases, incluido el oxígeno.

3. **Producto Iónico.** El producto iónico, o constante de disociación (K_w), del agua es hasta tres órdenes de magnitud mayor en la región líquida cercana al punto crítico que a temperatura ambiente. Esto significa que, en esas condiciones, pueden existir concentraciones mayores de iones H^+ y OH^- , por lo que puede ser un medio efectivo para reacciones catalizadas por ácidos o bases. Sin embargo, una vez que se supera el punto crítico, K_w disminuye drásticamente por lo que el agua se convierte en un medio pobre para las reacciones iónicas.

4. **Viscosidad.** El agua supercrítica presenta una viscosidad un orden de magnitud menor que el agua líquida y, por lo tanto los coeficientes de difusión y movilidad iónica son un orden de magnitud mayor.

Cuando la densidad del agua supercrítica es alta su viscosidad es baja comparada con la que corresponde al líquido en condiciones normales. De este modo las moléculas de soluto difunden con facilidad a través del agua supercrítica, hecho que ayuda a que sea un medio muy favorable para que las reacciones tengan lugar a gran velocidad.

5. **Calor específico.** El calor específico varía en un amplio rango de presión y temperatura, con valores que tienden a infinito en las cercanías del punto crítico. Esto se debe al aporte energético que se necesita para realizar la

fuerte expansión térmica que sufre el agua en las cercanías del punto crítico (*Shaw y col, 1991*).

6. **Conductividad térmica.** La conductividad térmica del agua aumenta, a presión constante, con la temperatura hasta alcanzar un máximo a los 250 °C para disminuir levemente a temperaturas supercríticas como consecuencia de la ruptura de los puentes de hidrógeno.

En principio, cualquier compuesto orgánico puede ser completamente oxidado en agua supercrítica hasta compuestos relativamente inocuos, dando como productos mayoritarios dióxido de carbono y agua. Los compuestos que contengan nitrógeno, independientemente de su estado de oxidación, son oxidados a N_2 y N_2O pues, como predicen los cálculos termodinámicos, no se producen otros óxidos de nitrógeno (NO_x) debido a las relativamente bajas temperaturas de operación. De hecho las emisiones de NO_x son generalmente del orden de 1 ppb.

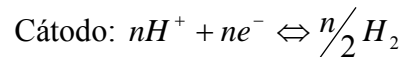
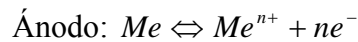
Las reacciones que tienen lugar en un proceso OASC son fuertemente exotérmicas, por lo que si el residuo contiene una capacidad calorífica adecuada sólo es necesario un aporte calorífico para iniciar el proceso, llegándose a generar posteriormente el calor necesario para hacerlo autosuficiente y generar incluso exceso de energía. Generalmente, una concentración entre un 1 y un 20% en peso de compuestos orgánicos es más adecuada para el tratamiento mediante el proceso OASC.

En sistemas en continuo el efluente puede utilizarse para calentar la corriente de alimentación hasta la temperatura supercrítica, por medio de un intercambiador de calor o bien recirculando parte del mismo al reactor (esta alternativa tiene el inconveniente que disminuye la capacidad de tratamiento del proceso ya que al aumentar el caudal de alimentación desciende el tiempo de residencia en el reactor), manteniendo siempre las condiciones de operación.

Dada las características del proceso OASC será necesario prestar atención a la posibilidad de que se produzca corrosión en cualquiera de las instalaciones de la planta. Esto ya se pudo observar en los primeros experimentos con residuos que contenían residuos clorados. En la actualidad, se han identificado los dos principales fenómenos de corrosión en agua supercrítica: *corrosión electroquímica* y *corrosión química*

Corrosión Electroquímica

Se produce cuando en el material se acoplan dos reacciones electroquímicas, de forma que parte del material actúa como ánodo y otra parte actúa como cátodo



Donde Me es el metal.

Debido a la presencia de la especie H^{+} también es conocida como corrosión ácida. Ya existen modelos cinéticos teóricos que permiten señalar que para conseguir una reducción en los efectos de la corrosión electroquímica es aconsejable operar a temperaturas alejadas del punto crítico (inferiores o superiores) y presiones bajas.

Corrosión Química

Es debida a la reacción del material que forma la pared del reactor con especies químicas agresivas no disociadas, tales como Cl_2 , HCl , O_2 , etc. La presencia de estas especies aumenta a medida que aumenta la temperatura en el agua supercrítica, por lo que la velocidad de corrosión química aumenta siempre con la temperatura, sin llegar a un máximo.

Por lo que si se tiene en cuenta ambos fenómenos de corrosión de manera conjunta, el rango de temperaturas en el que la corrosión global es menor está entorno a los 450 °C.

Por tanto, se hace necesario seleccionar materiales que puedan soportar estas condiciones de trabajo, siendo los más empleados en la actualidad el acero inoxidable 316 y las aleaciones con alto contenido en níquel (Hastelloy C-276 e Inconel 625). Además se han realizado estudios con otros materiales (Titanio, cerámicas, etc.), pero dado su elevado precio y su baja resistencia a altas presiones, respectivamente, no se emplean en las instalaciones.

Acero Inoxidable 316

Como puede observarse en la tabla (), el comportamiento de este material en distintas condiciones de operación hidrotérmica puede oscilar desde pobre hasta excelente según la combinación de la temperatura de operación, y naturaleza del residuo a tratar. Es conocido que los aceros inoxidables son susceptibles de sufrir corrosión general y localizada en variedad de medios que contengan cloruros a temperaturas medias y elevadas. En general, la mayoría de estudios reflejan que el acero 316 sufre corrosión uniforme y tipo picadura, aunque puede ser utilizado para el proceso OASC, siempre que el medio esté exento de cloro o éste se encuentre en bajas concentraciones. Por lo que se establece que la especificación del acero a emplear en este caso sea: A312, Grado TP 316L; según ASME B31.1

Material del reactor	Nombre Aleación	Condiciones operativas	Comportamiento frente a la corrosión	Tipo de corrosión
Acero Inoxidable	316	Agua DI (300-500 °C)	Excelente	U
	316	Organoclorados (600 °C)	Pobre	U y P
	316	Mínimo Cl ⁻ y pH 2-11 (500 °C)	Buena	P y G
	316	pH > 12 (500°C)	Pobre	CBT y O
Aleación con alto contenido en níquel	C-276	Agua DI (300-500 °C)	Buena-Excelente	U y P
	625	Agua DI (300-500 °C)	Buena	U y P
	625	Organoclorados (600 °C)	Regular	U y P
	C-276	Organoclorados (600 °C)	Regular	U y P
	C-276	Organoclorados (300 °C)	Regular	O y CBT
	600	Rango subcrítico	Excelente	U
Titanio	grado 7	pH 0-10 (500°C) + Cl ⁻	Excelente	U
	2 y 12	Rango subcrítico	Excelente	U
	2 y 7	Rango subcrítico	Excelente	U
Cerámicas	Alúmina	pH 2-12, 400 ppm de Cl ⁻ (350-550 °C)	Pobre	U y O
	SiC,			
	Si ₃ N ₄			
	Zirconio			

Tabla 3: Comportamiento de los materiales que han sido motivo de estudio en los últimos años

Aleaciones Con Alto Contenido En Níquel

Las dos más empleadas son las anteriormente indicadas (Hastelloy e Inconel). Ambas son soluciones sólidas a base de níquel con grandes cantidades de Cr y Mo para aumentar la resistencia a los fenómenos de corrosión localizadas. Su empleo está indicado cuando exista la presencia de compuestos químicos muy corrosivos en medios oxidantes, como pueden ser altas concentraciones de cloruros.

También está justificado su uso para altas temperaturas y/o medios agresivos, ya que su precio es muy superior al del acero 316.

A pesar de las propiedades tan prometedoras que desde un principio ha presentado y demostrado el proceso OASC existen tres problemas fundamentales:

- El primer problema que presenta es la naturaleza corrosiva del medio de reacción debido a las severas condiciones de operación. Además, los problemas de corrosión se ven incrementados por la presencia de compuestos tóxicos clorados, puesto que la combinación de cloro, oxígeno y agua supercrítica es altamente corrosiva.
- Otro gran problema que presenta el proceso OASC aparece en el tratamiento de residuos inorgánicos en el medio de reacción. En general, los óxidos sólidos que se forman son adherentes y se desplazan junto al fluido, mientras que las sales, principalmente las que contienen cloro, sulfato o carbonato, se adhieren tenazmente a las superficies sólidas con las que entran en contacto, pudiendo provocar la obstrucción del reactor.
- Por último, los elevados costes de inmovilizado propios del proceso OASC dada su naturaleza y características. Son necesarias instalaciones capaces de operar a altas presiones y temperaturas que elevan los costes de bombeo y compresión. También han de ser capaces de soportar altos grados de corrosión, como ya se había indicado, por lo que se suelen emplear reactores contruidos con aleaciones de alta resistencia a la corrosión. Esto incrementa la inversión de capital; por lo que desde el punto de vista económico el proceso OASC sólo es viable para el tratamiento de residuos altamente contaminantes y difíciles de eliminar mediante las tecnologías convencionales. Se puede estimar que el proceso OASC resultará más económico cuanto mayor sea la eficacia de la eliminación alcanzada y cuanto más se reduzca el volumen del reactor, ya que un elevado porcentaje del coste total del equipo se debe al propio reactor.

Sin embargo, a pesar de estos inconvenientes, la elevada eficacia de eliminación de residuos hace que el proceso OASC esté considerado como ideal desde el punto de vista medioambiental, pues cumple holgadamente las exigencias más restrictivas recogidas en la legislación. Además, si el residuo acuoso tiene una composición básicamente de tipo orgánico y exento de cloruros, como pasa en el caso de residuos de taladrinas, los problemas de corrosión y precipitación de sales no existen. Salvados pues estos inconvenientes, el proceso OASC puede ser económicamente viable si se minimizan los costes de operación, lo cual es posible si se aprovecha el calor generado en la reacción.

2.6 Diagrama de una instalación OASC

En la Fig. 2 se observa la disposición más habitual de una planta de tratamiento de residuos mediante OASC.

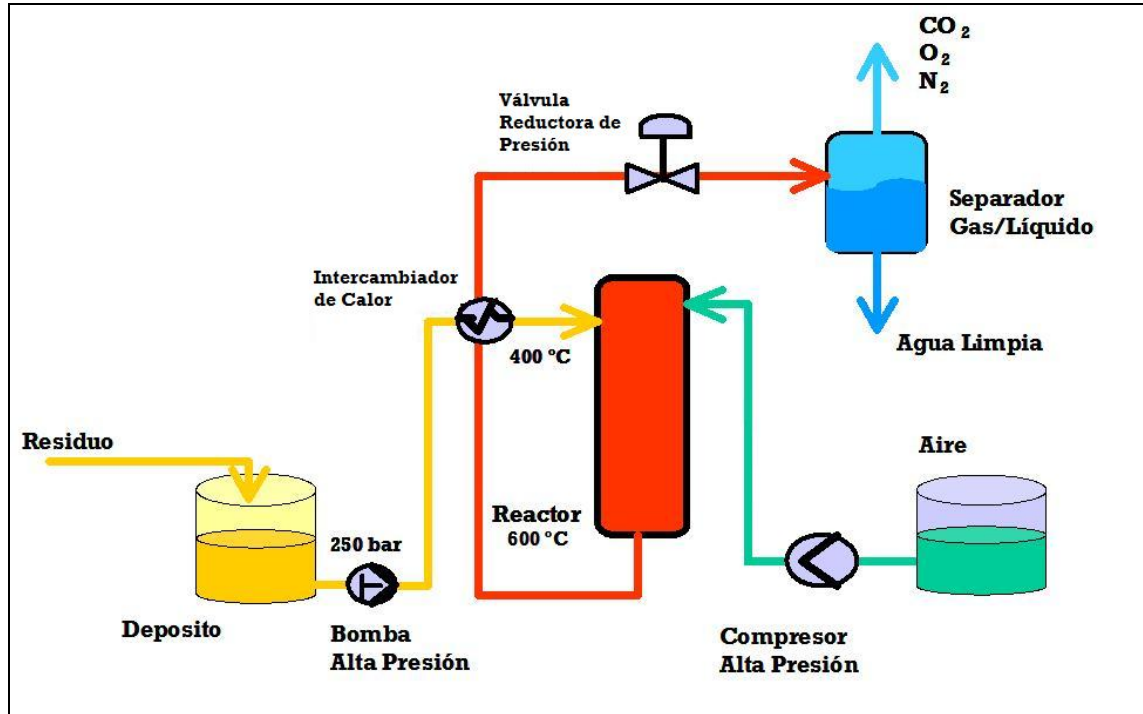


Fig. 2. Diagrama instalación OASC

Siguiendo el recorrido de la corriente a tratar se observa que el residuo va a ser bombeado desde un depósito donde se encuentra almacenado hasta su entrada en un reactor tubular donde tendrá lugar la reacción, previo paso por un intercambiador de calor que va a permitir a la corriente de residuo alcanzar la temperatura necesaria para el comienzo de la reacción (400 °C), y alcanzando la presión de proceso (25 MPa). A la vez, desde otro depósito, se impulsará el aire necesario para la reacción hasta la entrada del reactor tubular a la presión adecuada para el proceso.

Ambas corrientes entrarán a la vez en el reactor tubular para llevar a cabo la reacción siguiendo una cinética previamente estudiada. La corriente de efluente sale del reactor, a 600 °C, y se dirige hacia el intercambiador de calor, anteriormente citado, consiguiendo de esta manera el calentamiento de la corriente de residuo, si el calor generado en el proceso es suficiente para precalentar el residuo hasta la temperatura necesaria a la entrada del reactor, se dice que el sistema trabaja en régimen autotérmico y no es necesario ningún aporte de calor adicional para dicho precalentamiento. Y además se consigue un descenso de la temperatura del efluente una vez sale éste del reactor.

El penúltimo paso que se observa es el de una válvula reductora de presión, que disminuirá la presión de la corriente hasta la atmosférica para, de esta manera, llegar a un separador gas-líquido donde se permitirá la emisión de los gases producidos en la reacción y arrastrados en la corriente de efluente, desde este separador el efluente se dirige hacia un tanque donde se almacenará hasta que sea precisa su descarga

Este diagrama es una representación simplificada de lo que realmente se podría encontrar en una planta. En este proyecto no se valorarán todos los equipos ahí representados, sino que se ceñirá a los equipos principales de la instalación, que representan el mayor porcentaje de coste de la planta (>70%) y que son: El reactor, el intercambiador de calor, la bomba de residuo y el compresor.

2.7 Optimización de una planta de oxidación de residuos en agua supercrítica.

Objetivo: Dimensionar la capacidad de tratamiento óptima de una planta para la oxidación de residuos en agua supercrítica, buscando aquella planta cuyos costes de operación e inmovilizado sean los menores posibles, así como el desarrollo de un software que permita dimensionar cualquier instalación a partir de valores de partida establecidos por el operador, el software optimizará la función objetivo minimizando el coste de tratamiento en €/m³.

Después de la descripción realizada para la Fig. 2 de una planta OASC, a continuación se procederá a describir los equipos de la instalación siguiendo el orden de importancia.

El primer paso a realizar será la selección de variables de diseño de los dos equipos principales de la instalación, que son el reactor y el intercambiador de calor, para lo que se estudiarán los grados de libertad de cada uno de ellos por separado, y posteriormente se tendrá en cuenta la interacción entre los dos sistemas. Para ello se empleará el “*Algoritmo de selección de variables de diseño*”, que permite dos cosas:

1. Seleccionar las variables de diseño.
2. Determinar el orden de cálculo de las ecuaciones: es decir, la secuencia en la que habrá que resolver las ecuaciones y dónde se introducen las variables obtenidas.

Para llevar a cabo este algoritmo previamente será necesario analizar los grados de libertad de cada equipo, es decir, conocer el número de variables y ecuaciones que intervienen normalmente en el diseño de cada unidad. Este proceso se detallará en el “*Anexo de cálculo de selección de variables de diseño*”.

Realizada esta selección, se diseñarán ambos equipos, lo que se hará ejemplificando dichos cálculos con un caso “ideal”, cuyas condiciones iniciales serán:

- Especie: Fenol
- Concentración: 20000 mg/l
- Caudal a tratar: 200 Kg/h
- Conversión: 0,97
- Coeficiente exceso aire: 1,2

De esta forma se justificarán las hipótesis adoptadas para el diseño y cálculo de las unidades.

Para ello será necesario obtener los valores de las propiedades físico-químicas de las especies participantes en la reacción dentro del rango de temperaturas y presión en el que va a operar el sistema.

Una vez obtenidas las características de las unidades del sistema y, conocidos datos económicos de equipos similares, se podrán evaluar los costes de la instalación con el fin de hallar una función objetivo que permitirá someterla a un proceso de optimización, debiendo obtener como resultado el mínimo coste de operación e inmovilizado; siempre en función de las variables presentes en dicha función objetivo.

El lenguaje de programación ha sido VisualBasic .NET, por la facilidad de programación y permitir el diseño del aspecto externo de la aplicación de una manera intuitiva y cómoda, además de ser por si mismo una aplicación del sistema operativo más utilizado en la actualidad. Tras haber desarrollado todas las expresiones y cálculos, se transformarán al lenguaje de programación elegido, VisualBasic .NET, de esta manera se dispondrá de una aplicación que permitirá la automatización de todos estos cálculos y, por tanto, la estimación de la capacidad óptima, desde el punto de vista económico, de distintas plantas según las características de la corriente a tratar, es decir, a partir de los datos del tipo de residuo a tratar, el programa debe ser capaz de encontrar

los valores óptimos para las variables de diseño, y por tanto dimensionar la planta de tratamiento OASC que sería necesaria para tratar dicho residuo.

Como podrá comprobarse a lo largo de este proyecto, el objetivo queda muy lejos de los cálculos mecánicos propios del diseño de la instalación, aunque ello no signifique que no se han realizado para justificar las decisiones tomadas.

Además de lo indicado, siempre se fija como requisito que el programa dimensione instalaciones que queden dentro del ámbito de la legislación vigente en lo que respecta al vertido de aguas (Directiva 80/778 CEE).

Dada las características del proceso OASC será necesario prestar atención a la posibilidad de que se produzca corrosión en cualquiera de las instalaciones de la planta, como se detalló en el apartado 5 de esta “*Memoria Descriptiva*”.

2.8 Descripción de los equipos

- **REACTOR TUBULAR**

Es la unidad más importante de la instalación, pues es en este equipo donde se va a llevar a cabo la reacción de oxidación de los residuos acuosos a efluentes de fácil eliminación.

Para el tipo de Proyecto que se está desarrollando, se ha creído conveniente el empleo de un *Reactor Tubular* puesto que este tipo de reactores son muy empleados en procesos en continuo, o en aquellos en que se debe operar a altas presiones; así como que sea necesaria una alta conversión de la reacción que se lleva a cabo. En el presente proyecto se presenta una combinación de todas las nombradas anteriormente.

Como bien es sabido este tipo de reactor, en su forma más sencilla, es un tubo por el cual fluye el medio de reacción. Resultando por lo tanto la estructura más simple para un sistema continuo de reacción.

El flujo pistón es una idealización del modelo de flujo de un fluido por un reactor tubular. Este modelo supone que todos los elementos del fluido se mueven con una velocidad uniforme y constante a lo largo de líneas paralelas de corriente, siendo este flujo perfectamente ordenado el único mecanismo de transporte que se tiene en cuenta en el modelado de un reactor tubular de flujo pistón. Si los efectos de la dispersión radial o longitudinal no son despreciables, la suposición de flujo pistón ya no es válida, y han de utilizarse modelos de flujo más complejos.

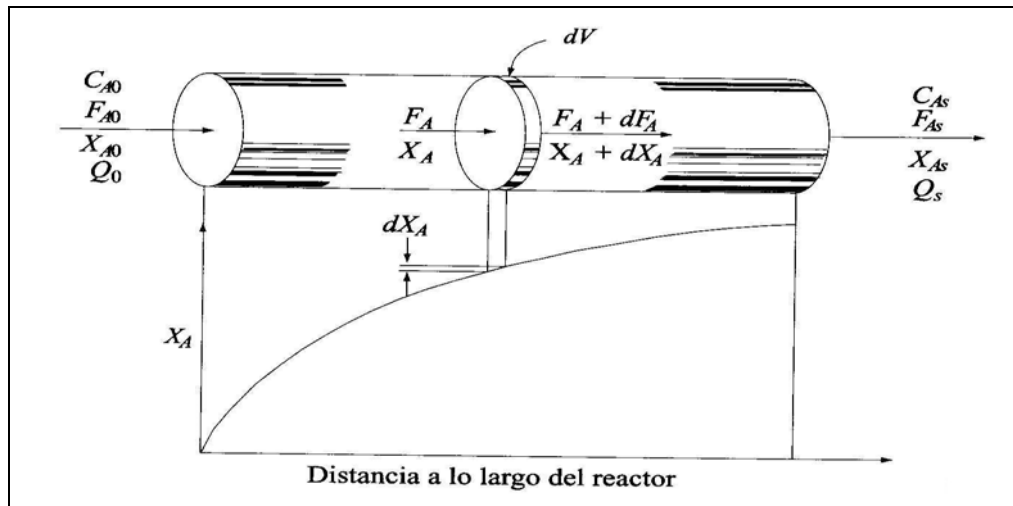


Fig. 4: Esquema de un reactor de flujo pistón

El diseño de este tipo de reactores ha de realizarse teniendo en cuenta que la composición del fluido varía a lo largo del reactor y que, por lo tanto, los balances de materia, energía y cantidad de movimiento han de realizarse sobre un volumen diferencial de reacción. Desde un punto de vista del intercambio de energía con el exterior se considerará un reactor adiabático, es decir, que gracias al aislamiento exterior la cantidad de calor intercambiado con el exterior puede considerarse nula. La justificación de esta decisión está en que interesa aprovechar el calor generado en el proceso para precalentar la alimentación al reactor, y este aprovechamiento del calor de reacción será máximo mejor aislado térmicamente esté el reactor.

Se puede demostrar que la aproximación al comportamiento de flujo pistón es adecuada al comprobar que el valor del número de Reynolds (Re) es de 90000, siendo $Re \geq 10000$ el indicado por la bibliografía para el régimen turbulento; pudiendo encontrarse en la bibliografía que el flujo en régimen turbulento es el más próximo al perfil ideal presentado por el flujo pistón. Ya que en el régimen turbulento el perfil de velocidades es bastante plano en la mayor parte de la sección transversal del reactor.

Las condiciones de operación que se darán en el reactor serán de una presión de 250 bar y una temperatura que abarcará desde los 673 K hasta los 873 K, rango en el que transcurren la reacción OASC. Se ha realizado la comprobación mecánica respecto a los espesores de los tubos seleccionados para saber si podrían soportar la presión de

operación, por lo que se ha establecido la presión de diseño un 10% por encima del valor de la presión de operación, y se ha elegido un sobreespesor de corrosión de 1,5 mm, que es el caso más desfavorable como indica la norma ASME B31.1., que se ha empleado para estas comprobaciones. Estos cálculos se desarrollarán en el “*Anexo de Cálculo de Tuberías*”

• **COMPRESOR**

La función de los compresores es introducir la cantidad necesaria de aire en el sistema, para que el oxígeno que contiene lleve a cabo las reacciones de oxidación correspondientes. En esta aplicación, es necesario comprimir el aire hasta 250 bar, por lo que son pocos los equipos capaces de proporcionar dicha presión, lo que encarece el precio de la unidad.

Se ha recurrido a una casa comercial (*BAUER Kompressoren*) para poder disponer de información de una gama de modelos que cumpliesen con las necesidades de aporte de aire a la instalación; de esta forma se pueden establecer los caudales máximos y mínimos que estos pueden aportar y, a la vez, poder hacer una estimación tanto de caudal como de precio en el supuesto de que se necesitasen equipos de mayor capacidad de los reseñados.

Datos Técnicos:

MODELO	F.A.D.		PRESIÓN DE TRABAJO MÁXIMA		r.p.m	MOTOR Kw	SISTEMA FILTRO	PESO APROXIMADO		MEDIDAS		
	L/M	Cfm	bar	psi				Kg	Lbs	L	A	H
v12.14-5,5-5	260	9,2	330	4700	1120	5,5	P61 O P81	420	925	148	83	152
v12.14-7,5-5	320	11,5	330	4700	1390	7,5		425	935			
v150-11-5	520	18,5	330	4700	1320	11		465	1020			
v180-15-5	630	22	330	4700	1320	15		480	1050			

Tabla 4: Datos técnicos de la gama de compresores Verticus

• **BOMBA ALTERNATIVA**

La elección del tipo de bomba se ha realizado en base a la experiencia del *Grupo de Análisis y Diseño de Procesos con Fluidos Supercríticos* del *Departamento de Ingeniería Química, Tecnología de Alimentos y Tecnologías del Medio Ambiente*, pues este grupo dispone de una planta piloto donde se han seleccionados materiales y equipos muy similares a los tomados como referencia para este proyecto.

La necesidad de este tipo de bomba es la de impulsión de la corriente de residuo a lo largo de la instalación, siempre a la presión necesaria en todo el sistema (250 bar). Como en el caso de los compresores, no se entrará en cálculos de diseño ni de pérdidas de carga por parte del equipo. En este proyecto la bomba necesaria estará fijada en el momento en que lo esté el caudal de residuo a tratar. Así sólo se tendrán en cuenta los caudales que puedan impulsar estas bombas, así como sus precios ya que de esta manera se realizará una estimación de ambas características para cualquier otro tipo de bomba de la que no se disponga de dichos datos.

El funcionamiento de una bomba alternativa consiste en un pistón cilíndrico avanzando y retrocediendo dentro de una cámara, de forma que va impulsando el fluido. Es decir, la bomba alternativa reduce la presión en la cámara de succión y la presión externa, generalmente la atmosférica, empuja el líquido en la bomba.

Datos Técnicos:

Caudal (l/h)	Potencia (Kw)
0,9	0,25
5,48	0,37
23	1,1
107	4
231	15
438	18,5

Tabla 5: Datos técnicos de diversas bombas Dosapro Milton-Roy

- **INTERCAMBIADOR DE CALOR**

Uno de los aspectos más interesantes del sistema de oxidación hidrotérmica la posibilidad de recuperar parte del calor del efluente del reactor para calentar la alimentación al mismo de manera que el sistema se mantenga autotérmicamente. Esto es posible porque las reacciones de oxidación son fuertemente exotérmicas y el calor generado puede ser suficiente para precalentar la alimentación del sistema

Al poder precalentar la corriente de entrada de residuo con la de efluente se produce un ahorro energético durante el funcionamiento de la planta, pues no será necesario usar energía eléctrica continuamente ya que la energía generada en el sistema se empleará con este fin. Además, el uso de una corriente de residuo precalentada permite que se alcance más rápidamente la velocidad de reacción, al estar el residuo a la temperatura adecuada cuando vaya a entrar al reactor.

Dada las características de la instalación y, el medio de reacción empleado no se disponen de datos bibliográficos sobre este tipo de instalaciones, por lo que los valores del área de transferencia de calor y coeficiente global de transferencia de calor han sido estimados de manera teórica, siempre teniendo presente todas las variables que afectan al diseño de un intercambiador como puede comprobarse en el *“Anexo de cálculo del intercambiador de calor”*

A pesar de la existencia de muy diversos tipos de intercambiadores en el mercado, se optó por un intercambiador de doble tubo en contracorriente por la sencillez de diseño y la inviabilidad de otro tipo de intercambiadores por la elevada presión de operación (250 bar). Y, a la hora de considerarlo para el apartado económico resultará más asequible utilizar tubos concéntricos que recurrir a casas comerciales que deberían diseñar el equipo específico para cada uno de los casos que se podrían simular.

Como en el caso del reactor sólo se buscarán las características principales en el diseño del intercambiador, pero se ha realizado un breve estudio del comportamiento de los tubos de los materiales seleccionados a la presión y temperatura de operación para comprobar que pueden soportar estas condiciones de operación. Cualquier otro estudio más a fondo sobre este punto deberá ser cuestión de otro proyecto más específico. Al igual que en el caso del reactor, dicho estudio se ha realizado siguiendo la norma ASME B31.1, para lo que se han empleado las mismas hipótesis de diseño que en el caso del reactor tubular.

- **LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN**

Como lenguaje de programación se ha escogido VisualBasic .NET, un lenguaje de programación consistente en un entorno gráfico muy empleado para el desarrollo de aplicaciones en el entorno Windows, además de permitir el enlace a base de datos por lo que resulta muy útil en el caso de emplear gran número de datos dentro de la aplicación a desarrollar. El desarrollo de la aplicación consistirá en convertir al lenguaje de programación las expresiones desarrolladas en las hojas de cálculo realizadas en cada uno de los respectivos anexos, de manera que permita automatizar los cálculos evitando de esta manera la complejidad asociada a modificar las respectivas celdas según varíen los parámetros de diseño en la hoja de cálculo.

3. Anexos de cálculo a la Memoria Descriptiva

3.1 Anexo de cálculo de selección de variables de diseño

Un instrumento útil para abordar los grandes problemas de ingeniería es la *estructura del flujo de información*, donde la información pasa de un componente a otro dentro de un sistema de procesos a través de variables comunes a los procesos, siendo la salida de un componente la entrada en otro. Esto proporciona un esqueleto sobre el que organizar una estrategia de cálculo ordenada.

Primero se definirán algunos conceptos que serán de uso habitual a lo largo del presente anexo:

- Variable de diseño: variables que pueden fijarse libremente para conseguir un proceso más eficaz. El número de estas variables definen los *grados económicos de libertad*. Como ejemplo en este proyecto se encuentran: caudal a tratar, temperaturas, concentración, diámetros, coeficiente de exceso de aire.
- Relaciones de diseño: toda aquella información expresada normalmente a través de ecuaciones que permiten conocer el comportamiento de cada componente del sistema, debiendo ser independientes. Como ejemplo se encuentran en este proyecto: Ecuación de diseño RFP, Ecuación Cinética, Ecuación de Arrhenius, etc.
- Variables de estado: son el resultado de la resolución de las relaciones de diseño mediante las variables de diseño y las variables fijas.
- Variables fijas: variables a las que se le asignan valores definidos proporcionando una conexión entre el proceso y los alrededores. En este proyecto son ejemplo de variables fijas: presión, entalpía, energía de activación, etc.

Para realizar este proceso de selección de variables de diseño se empleará el proceso de *ordenación estructural*, cuyos objetivos son dos:

1. Seleccionar las variables de diseño más adecuadas desde el punto de vista de la resolución.
2. Establecer la secuencia de cálculo apropiada para resolver las ecuaciones empleadas en el diseño.

Se pueden dar tres casos distintos de resolución en función del número de variables (incógnitas) y de relaciones de diseño (ecuaciones) de las que se dispongan para el análisis.

- Caso I: **Contradicción:** Cuando existen más relaciones de diseño independientes que variables, el problema no está bien formulado y generalmente no es posible encontrar valores para todas las variables que satisfagan las relaciones de diseño.

- Caso II: **Ninguna Libertad:** Cuando hay tantas relaciones de diseño como variables en un problema bien formulado, no existe ninguna libertad en la selección de los valores de las variables. Sólo ciertos valores definidos de las variables satisfacen las relaciones de diseño, por tanto la solución es única y no se puede optimizar.

- Caso III: **Grados de Libertad:** Cuando un problema de diseño bien formulado contiene más variables que relaciones de diseño, existen en él algunas variables cuyos valores no están especificados, y pueden tomar diferentes valores, ofreciendo así una gama de condiciones de operación posibles. La existencia de estas alternativas es la característica esencial de un problema de optimización.

Una vez se identifique el caso al que pertenece cada uno de los equipos, se procederá a realizar el proceso de *ordenación estructural*. Consistente, de forma resumida, en el siguiente algoritmo:

1. Se construye una tabla donde se sitúan en las columnas las variables y en las filas las ecuaciones.
2. No se incluirán las variables cuyos valores son fijos, ni las variables de diseño preestablecidas, si existieran.
3. Asignar X en cruces de variables y ecuaciones donde aparezcan dichas variables.
4. Localizar una columna que contenga una sola X.
5. Se eliminan la columna y fila correspondiente a la X y se anota el orden de eliminación.
6. Se continúa de esta manera hasta eliminar todas las filas y columnas.
7. Las columnas que no han sido eliminadas representan variables de diseño.
8. El orden de resolución es el inverso al orden de eliminación.

3.1.1. Selección de variables de diseño del reactor

Antes de realizar la selección propiamente dicha, se deberán definir todas las relaciones de diseño que intervienen en el proceso, permitiendo conocer las variables que afectarán al sistema y cuales intervendrán de forma decisiva en el diseño de la unidad.

Por ello, se listan a continuación esas ecuaciones haciendo una breve descripción de las variables que de ellas forman parte.

Ecuación de Diseño de RFP

$$\frac{V}{F_{a_0}} = \int_{X_{a_0}}^{X_{a_s}} \frac{dX_a}{(-r_a)} = \sum \frac{\Delta X_a}{(-r_a)} \quad (1)$$

- V = Volumen del reactor.
- F_{a_0} = Caudal másico de componente a la entrada del reactor (expresado como DQO).
- dX_a = Variación de la conversión a lo largo del reactor.
- $(-r_a)$ = Velocidad de reacción.

Balance de Materia

$$F_a = F_{a_0} (1 - X_a) \quad (2)$$

- F_a = Caudal másico de componente a la salida del reactor.
- F_{a_0} = Caudal másico de componente a la entrada del reactor.
- X_a = Conversión de la reacción.

Exceso de Oxidante

$$F_{O_2} = n \cdot F_{a_0} \quad (3)$$

- F_{O_2} = Caudal másico de oxígeno.
- n = coeficiente de exceso de oxígeno
- F_{a_0} = Caudal másico de componente a la entrada del reactor (expresado como DQO).

Proporción de Oxígeno en Caudal de Aire

$$F_{O_2} = \frac{21}{100} \cdot F_{aire} \quad (4)$$

- F_{aire} = Caudal másico de aire.
- $21/100$ = Relación estequiométrica entre oxígeno y aire.
- F_{O_2} = Caudal másico de oxígeno.

Balace de Energía RFP Adiabático

$$T_s = T_e - \frac{(-\Delta H_r) \cdot F_{a_0} \cdot X_a}{\sum F_i \cdot C_{p_i}} \quad (5)$$

- T_s = Temperatura de salida del reactor para caso adiabático.
- T_e = Temperatura de entrada en el reactor.
- $(-\Delta H_r)$ = Variación de entalpía de reacción.
- F_{a_0} = Caudal másico de componente a la entrada del reactor (expresado en DQO).
- X_a = Grado de conversión alcanzada en la reacción.
- $\sum F_i \cdot C_{p_i}$ = Sumatorio de los caudales másicos de las corrientes participantes por sus respectivos calores específicos a presión constante.

Tiempo Espacial

$$\tau = \frac{V}{Q_0} \quad (6)$$

- τ = Tiempo espacial.
- V = Volumen.
- Q_0 = Caudal volumétrico total a la entrada del reactor.

Ecuación Cinética

$$(-r_a) = k(T) \cdot [C_a]^\alpha \cdot [O_2]^\beta = k'(T) \cdot [C_a] \quad (7)$$

- $(-r_a)$ = Velocidad de reacción.
- $k(T) = k'(T)$ = Constante cinética dependiente de la temperatura.
- $[C_a]$ = concentración.
- Expresión de la ecuación cinética para reacción irreversible con orden de reacción $\alpha=1$ y exceso de O_2 .

$$C_p = C_p(T) \quad (8)$$

- Variación de la capacidad calorífica con la temperatura

$$\rho = \rho(T) \quad (9)$$

- Variación de la densidad con la temperatura.

$$\mu = \mu(T) \quad (10)$$

- Variación de la viscosidad con la temperatura.

$$Q_0 = \frac{F_0}{\rho} = \sum_i \frac{F_i}{\rho_i(T)} = \frac{F_{H_2O}}{\rho_{H_2O}(T)} + \frac{F_{aire}}{\rho_{aire}(T)} \quad (11)$$

- El caudal volumétrico total es igual a la suma de los respectivos caudales máscicos divididos por sus densidades.

Ecuación de Arrhenius

$$k(T) = A_0 \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{R \cdot T}\right) \quad (12)$$

- $k(T)$ = Constante cinética.
- A_0 = Factor de Frecuencia.
- E_a = Energía de activación de la reacción.
- R = Constante de los gases ideales.
- T = Temperatura de la reacción.

Si se enumeran todas las ecuaciones y las variables que participan en el proceso se dispondrá de: doce relaciones de diseño y veinte variables de diseño; de las cuales se consideran variables fijas: $(-\Delta H_r), E_a, A_0$ y R (constante de los gases) dado que son valores que estarán fijados cuando se conozca el residuo a tratar. Se fijará alcanzar una conversión del 97%, para asegurar que se cumplen con los requisitos de vertidos. Realizando una simple resta entre las relaciones de diseño, variables de diseño y variables fijas se obtiene el número de variables que se van a convertir en grados económicos de libertad, o lo que es lo mismo las variables de diseño que se podrán modificar.

Variables Diseño = n° variables – n° relaciones diseño – variables fijas

Variables Diseño = $20 - 12 - 4 = 4$ Grados Económicos de Libertad.

En este caso no se puede aplicar el “*algoritmo de selección de variables de diseño*” al no ser las variables constantes, si no que están interrelacionadas al existir dependencia de la temperatura, por lo que la resolución del cálculo del reactor se realiza mediante el método integral que permite englobar todos los valores que se van obteniendo.

Por este motivo se eligen cuatro variables que pasan a ser variables de diseño del reactor: F_{a_0} , n , T_e , $[C_a]$; correspondiéndose con el caudal de la corriente a tratar, el coeficiente de exceso de oxígeno necesario para llevar a cabo la reacción, la temperatura de entrada de la corriente a tratar y la concentración de la especie que se pretende eliminar de dicha corriente. Esta selección se ha realizado cuales son las variables más influyentes en los cálculos que se deben realizar.

3.1.2. Selección de variables de diseño del intercambiador de calor

Al igual que en el caso del reactor, previamente será necesario conocer las ecuaciones que determinarán la obtención de las variables de diseño, por lo que a continuación se enumeran las ecuaciones indicando todos los parámetros que participan en ellas.

Ecuación de Diseño de Intercambiador de Calor

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml} \quad (1)$$

- Q : Flujo de calor intercambiado en el sistema.
- U: Coeficiente Global de Transferencia de Calor
- A: Área de intercambio de calor
- ΔT_{ml} : Incremento de temperatura media logarítmica

Incremento de Temperatura Medio Logarítmica en Contracorriente

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_2 - T_4) - (T_1 - T_3)}{\text{Ln} \frac{(T_2 - T_4)}{(T_1 - T_3)}} \quad (2)$$

- ΔT_{ml} : Incremento de temperatura media logarítmica.
- T_1 : Temperatura fluido caliente entrada intercambiador
- T_4 : Temperatura frío salida intercambiador
- T_2 : Temperatura fluido caliente salida intercambiador
- T_3 : Temperatura frío entrada intercambiador

Flujo de calor cedido por el fluido caliente

$$Q = W_{cal} \cdot C_p \cdot (T_1 - T_2) \quad (3)$$

- Q: Calor cedido por el fluido caliente
- W_{cal} : Caudal másico circulante de fluido caliente
- C_p : Calor específico a presión constante
- T_1 : Temperatura fluido caliente entrada intercambiador
- T_2 : Temperatura fluido caliente salida intercambiador

Flujo de calor absorbido por el fluido frío

$$Q = W_{frío} \cdot C_p \cdot (T_4 - T_3) \quad (4)$$

- Q: Calor absorbido por el fluido frío
- $W_{frío}$: Caudal circulante de fluido frío
- C_p : Calor específico a presión constante
- T_4 : Temperatura fluido frío salida intercambiador
- T_3 : Temperatura fluido frío entrada intercambiador

$$C_p = C_p(T) \quad (5)$$

- Variación del calor específico con la temperatura

$$\rho = \rho(T) \quad (6)$$

- Variación de la densidad con la temperatura

$$\mu = \mu(T) \quad (7)$$

- Variación de la viscosidad con la temperatura

$$k = k(T) \quad (8)$$

- Variación de la conductividad térmica de los fluidos con la temperatura

$$K = K(T) \quad (9)$$

- Variación de la conductividad térmica del material con la temperatura

$$T_{promd_1} = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (10)$$

- Promedio de las temperaturas de entrada-salida del fluido caliente

$$T_{promd_2} = \frac{T_3 + T_4}{2} \quad (11)$$

- Promedio de las temperaturas de entrada-salida del fluido frío.

Coefficiente de Transmisión de Calor Global

$$U = \frac{1}{\frac{D_e}{D_i \cdot h_{ci}} + \frac{\varepsilon}{K \cdot D_{ml}} + \frac{1}{h_{ce}}} \quad (12)$$

- U: coeficiente global de transferencia de calor.
- D_e: Diámetro externo del tubo interior.
- D_i: Diámetro interior del tubo interior.
- K: conductividad térmica del material del intercambiador.
- h_{ci}: coeficiente individual de transferencia de calor en el tubo interior.
- h_{ce}: coeficiente individual de transferencia de calor en el tubo exterior.
- ε: espesor de pared del tubo interior.
- D_{ml}: Diámetro medio logarítmico. Se calcula mediante la expresión:

$$D_{ml} = \frac{D_e - D_i}{Ln \frac{D_e}{D_i}}$$

Dada la configuración elegida para el intercambiador, de doble tubo, se añaden las ecuaciones dependientes de la geometría escogida:

Tubo Interior

$$Q_{v1} = S_1 \cdot vel_1 \quad (13)$$

- Q_{v1}: caudal volumétrico de fluido caliente
- S₁: sección del tubo interior
- vel₁: velocidad del fluido caliente

$$Q_{v1} = \frac{W_{cal}}{\rho} \quad (14)$$

- Q_{v1} : caudal volumétrico de fluido caliente
- W_{cal} : caudal másico de fluido caliente
- ρ : densidad del fluido caliente

$$S_1 = \pi \cdot \frac{d_0^2}{4} \quad (15)$$

- S_1 : Superficie del tubo interior
- d_0 : diámetro exterior del tubo interior

Ecuación de Dittus-Boelter para fluidos calientes

$$\left(\frac{h_{ci} \cdot d_0}{K} \right) = 0,024 \cdot \left(\frac{v \cdot \rho \cdot d_0}{\mu} \right)^{0,8} \cdot \left(\frac{\mu}{k \cdot \rho} \right)^{0,4} \quad (16)$$

- h_{ci} : coeficiente de transferencia de calor en el tubo interior
- d_0 : diámetro exterior del tubo interior
- K : conductividad térmica del material
- v : velocidad del fluido caliente
- ρ : densidad del fluido caliente
- μ : viscosidad del fluido caliente
- k : conductividad térmica del fluido caliente

Tubo Exterior

$$Q_{v2} = S_2 \cdot vel_2 \quad (17)$$

- Q_{v2} : caudal volumétrico de fluido frío
- S_2 : sección de la corona circular formada por los dos tubos
- vel_2 : velocidad del fluido frío

$$Q_{v2} = \frac{W_{frío}}{\rho} \quad (18)$$

- Q_{v2} : caudal volumétrico de fluido frío
- $W_{frío}$: caudal másico de fluido frío
- ρ : densidad del fluido frío

$$S_2 = \pi \cdot \left[\frac{d_1^2}{4} - \frac{d_0^2}{4} \right] \quad (19)$$

- S_2 : Superficie de la corona formada por ambos tubos
- d_0 : diámetro exterior del tubo interior
- d_1 : diámetro interior del tubo exterior

Ecuación de Dittus-Boelter para fluidos fríos

$$\left(\frac{h_{ce} \cdot d_{eq}}{K} \right) = 0,0225 \cdot \left(\frac{v \cdot \rho \cdot d_{eq}}{\mu} \right)^{0,8} \cdot \left(\frac{\mu}{k \cdot \rho} \right)^{0,3} \quad (20)$$

- h_{ce} : coeficiente de transferencia de calor en el tubo exterior
- d_{eq} : diámetro equivalente de la corona circular
- K : conductividad térmica del material
- v : velocidad del fluido frío
- ρ : densidad del fluido frío
- μ : viscosidad del fluido frío
- k : conductividad térmica del fluido frío

Diámetro Equivalente

$$d_{eq} = d_1 - d_0 \quad (21)$$

- d_{eq} : diámetro equivalente de la corona circular
- d_1 : diámetro interior del tubo exterior
- d_0 : diámetro exterior del tubo interior

Una vez listadas todas las ecuaciones señalar que se ha realizado una simplificación en la ecuación de Dittus-Boelter. Dicha ecuación se presenta como una correlación entre tres números adimensionales que son Nusselt (Nu), Reynolds (Re), Prandtl (Pr). El empleo de esta ecuación radica en su habitual uso en cálculos referidos a flujo totalmente desarrollado térmicamente dentro de un tubo de paredes lisas, es decir, no afectarán las condiciones de contorno en la pared (si la pared está o no a una temperatura uniforme, o si el flujo de calor por unidad de área es o no uniforme a lo largo del tubo).

Los resultados que se obtengan de esta correlación serán aplicables si se cumple que:

$$Re > 10000$$

$$Pr > 0,5$$

La simplificación consiste en el empleo de las magnitudes que componen dichos números adimensionales en vez de emplear la expresión con los números adimensionales y, luego tener que calcular los valores necesarios de cada una de las magnitudes que los componen. Es decir, de esta manera se han eliminado tres ecuaciones que son combinación de la principal.

También destacar el empleo de la expresión del diámetro equivalente, dada la geometría del intercambiador, pudiendo llevar a equivocación la nomenclatura empleada, a continuación se representa un corte de dicha geometría, y el desarrollo hasta la obtención de la señalada como ecuación (21)

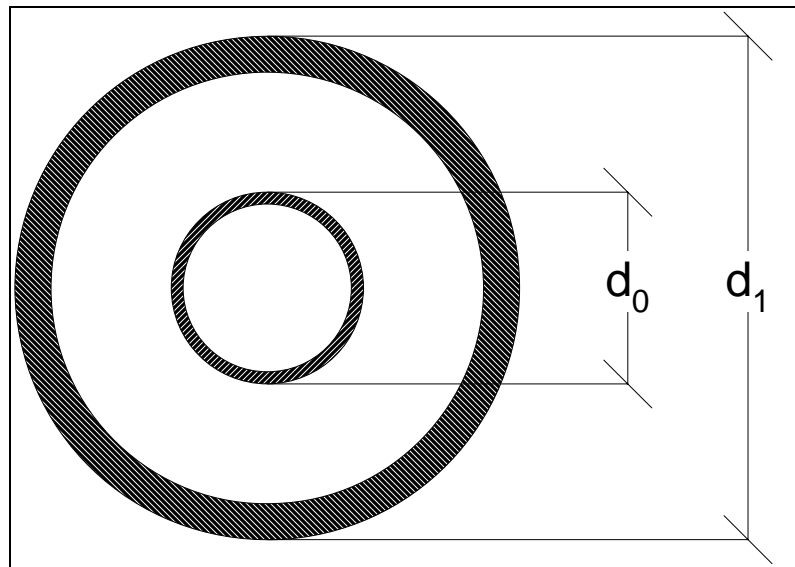


Fig.5: Representación corte transversal tubería

$$d_{eq} = 4 \cdot r_h \rightarrow r_h = \frac{S}{P} \rightarrow d_{eq} = 4 \cdot \frac{S}{P} \rightarrow d_{eq} = 4 \cdot \frac{\pi \cdot (r_1^2 - r_0^2)}{2 \cdot \pi \cdot (r_1 + r_0)} \rightarrow$$
$$\rightarrow d_{eq} = 2 \cdot \frac{(r_1 + r_0) \cdot (r_1 - r_0)}{(r_1 + r_0)} \rightarrow d_{eq} = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot (d_1 - d_0) \rightarrow d_{eq} = d_1 - d_0$$

Donde:

- r_h : Radio hidráulico.
- S: Sección transversal disponible para el flujo.
- P: Perímetro mojado.

Y, sabiendo que $r = \frac{d}{2}$, se obtiene la expresión final en función de los diámetros.

Una vez conocidas todas las ecuaciones, se calculará el número de variables de diseño de las que dispondrá el sistema. Pero primero habrá que elegir las variables fijas, en este caso: T_1 , T_2 , T_3 , W_{cal} , W_{frio} , que no se presentarán en el cuadro de selección al haber sido fijadas por el ingeniero, paso número dos del algoritmo seguido. Una vez establecidas se podrán aplicar los mismos pasos seguidos para la selección de variables del reactor tubular.

Grados Libertad = n° variables – n° ecuaciones – n° variables fijas

Grados Libertad = $28 - 21 - 5 = 2$ Grados Económicos de Libertad.

Anexo de cálculo de selección de variables de diseño

	Q	U	A	ΔT_{ml}	T_4	C_p	ρ	μ	α	K	T_{promd1}	T_{promd2}	r_0	r_1	h_{ci}	h_{ce}	Q_{v1}	S_1	veh	Q_{v2}	S_2	veh	Deq
1	X	X	X	X																			
2				X	X																		
3	X					X																	
4	X				X	X																	
5						X					X	X											
6							X				X	X											
7								X			X	X											
8									X		X	X											
9										X	X	X											
10											X												
11					X							X											
12		X											X	X	X	X							
13																	X	X	X				
14							X										X						
15													X					X					
16							X	X	X	X			X		X				X				
17																				X	X	X	
18							X													X			
19													X	X							X		
20							X	X	X	X						X						X	X
21													X	X									X

Tabla 6: Algoritmo selección variables de diseño para intercambiador de calor

Aplicando el algoritmo de selección de variables, resulta:

	Q	U	A	ΔT_{ml}	T_4	C_p	ρ	μ	α	K	T_{promd1}	T_{promd2}	r_0	r_1	h_{ci}	h_{ce}	Q_{v1}	S_1	veh	Q_{v2}	S_2	veh	Deq
1	X	X	X	X																			
2				X	X																		
3	X					X																	
4	X				X	X																	
5						X					X	X											
6							X				X	X											
7								X			X	X											
8									X		X	X											
9										X	X	X											
10											X												
11					X							X											
12		X											X	X	X	X							
13																	X	X	X				
14							X										X						
15													X					X					
16							X	X	X	X			X		X				X				
17																				X	X	X	
18							X													X			
19													X	X							X		
20							X	X	X	X						X						X	X
21													X	X									X

Tabla 7: Resolución algoritmo selección variables para intercambiador de calor

Las variables marcadas corresponden a cada una de las eliminaciones realizadas, en el orden establecido por el listado dado a continuación. Siempre habrá que recordar que la resolución del algoritmo se realizará en el orden inverso al dado por las eliminaciones, tal y como indica el algoritmo seguido en su paso número ocho.

1. Eliminación: Con la ecuación 1 obtenemos A
2. Eliminación: Con la ecuación 12 obtenemos U
3. Eliminación: Con la ecuación 2 obtenemos ΔT_{ml}
4. Eliminación: Con la ecuación 16 obtenemos h_{ci}
5. Eliminación: Con la ecuación 20 obtenemos h_{ce}
6. Eliminación: Con la ecuación 17 obtenemos vel_2
7. Eliminación: Con la ecuación 19 obtenemos S_2
8. Eliminación: Con la ecuación 18 obtenemos Q_{v2}
9. Eliminación: Con la ecuación 13 obtenemos vel_1
10. Eliminación: Con la ecuación 15 obtenemos S_1
11. Eliminación: Con la ecuación 14 obtenemos Q_{v1}
12. Eliminación: Con la ecuación 21 obtenemos D_{eq}
13. Eliminación: Con la ecuación 9 obtenemos K
14. Eliminación: Con la ecuación 8 obtenemos α
15. Eliminación: Con la ecuación 7 obtenemos μ
16. Eliminación: Con la ecuación 6 obtenemos ρ
17. Eliminación: Con la ecuación 4 obtenemos T_4
18. Eliminación: Con la ecuación 3 obtenemos Q
19. Eliminación: Con la ecuación 5 obtenemos c_p
20. Eliminación: Con la ecuación 11 obtenemos T_{promd2}
21. Eliminación: Con la ecuación 1 obtenemos T_{promd1}

El resultado obtenido indica que las variables de diseño serán los diámetros de los tubos que se emplearán en el intercambiador, así como la presencia de una variable de recirculación (T_4). Esta variable de recirculación implica la realización de un cálculo iterativo con el que se buscará un valor “intermedio” entre uno establecido por nosotros como variable de diseño y el obtenido en la resolución.

Anexo de cálculo de selección de variables de diseño

Ambos algoritmos se encuentran completamente desarrollados en sus correspondientes “*Anexos de Cálculos*”, de manera más clara y precisa, exponiendo cada una de las etapas de cálculo de los respectivos equipos.

De esta forma, los datos obtenidos sirven como punto de partida en el “*Anexo de optimización*”, permitiendo encontrar las funciones objetivos correspondientes a las combinaciones que permitirán la obtención de los correspondientes óptimos.

Indicar que se debería realizar el proceso de selección de variables para el conjunto de la planta y, así estudiar el comportamiento conjunto; pero debido a la complejidad que ello presentaba, así como el gran número de ecuaciones a manejar se ha decidido realizar la conexión de los equipos de una manera lógica observando cómo se relacionan las variables de salida del reactor con las de entrada del intercambiador.

De esta manera la conexión se realiza a través del caudal másico de efluente y de la temperatura del mismo a la salida del reactor, pues estas dos variables se convierten en variables de entrada del intercambiador; además de conocer la temperatura de entrada del fluido frío, que será la propia corriente a tratar para ser precalentada, y a qué temperatura debe salir la misma; es decir, a qué temperatura deberá entrar nuevamente al reactor. Y la temperatura de salida del efluente una vez reducida la temperatura, debe ser lo más próxima a lo indicado por la legislación ($< 50^{\circ}\text{C}$).

3.2. Anexo de cálculo del reactor tubular.

Realizada la selección de variables para el diseño del reactor y, obtenido el algoritmo que permite establecer el cálculo de todas ellas, es preciso desarrollar dicho algoritmo para obtener los valores necesarios y trasladarlos posteriormente a los cálculos económicos. En este anexo se ejemplificarán los cálculos mediante la selección de unos valores tipo, que deberán permitir conocer la estabilidad del algoritmo diseñado y de los valores obtenidos.

Para ello, se considerará que el reactor tendrá un comportamiento de reactor de flujo pistón presentando una evolución de las propiedades a lo largo del mismo, como se observa en la Fig. 6. Se ha elegido este tipo de reactor al ser el que presenta más ventajas en un uso industrial porque por una parte, los volúmenes de reactor necesarios para alcanzar la conversión requerida son menores que los que se necesitan si fuese un reactor tipo tanque y por otra parte, su diseño tubular permite un buen control térmico del reactor además de reducir el espesor del tubo.

El programa se va a desarrollar para dos compuestos de los que se dispone de información de su cinética OASC:

1. Fenol: (*Portela, 2000*)
2. Biocut: (*Sánchez Oneto, 2005*)

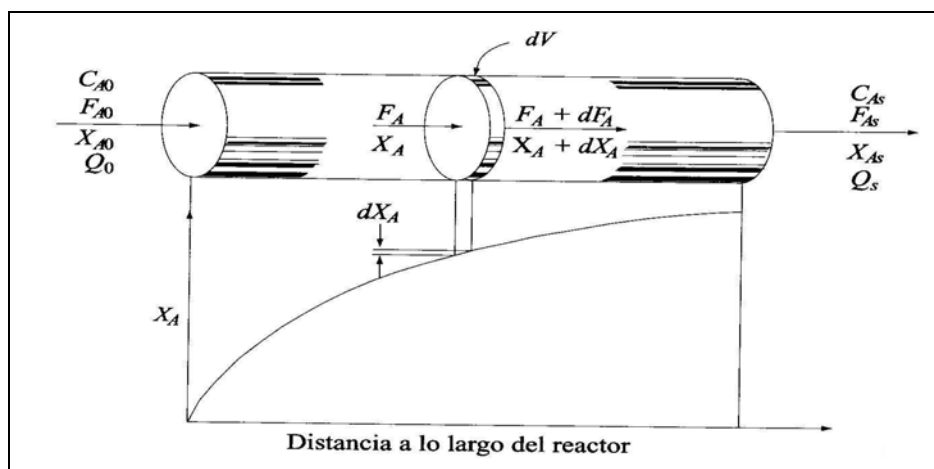
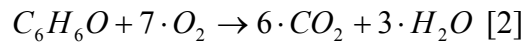


Fig. 6. Diagrama reactor con comportamiento flujo pistón

También debe ser tenida en cuenta la baja proporción másica que representan las sustancias a eliminar con respecto al total de la corriente acuosa, por lo que las propiedades termofísicas empleadas en los cálculos serán las del agua a la temperatura y presión de operación.

Esta consideración se hace extensiva al caso del intercambiador donde también se tendrá presente.

Las reacciones que se producen en función de la sustancia a eliminar son:



La reacción [1] no se presenta ajustada estequiométricamente dada la dificultad de conocer la fórmula molecular exacta de los aceites de corte. No obstante, esta ecuación es necesaria para conocer la cantidad de O_2 que es necesaria aportar, y que viene definida como:

$$DQO = 2,264 \frac{mgO_2}{mgBiocut}$$

Como ya se indicó en el “Anexo de selección de variables de diseño”, en este punto se desarrollará el algoritmo resultante de la resolución del caso del reactor en dicho anexo. Para ello se tomará un caso concreto dentro del abanico que puede abarcar el reactor que servirá para ejemplificar los cálculos.

Los datos de partida serán:

- Variables Fijas:
 - Presión: 250 bar
 - Temperatura: 673 K
 - $(-\Delta H_r)$: 2440 J/g
 - A: $10^{1,34} \text{ s}^{-1}$
 - E_a : 39200 J/mol

- Variables de Diseño:
 - Especie: Fenol
 - Concentración: 20000 mg/l
 - Caudal a tratar: 200 Kg/h
 - Conversión: 0,97
 - Coefficiente exceso aire: 1,2

Una vez establecidas las variables fijas y de diseño se desarrollarán los cálculos en el mismo orden que señala el algoritmo obtenido.

Antes será necesario fijar un valor máximo de concentración de la especie a eliminar, para poder hacer la aproximación de que las propiedades termofísicas de la corriente acuosa de residuo sean las del agua. Esto se estimará mediante un cálculo que permita relacionar la cantidad de residuo presente en el caudal másico total de la corriente. Por criterio de diseño se ha impuesto que dicho valor no debe superar el 15%.

Este valor lo imponemos después de consultar la bibliografía donde encontramos que este valor puede estar entre el 5% y el 20%.

Para el caso del Fenol resultaría: $[\text{Fenol}]_{\text{máx.}}: 150 \text{ g/l}$ y para el caso del Biocut resultaría: $[\text{DQO}]_{\text{máx.}}: 350 \text{ g/l}$

Una vez conocido este límite, se procede a calcular la cantidad de fenol que circulará y cómo va a variar durante el transcurso de la reacción, es decir, se buscarán los valores tanto de la corriente de fenol como de concentración en cada etapa de cálculo. En el caso de la concentración se obtendrá dicho valor directamente de la relación con la conversión según la ecuación:

$$Ca = Ca_o \cdot (1 - X_a) \quad (2)$$

Para la corriente de fenol circulante, el resultado saldrá de la relación entre la concentración de fenol impuesta por el proyectista y el caudal másico mediante la densidad:

$$F_{\text{fenol}} = [\text{fenol}] \cdot Fa_o \cdot \frac{1}{\rho} \quad (3)$$

De esta forma, también será posible calcular el aporte de aire necesario para llevar a cabo la reacción, esto lo haremos mediante las ecuaciones:

$$F_{O_2} = n \cdot F_{a_o} \quad (4)$$

$$F_{\text{aire}} = \frac{100}{21} \cdot F_{O_2} \quad (5)$$

Esto es así, dado que el caudal del residuo a tratar Fa_o , está expresado como DQO. En el caso de un residuo formado por un solo compuesto (i.e., residuo de fenol) conociendo la concentración y estequiometría de la reacción podremos calcular fácilmente la Fa_o (expresada en DQO)

A continuación, en la Fig. 7, se representa la evolución del calor específico con la temperatura para el aire, así como la ecuación de ajuste de los datos representados; las figuras y ecuaciones correspondientes al agua, o corriente a tratar, se representarán en el “*Anexo de cálculo del intercambiador de calor*”.

El siguiente punto será establecer un valor de partida para la constante cinética a la temperatura de entrada de la corriente impuesta (673 K), cálculo que se realiza mediante la ecuación de Arrhenius:

$$k(T) = A \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{R \cdot T}\right) \quad (6)$$

Tras esto se obtendrá el valor del calor específico de las especies participantes. Para ello a través de la Web del *NIST (National Institute of Standards and Technology <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>)* se realizó la determinación de las propiedades, en condiciones isobáricas, que intervendrán en la reacción en un amplio rango de temperaturas; desde temperatura ambiente hasta valores supercríticos.

$$c_p = c_p(T) \quad (7)$$

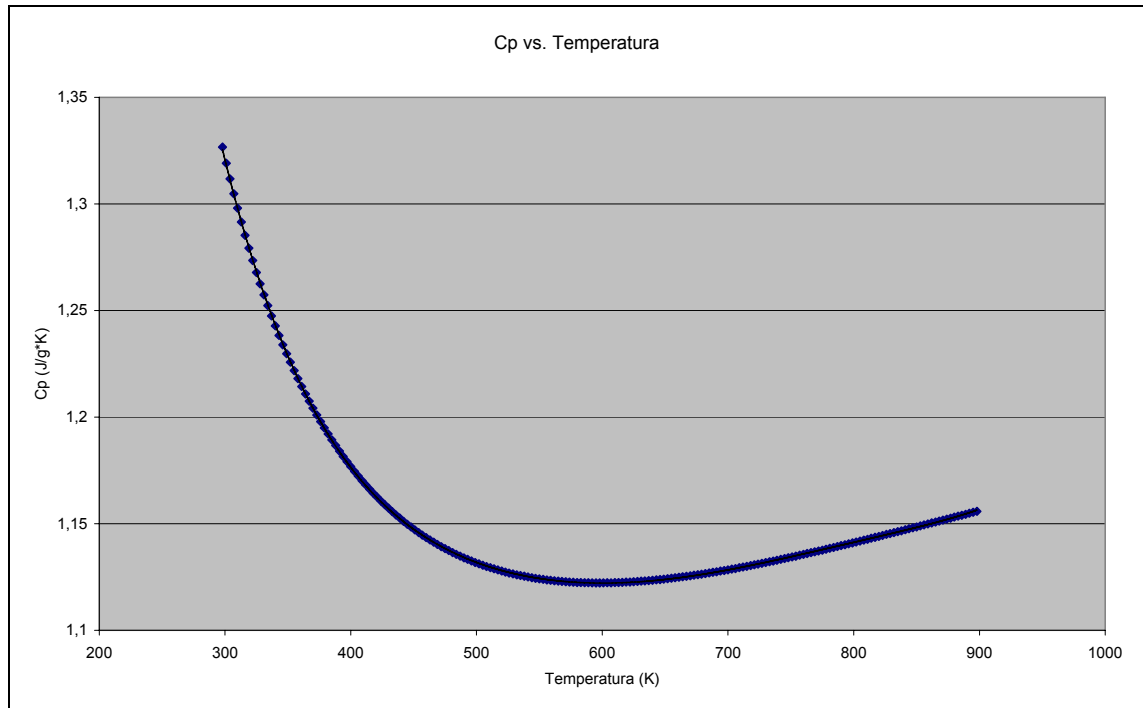


Fig. 7: Calor específico del aire frente a la temperatura

Ecuación de Ajuste	r ²
$C_p = 0,0000000000000000426073228.T^6 - 0,00000000000017030698435831.T^5 + 0,000000000282852643977507.T^4 - 0,000000251308383822454.T^3 + 0,00012719697826253.T^2 - 0,0351287286866558.T + 5,28858572925601$	0,99997

Tabla 12: Ecuación ajuste calor específico del aire a P=250 bar

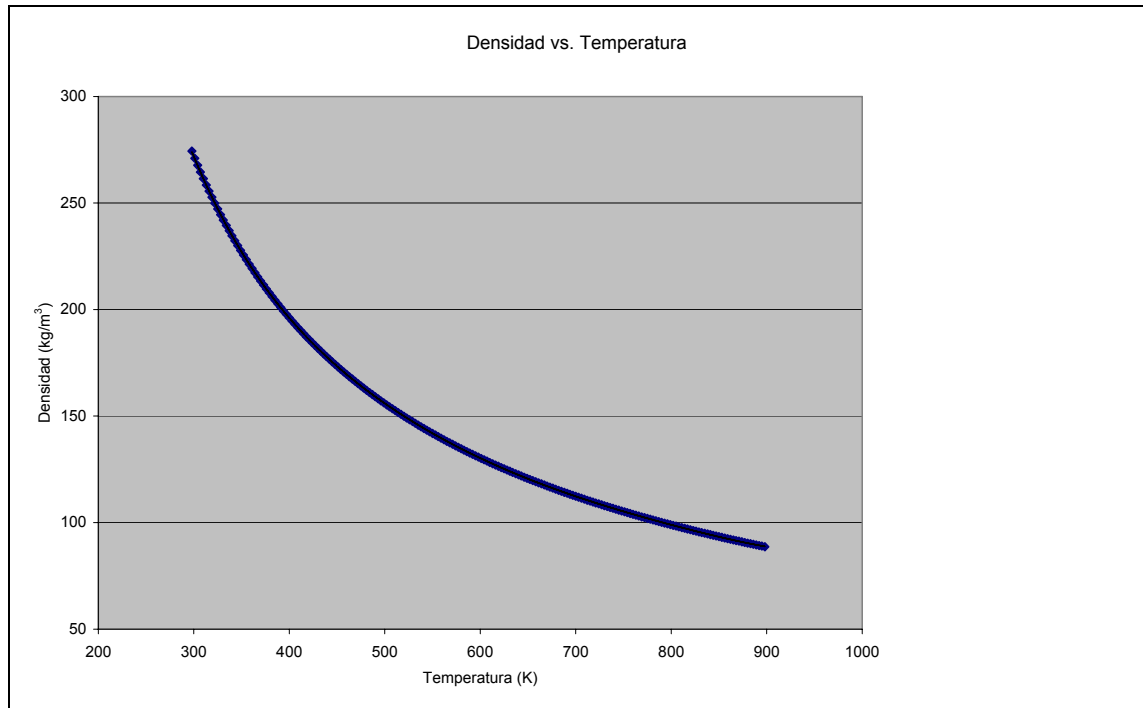


Fig. 8: Densidad del aire frente a la temperatura

Ecuación de Ajuste	r ²
$\rho = 0,00000000000001270216882612 \cdot T^6 - 0,0000000000511565750282265 \cdot T^5 + 0,0000000857191335886577 \cdot T^4 - 0,0000769811581565003 \cdot T^3 + 0,0395947043458163 \cdot T^2 - 11,4244252997452 \cdot T + 1634,88026058582$	0,999998

Tabla 13: Ecuación ajuste de la densidad del aire a P=250 bar

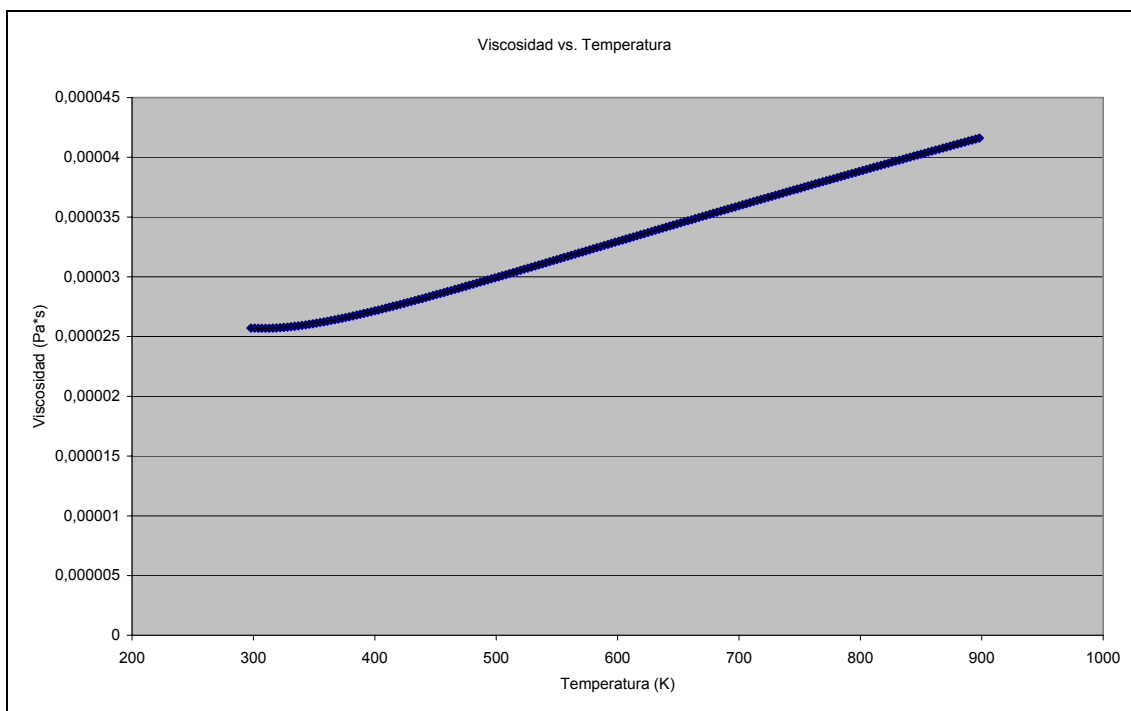


Fig. 9: Viscosidad del aire frente a la temperatura

Ecuación de Ajuste	r ²
$\mu = -3,81882650099991E-19.T^5 + 1,27791825295297E-15.T^4 - 1,69533274204537E-12.T^3 + 1,11163725782963E-09.T^2 - 3,29653371929779E-07.T + 6,08407173934108E-05$	0,99998

Tabla 14: Ecuación ajuste de la viscosidad del aire a P=250 bar

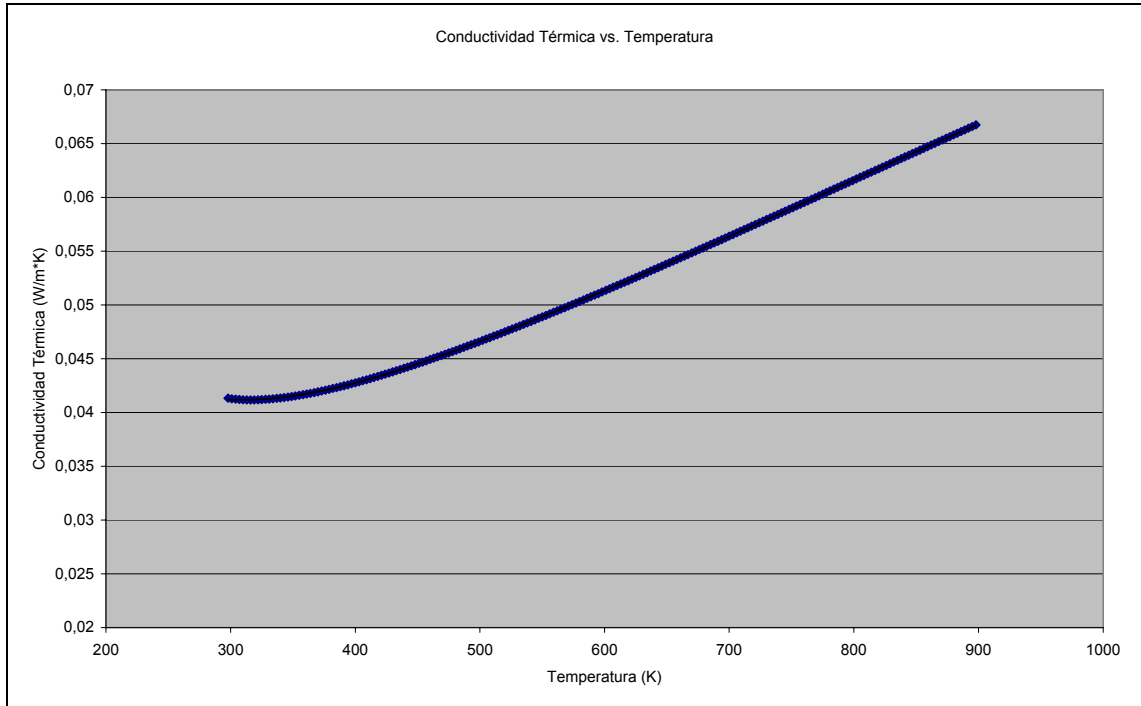


Fig. 10: Conductividad térmica del aire frente a la temperatura

Ecuación de Ajuste	r^2
$k = -0,0000000000000000443498763171868.T^5 +$ $0,000000000000149614463845214.T^4 - 0,00000000202655073189339.T^3 +$ $0,00000138889607323079.T^2 - 0,00043409486501102.T + 0,090101917643901$	0,99999

Tabla 15: Ecuación ajuste de la conductividad térmica del aire a P=250 bar

De esta manera se dispone de datos suficientes para su representación gráfica y ajuste, como se puede observar en las figuras 7, 8, 9 y 10 y Tablas 12, 13, 14 y 15 de este anexo para el caso del aire; y en las figuras y tablas correspondientes en el “Anexo de Cálculo del Intercambiador de Calor” para el caso del agua, obteniendo una función que relaciona el valor de la propiedad y la temperatura en el intervalo de temperatura representado. A medida que avanza la reacción se van oxidando los compuestos y consumiendo O₂ y generándose CO₂ y otros compuestos, pero las propiedades termofísicas no se verán prácticamente afectadas por ello.

Tras la obtención del valor de la constante cinética se calculará la velocidad de la reacción mediante la ecuación, que hace referencia al valor puntual a la entrada del reactor:

$$(-r_a) = k(T) \cdot [conc] \quad (8)$$

Teniendo presente el criterio de diseño establecido de emplear un reactor tubular adiabático, se empleará la ecuación, para lo que se resuelve un diferencial de volumen del reactor en el que se alcanza un determinado incremento de conversión (ΔX_a):

$$T_S = T_E - \frac{(-\Delta H_r) \cdot F_{a_0} \cdot \Delta X_a}{\sum F_i \cdot C_{p_i}} \quad (9)$$

que permite calcular la temperatura a la salida de un reactor adiabático.

Paralelamente se puede conocer el valor del tiempo espacial mediante la ecuación:

$$\tau = \frac{V}{Q_0} \quad (10)$$

Este valor se considera representativo de la duración de la reacción en el reactor. Esto no es del todo correcto porque dicho tiempo realmente es indicativo del tiempo que tarda una fracción del fluido en atravesar toda la longitud del reactor, pero dada la condición de diseño impuesta de que el reactor tendrá comportamiento ideal de flujo en pistón, se puede realizar dicha aproximación.

La última etapa de cálculo permitirá la obtención del volumen a partir de la ecuación de diseño del reactor tubular:

$$\frac{V}{F_{a_0}} = \int_{X_{a_0}}^{X_{a_s}} \frac{dX_a}{(-r_a)} \Rightarrow \frac{V}{F_{a_0}} = \sum_{X_{a_0}}^{X_{a_s}} \frac{\Delta X_a}{(-r_a)} \quad (11)$$

Como se puede apreciar la expresión se modifica hasta un sumatorio, en lugar de resolver la integral correspondiente, debido a la existencia de un perfil de temperatura a lo largo del avance de la reacción dentro del reactor adiabático.

Por lo que no se puede emplear la ecuación de diseño para un reactor de flujo en pistón ideal, si no que se aplica el método integral de cálculo, que recoge el aporte de cada etapa del cálculo iterativo realizado y, cuyo resultado será la suma de todas las etapas de cálculo; dando lugar al volumen del reactor.

Con cada nuevo valor de temperatura se calcula un nuevo valor de la constante cinética, permitiendo de esta manera obtener un nuevo valor de velocidad de reacción, de modo que todos los valores obtenidos quedan recogidos en el sumatorio. Se puede comprobar en la Fig. 11 el perfil de temperatura que se genera a medida que disminuye la concentración.

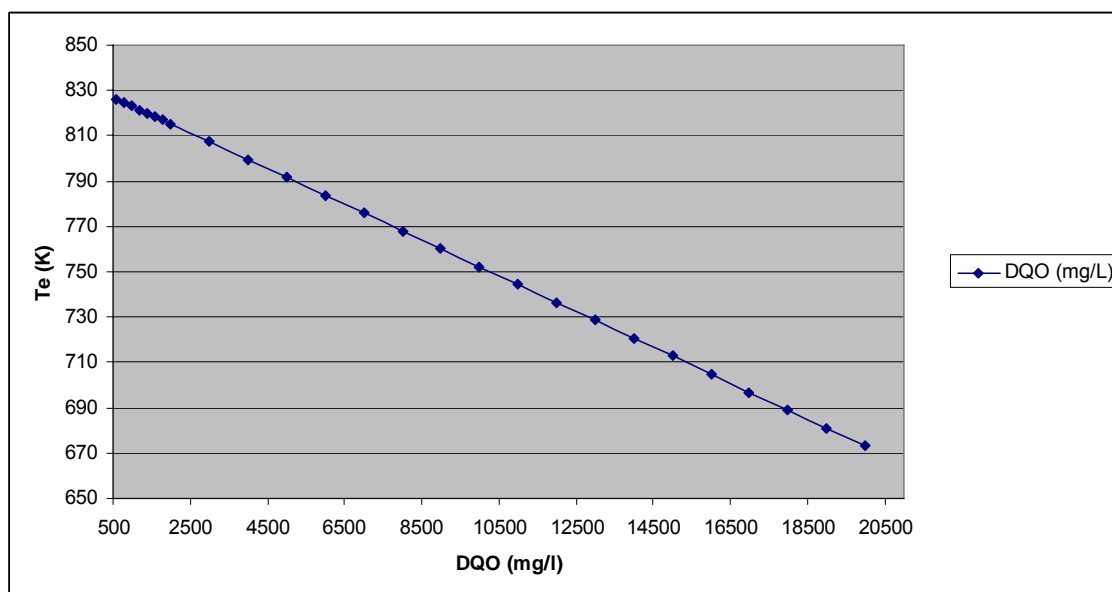


Fig. 11: Descenso de la concentración frente al aumento de la temperatura

Para los dos residuos elegidos (fenol y Biocut) se han utilizado cinéticas de pseudo primer orden encontradas en la bibliografía. En el caso concreto del BIOCUT 35 se corresponde a una cinética que se divide en dos tramos, en el primer tramo la reacción transcurre a mayor velocidad, mientras que el segundo tramo corresponde al

final o agotamiento de la reacción donde se estabiliza el valor de la velocidad de reacción, por lo que se ha decidido no tener presente dicho tramo.

Las expresiones de ambas cinéticas son las que a continuación se reflejan.

	$(-r_a)$
Fenol	$10^{1,34} \cdot \exp\left(\frac{-39200}{R \cdot T}\right) \cdot [Fenol]$
BIOCUT 35	$3,207 \cdot 10^3 \cdot \exp\left(\frac{-62200}{R \cdot T}\right) \cdot [DQO]$

Tabla 16: Cinéticas empleadas en la determinación del volumen del reactor

Estas expresiones se han encontrado en sendas tesis doctorales (*Portela, 2000* y *Sánchez Oneto, 2005*) donde se han realizado los estudios cinéticos que han dado lugar a su obtención.

El empleo de expresiones de pseudo primer orden se debe a la mayor proporción de la especie oxidante (O₂) existente en el medio de reacción, en comparación con la especie a eliminar. De esta manera, al realizar los cálculos cinéticos, se supone que la concentración de O₂ en el medio va a ser tan superior a la concentración de la especie a eliminar que se puede estimar que se va a mantener constante durante toda la reacción, por lo que su valor se puede englobar dentro de la constante cinética, cosa que ya queda reflejada en las expresiones anteriormente expuestas.

Una vez expuesta toda esta información se detallarán algunos de los resultados más importantes obtenidos en el cálculo del ejemplo que se ha elegido para la demostración del algoritmo. Para ello se emplearán los valores de una de las etapas de cálculo (en el cual la temperatura de entrada (T_E) es igual a la temperatura de salida (T_S) del elemento diferencial de volumen (dV) anterior) a modo representativo, y posteriormente se representará toda la hoja de cálculo con los resultados obtenidos en cada etapa de cálculo.

T_e (K)	824,67
-----------	--------

Tabla 17: Temperatura entrada a la etapa de cálculo

Partiendo de la temperatura obtenida en el paso anterior, que se considera como la nueva temperatura de entrada al elemento dV , se obtienen los valores correspondientes a los poderes caloríficos de las respectivas especies utilizando dicho valor de temperatura.

	Residuo	Aire
C_p ($J\ g^{-1}\ K^{-1}$)	3,22	1,15

Tabla 18: Valores de C_p para esta temperatura del proceso

Además, se dispone de los valores de los caudales máxicos para las dos especies en ese instante. Por lo que se conocerá el valor de la temperatura de salida del reactor aplicando todos los valores conocidos del resto de variables, como son la entalpía o el incremento de la conversión, a la ecuación de la temperatura en un reactor tubular con comportamiento adiabático, ecuación (9).

	Residuo	Aire
F (mg/h)	160000	2178723

Tabla 19: Valores de los caudales máxicos para este instante del proceso

De esta forma se obtiene el valor de temperatura de salida para las condiciones de operación impuestas.

T_s (K)	826,24
-----------	--------

Tabla 20: Temperatura final de la etapa de cálculo

Al mismo tiempo se calcularán todos los valores correspondientes a la cinética de la reacción partiendo del mismo dato de temperatura de entrada. El primer paso será calcular la constante cinética correspondiente a dicha temperatura.

$k (s^{-1})$	0,071940902
--------------	-------------

Tabla 21: Constante cinética para la temperatura de entrada dada

Una vez conocido este valor, y sabiendo el valor que presentará la concentración de fenol según avance la reacción, se podrá calcular la velocidad de reacción para ese instante.

$(-r_a) (mg l^{-1} s^{-1})$	57,55
-----------------------------	-------

Tabla 22: Velocidad de reacción en el instante elegido

Obtenido este valor será necesario calcular su inverso para poder adaptarlo a la expresión de diseño de un reactor tubular. A dicho inverso se le calculará un promedio con los valores obtenidos anteriormente, de manera que se disponga del mismo número de datos de cinética que de incrementos de conversión. Finalmente se deberán multiplicar los promedios obtenidos con los incrementos de conversión para, de esta manera, realizar el sumatorio que sustituye a la integral de la ecuación de diseño.

En la Tabla 23 se representan todos los valores obtenidos para cada uno de los pasos realizados en el cálculo iterativo antes señalado. A continuación se ha destacado el resultado del sumatorio, que será el que sirva para la obtención del volumen del reactor.

$1/(-r_a)$	Promedio $1/(-r_a)$	$\Delta x_a/\text{Promedio}$
0,002521001	0,002483026	0,000124151
0,002445051	0,002413826	0,000120691
0,002382602	0,002357958	0,000117898
0,002333314	0,002315231	0,000115762
0,002297149	0,002285776	0,000114289
0,002274404	0,002270094	0,000113505
0,002265784	0,002269144	0,000113457
0,002272504	0,002284483	0,000114224
0,002296461	0,002318479	0,000115924
0,002340498	0,002374671	0,000118734
0,002408843	0,002458342	0,000122917
0,002507841	0,00257754	0,000128877
0,002647239	0,002744911	0,000137246
0,002842582	0,002981299	0,000149065
0,003120016	0,003323432	0,000166172
0,003526847	0,0038424	0,00019212
0,004157953	0,004696493	0,000234825
0,005235034	0,006329317	0,000316466
0,007423601	0,00779052	7,79052E-05
0,008157439	0,008616855	8,61686E-05
0,009076272	0,009667811	9,66781E-05
0,010259351	0,011049057	0,000110491
0,011838762	0,012945514	0,000129455
0,014052265	0,01571382	0,000157138
0,017375374	0,020146504	0,000201465
0,022917633		

Tabla 23: Resultados cálculo iterativo

<i>Suma $\Delta x_a/\text{Promedio}$</i>	3,47562E-03
---	-------------

Tabla 24: Resultado sumatorio para caso ejemplificado

Una vez obtenido el resultado del sumatorio, Tabla 24, se multiplicará por el valor del caudal másico, en el ejemplo 200 kg/h, y mediante las conversiones necesarias de unidades se obtendrá el valor del volumen de nuestro reactor, Tabla 25, para el caudal a tratar elegido.

Volumen (l)	193
-------------	-----

Tabla 25: Valor del volumen obtenido

Con este valor se puede calcular el tiempo espacial dentro del reactor, para lo que se multiplicará el volumen obtenido por la concentración inicial de fenol y se dividirá por el caudal másico.

τ (s)	69,51
------------	-------

Tabla 26: Tiempo espacial

Se ha comprobado en la bibliografía (*Portela, 2000*) que este valor de tiempo resulta aproximado a los obtenidos experimentalmente en el laboratorio. Por lo que se considerará que el volumen obtenido también es un valor adecuado.

A partir de ese volumen se supondrá que el diámetro del tubo interno del intercambiador de calor va a ser el mismo diámetro que el del reactor para, de esta manera, evitar pérdidas de carga que se podrían producir en el tránsito de un equipo a otro. Así se podrá conocer su longitud, permitiendo estimar el precio de los tubos a emplear, ya que los precios obtenidos en la oferta recibida están expresados por metro lineal de tubo. El estudio de pérdidas de carga a lo largo de la instalación no es motivo de estudio en este proyecto, pero se ha querido tener presente este detalle para una mayor aproximación al diseño real de la instalación.

Además, se ha añadido un criterio de diseño que permitirá omitir la existencia de deposiciones de sales tanto en el reactor como en el intercambiador. Dicho criterio es considerar que la velocidad lineal del efluente es igual o superior a 2 m/s ($v = 2$ m/s), de esta forma, y basándose en la experiencia, las posibles sales que pudieran existir en la corriente o sean resultado de la reacción van a ser arrastradas a la vez que la corriente. De esta forma no es necesario el empleo de términos referentes al ensuciamiento de las conducciones.

La expresión empleada para conocer dicha velocidad es:

$$v = \frac{F_0 (kg / s)}{\rho (kg / m^3) \cdot S (m^2)}$$

Donde:

- F_0 : caudal másico total inicial
- ρ : densidad promedio entre la entrada y la salida del reactor
- S: sección del tubo empleado

En el ejemplo desarrollado el valor de velocidad resultante es:

velocidad lineal (m/s)	2,92
------------------------	------

Tabla 27: Velocidad lineal corriente de fenol

En la siguiente página se encuentra la hoja de cálculo completa donde están representados todos los cálculos realizados para la obtención del volumen del reactor, así como otras características que se han señalado a lo largo del presente Anexo.

Además, se ha añadido la hoja de cálculo correspondiente al ejemplo realizado para una corriente de BIOCUT 35. Permitiendo de esta manera realizar la comprobación de que la secuencia de cálculo ha sido la misma, así como los resultados obtenidos son coherentes con los hallados en la bibliografía para este tipo de residuos (*Sánchez Oneto, 2005*).

3.3 Anexo de cálculo del intercambiador de calor.

Como en el caso anterior, se desarrollarán los cálculos que permitirán diseñar el intercambiador de calor necesario para la refrigeración de la corriente de efluente, y a la vez precalentar la alimentación que se dirigirá hacia el punto de mezcla previo al reactor buscando de esta forma el comportamiento autotérmico de la instalación. El intercambiador se encontrará situado a continuación del reactor por lo que muchas propiedades termo-físicas y variables de diseño vendrán fijadas dada la disposición elegida.

Se ha establecido como criterio de diseño que las corrientes circulantes pasen en contracorriente, es decir los fluidos se desplazarán en direcciones paralelas pero en sentidos opuestos. Se ha elegido esta configuración ya que, según se puede consultar en la bibliografía (*Transmisión de Calor, A.F. Mills*), presenta una mayor eficiencia que si se dispusieran las corrientes en paralelo.

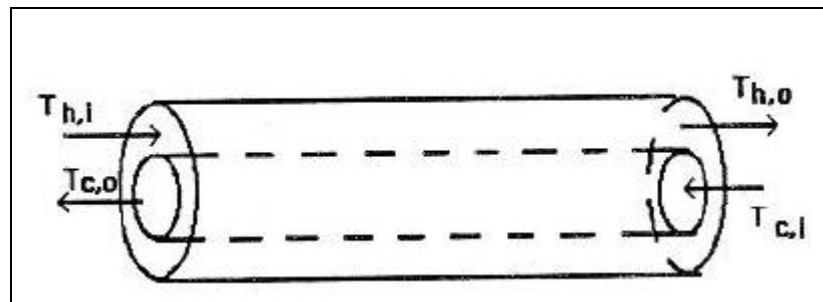


Fig. 12: Diagrama intercambiador en contracorriente

El comportamiento de la temperatura en este tipo de intercambiadores se puede observar en la Fig. 13 donde se comprueba que la diferencia de temperatura puede disminuir, aumentar o incluso, permanecer constante. Obsérvese que la temperatura de salida de la corriente fría puede ser superior a la temperatura de salida de la corriente caliente. En este tipo de intercambiadores los patrones de temperatura son más complejos puesto que la temperatura varía a lo largo de dos direcciones.

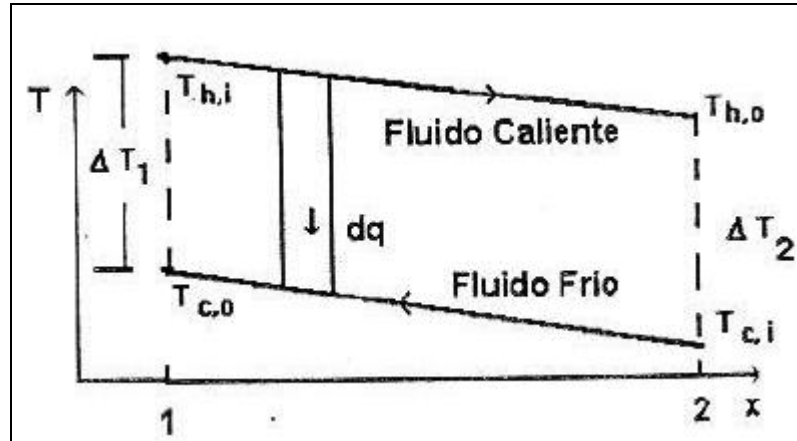


Fig. 13: Diagrama de temperaturas para intercambiador en contracorriente

A partir de este punto se redactará el algoritmo de cálculo obtenido en el “*Anexo de selección de variables de diseño*” en su apartado para el intercambiador de calor, siendo ejemplificado a partir de los valores resultantes del cálculo del reactor. Repasando todos los valores obtenidos, se comprueba que el dato más influyente en el diseño del intercambiador será la temperatura de salida del efluente del reactor, dado que dicho valor resulta ser la temperatura de entrada de la corriente a enfriar en nuestro intercambiador.

Indicar que, tras numerosas pruebas considerando el intercambiador como un único tramo, se consideró que éste debería estar formado por tres tramos donde el efluente va a tener propiedades termofísicas muy diferentes en cada uno de ellos. Estos tramos se corresponden con un tramo supercrítico, donde el efluente va a ir disminuyendo su temperatura; pasando al siguiente tramo donde se producirá la transición de las propiedades del efluente para, circular por el último tramo y terminar con su refrigeración hasta la temperatura de salida establecida. Por lo que a la hora de realizar la estimación del equipo se sumarán las áreas y longitudes de cada uno de estos tramos, lo que permitirá conocer el área y longitud global de intercambio que requerirá el equipo.

Anexo de cálculo del intercambiador de calor

Previamente se establecerán los valores de las temperaturas de entrada y salida de la corriente de fluido frío y, la temperatura de salida del efluente que debe estar dentro de la legislación vigente. También se impondrán los valores de los diámetros de los tubos, así como el caudal de fluido frío necesario para llevar a cabo el enfriamiento del efluente, que será igual al de efluente circulante. Todo esto conducirá a la obtención de los distintos valores buscados. Una vez establecidos estos valores se desarrollarán los cálculos para cada uno de los tramos anteriormente señalados; donde las operaciones se repetirán en cada uno de ellos, pero se considera necesaria su explicación al convertirse las variables de estado de un tramo en variables, de diseño o fijas, del siguiente.

Los datos de partida son:

- Temperatura entrada fluido caliente T_1 (K): 826,24
- Temperatura salida fluido caliente T_2 (K): 473
- Temperatura entrada fluido frío T_3 (K): 298
- Temperatura salida fluido frío T_4 (K): 673
- Diámetro interno d_0 (mm): 17,1
- Diámetro externo d_1 (mm): 21,3
- Caudal másico fluido caliente W_{cal} (Kg/h): 200

Una vez establecidos los valores de temperaturas de cada tramo se comenzará calculando las temperaturas promedio correspondientes al efluente y al fluido frío mediante las expresiones:

$$T_{promd_1} = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (1)$$

$$T_{promd_2} = \frac{T_3 + T_4}{2} \quad (2)$$

Tras la obtención de estos valores se calculará el valor promedio de calor específico para el intervalo de temperaturas del tramo en que se encuentra dividida la representación, como se observa en la Fig. 11, previo ajuste en un amplio rango de temperaturas que incluyan las de operación. Las ecuaciones de ajuste se encuentran en la Tabla 24:

$$C_p = C_p(T) \quad (3)$$

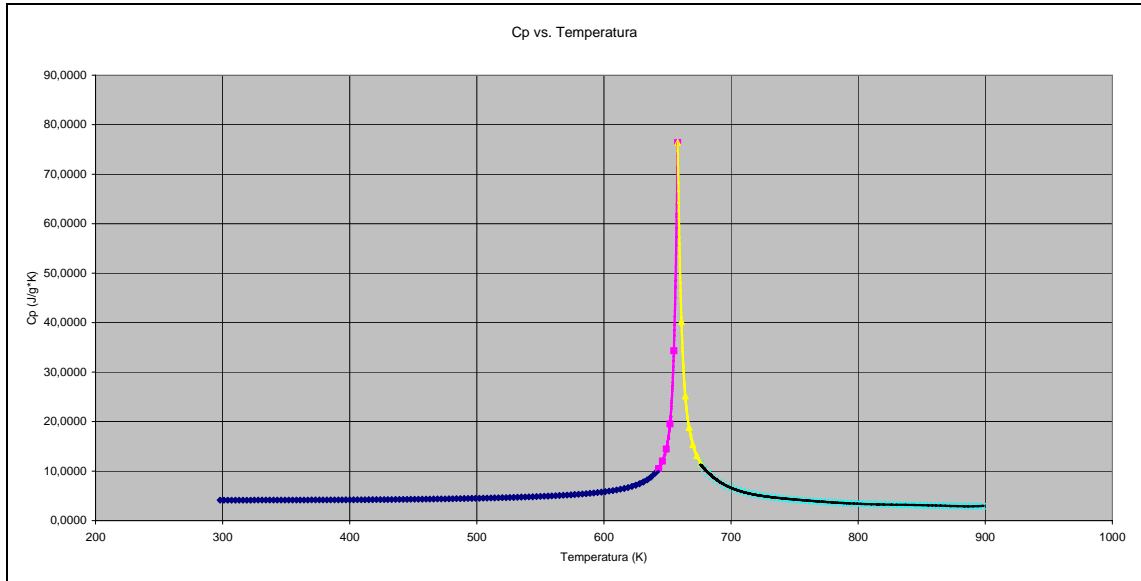


Fig. 14: Representación de Cp del agua frente a la temperatura

		$C_p \text{ (J.g}^{-1}.\text{K}^{-1}\text{)}$	
Temperatura (K)	Ecuación Ajuste	r^2	
298 – 643	$C_p = 1,98085E-13.T^6 - 5,33249E-10.T^5 + 5,9191E-07.T^4 - 3,47E-04.T^3 + 1,13E-01.T^2 - 19,3724878230126.T + 1373,5738983946$	0,9929	
643 – 658	$C_p = 1,80315500688977E-04.T^5 - 5,82367626895813E-01.T^4 + 7,52354479092952E+02.T^3 - 4,85980547458762E+05.T^2 + 1,56959029749933E+08.T - 2,02775141419391E+10$	1	
658 – 676	$C_p = -1,3088705936859E-06.T^6 + 5,1403806372097E-03.T^5 - 8,4064222040008.T^4 + 7,3272384365334E+03.T^3 - 3,5899731874993E+06.T^2 + 9,3739693309076E+08.T - 1,0190826448499E+11$	1	
676 – 898	$C_p = 2,12217E-12.T^6 - 1,0234E-08.T^5 + 2,05397E-05.T^4 - 2,20E-02.T^3 + 13,1931930822798.T^2 - 4222,68604322594.T + 562580,56335989$	0,9991	

Tabla 29: Ecuaciones ajuste para el c_p del agua

Conocido este valor, y los de las temperaturas de entrada y salida del intercambiador de la corriente de efluente se podrá calcular la cantidad de calor que disipa dicha corriente, que vendrá dado con la siguiente expresión:

$$Q = W_{cal} \cdot C_p \cdot (T_1 - T_2) \quad (4)$$

Calculado este valor y con la misma expresión, pero correspondiente al fluido frío, se obtiene la temperatura de salida del fluido frío tras su paso por el intercambiador (T_4):

$$T_4 = T_3 + \frac{Q}{W_{frío} \cdot C_p} \quad (5)$$

A pesar de haber establecido un valor inicial de T_4 , éste va a variar debido a que el calor disipado por la corriente caliente va a pasar a la corriente de frío. Esto va a provocar un cálculo iterativo hasta obtener un valor estable para dicha temperatura.

Esta modificación afectará tanto al valor ya calculado de c_p , que tendrá que recalcularse para la nueva temperatura promedio, como al de resto de propiedades que se calcularán a continuación, previo ajuste frente a la temperatura. Todas ellas representadas a continuación y con las ecuaciones de ajuste en sus correspondientes tablas.

$$\rho = \rho(T) \quad (6)$$

$$\mu = \mu(T) \quad (7)$$

$$k = k(T) \quad (8)$$

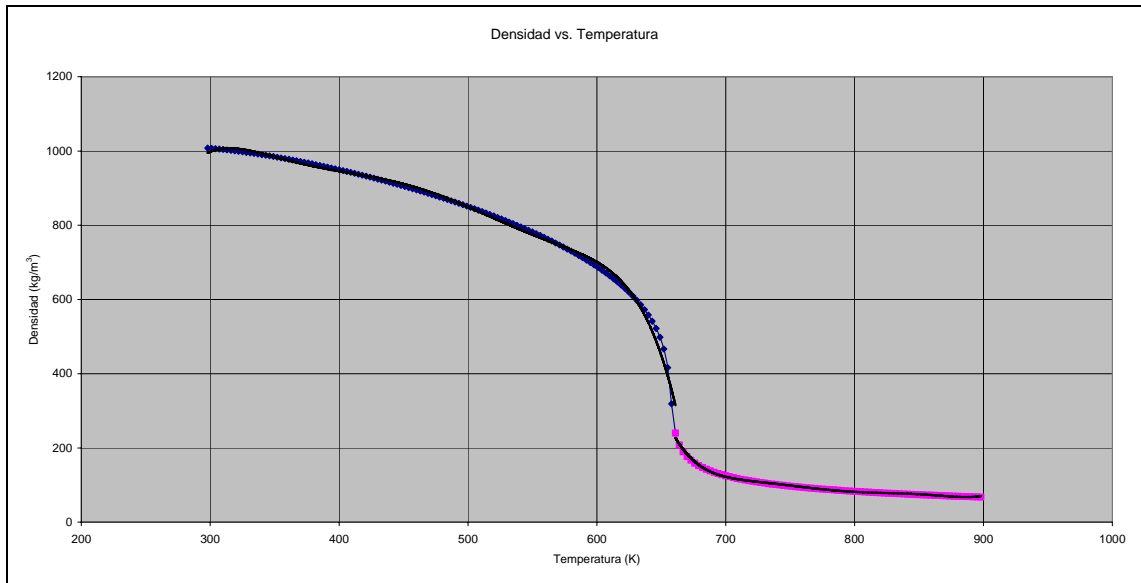


Fig. 14: Representación de la densidad frente a la temperatura

	ρ (Kg./m ³)	
Temperatura (K)	Ecuación Ajuste	r ²
298 – 658	$\rho = -1,33932E-11.T^6 + 3,69844E-08.T^5 - 4,20627E-05.T^4 + 2,52E-02.T^3 - 8,3930461744187.T^2 + 1471,66884631996.T - 105102,493643485$	0,9942
658 – 898	$\rho = 4,01861043009691E-11.T^6 - 1,91460298230779E-07.T^5 + 3,79477792953638E-04.T^4 - 4,00509369528836E-01.T^3 + 2,37404317474267E+02.T^2 - 7,49380352523147E+04.T + 9,84160442590838E+06$	0,9954

Tabla 30: Ecuaciones ajuste de la densidad del agua

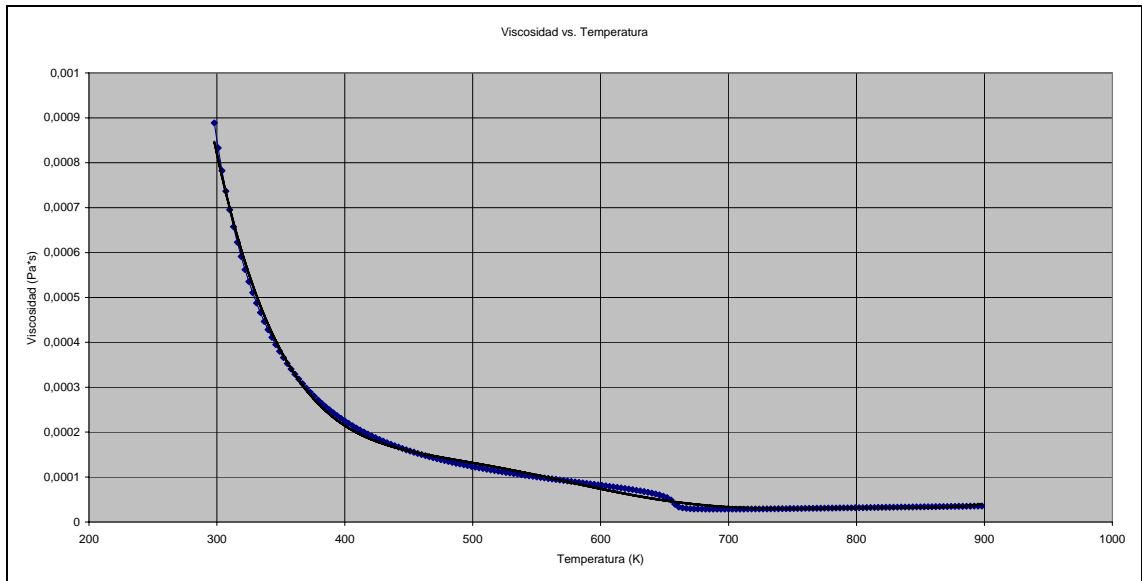


Fig. 15: Representación de la viscosidad frente a la temperatura

Temperatura (K)	μ (Pa.s)	
	Ecuación Ajuste	r^2
298 – 898	$\mu = 5,3359E-19.T^6 - 2,1455E-15.T^5 + 3,5403E-12.T^4 - 3,0658E-09.T^3 + 1,4693E-06.T^2 - 3,70E-04.T + 3,86E-02$	0,9978

Tabla 31: Ecuación ajuste de la viscosidad del agua

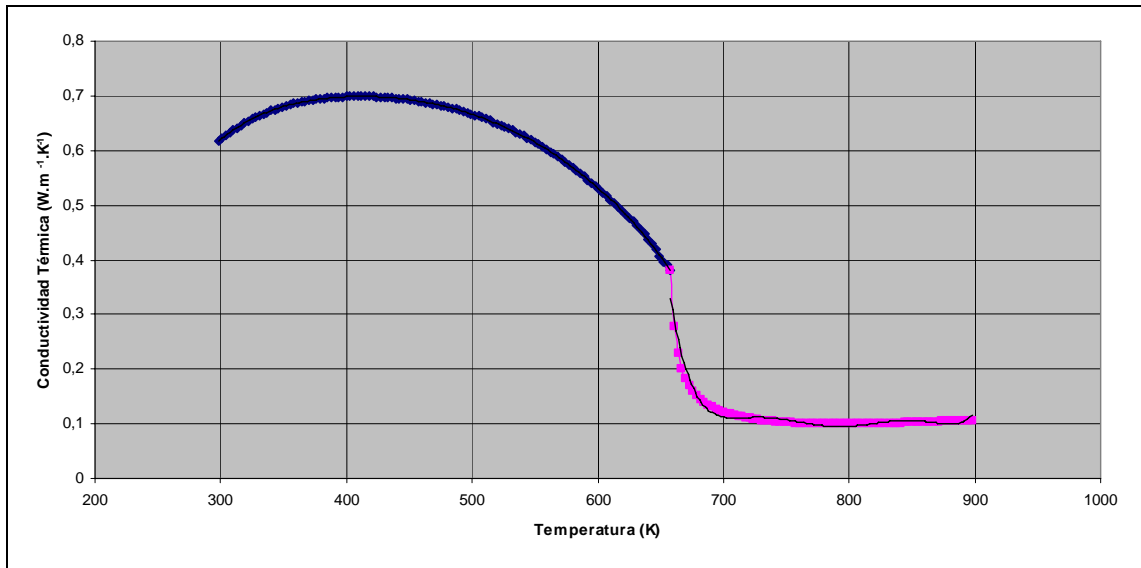


Fig. 16: Representación de la conductividad térmica frente a la temperatura

		k (W.m ⁻¹ . K ⁻¹)	
Temperatura (K)	Ecuación Ajuste	r ²	
298 – 655	$k = -5,94382E-16.T^6 + 1,7803E-12.T^5 - 2,23078E-09.T^4 + 1,49049E-06.T^3 - 5,63E-04.T^2 + 0,114514044790936.T - 9,16084260782536$	0,9999	
655 – 898	$k = 1,21477E-13.T^6 - 5,76592E-10.T^5 + 1,13834E-06.T^4 - 1,20E-03.T^3 + 0,706173799020872.T^2 - 221,895102292884.T + 29001,2157203792$	0,9539	

Tabla 32: Ecuaciones ajuste de la conductividad térmica del agua

Anexo de cálculo del intercambiador de calor

También se calculará la conductividad térmica del material que se decida emplear en la simulación, ya sea AISI 316 L o Inconel 625, como se justificó en la “*Memoria Descriptiva*” mediante el ajuste de dicha propiedad frente a la temperatura

$$K = K(T) \quad (9)$$

Además de la conductividad térmica del material en las condiciones de operación también interesa conocer el comportamiento que tendrán los tubos al someterlos a condiciones de operación tan severas; por lo que se realizará una comprobación de los espesores de tubos según la norma ASME B31.1 que se presenta en el correspondiente “*Anexo de Cálculo de Tuberías*” empleando un valor de temperatura superior al que se alcanzará en el intercambiador. De esta manera se podrá determinar si el material elegido soportará las condiciones de operación y si la instalación tendría algún problema para soportar la presión de operación.

Para el acero AISI 316L se encuentra en la bibliografía (*Transferencia de Calor, A.F. Mills*) una relación de valores de la conductividad térmica con la temperatura como se observa en la Tabla 29.

T (K)	K (W.m ⁻¹ . K ⁻¹)
300	13
400	15
500	17
600	18
800	21
1000	24

Tabla 33: Conductividad térmica acero 316L a distintas temperaturas

De la siguiente representación, se obtiene la correspondiente ecuación de ajuste de la conductividad térmica del material respecto de la temperatura. Se comprueba que abarca un amplio rango de temperaturas lo que permite estimar de manera correcta el valor de la conductividad térmica dentro del rango de temperatura de trabajo.

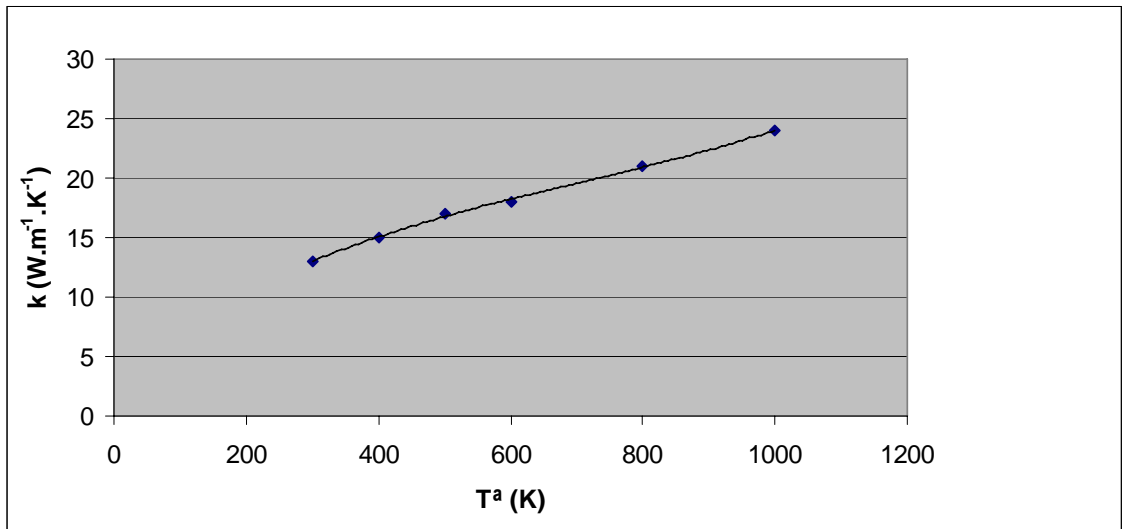


Fig. 17: Conductividad térmica del acero 316L frente a la temperatura

	Ecuación Ajuste	r ²
K (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	$K = 1,88413E-08.T^3 - 4,00416E-05.T^2 + 4,16E-02.T + 3,62312995966895$	0,9985

Tabla 34: Ecuación ajuste conductividad térmica acero 316L

Para el Inconel 625, Tabla 31, se encontraron datos en Internet a través de la Web de la empresa *High Temp Metals* (www.hightempmetals.com), que se dedica a la comercialización de materiales capaces de trabajar a altas temperaturas, donde disponen de una biblioteca de datos técnicos de distintas aleaciones. Con los datos hallados se procedió de igual manera que con el acero 316L.

Tª (°C)	K (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
23	9,8
100	11,4
200	13,4
300	15,5
400	17,6
500	19,6
600	21,3

Tabla 35: Datos de conductividad térmica para Inconel 625 en función de la temperatura

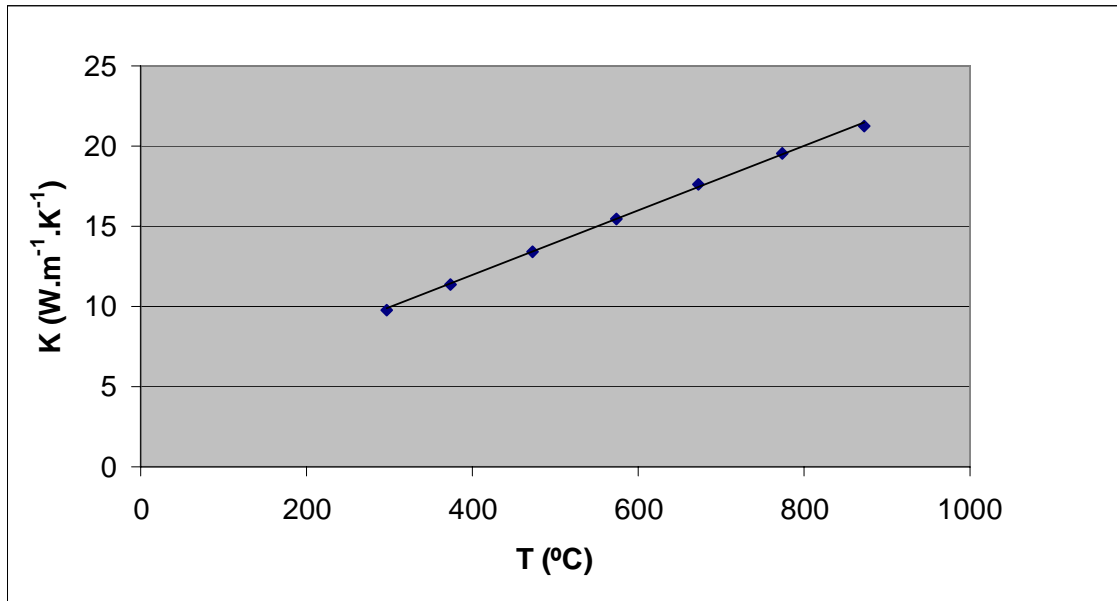


Fig. 18: Conductividad térmica del Inconel 625 frente a la temperatura

	Ecuación Ajuste	r ²
K (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	K = 2,02E-02.T + 9,396817484868	0,9993

Tabla 36: Ecuación ajuste Inconel 625 respecto de la temperatura

Una vez obtenidos todos los valores característicos de las corrientes y del material a emplear se calcularán todos aquellos valores dependientes de la geometría elegida, como es el diámetro equivalente, cuya expresión obtuvimos en el “*Anexo de selección de variables*”:

$$D_{eq} = D_2 - D_1 \quad (10)$$

Como ya son conocidos los valores de las propiedades termofísicas de las corrientes se puede realizar la conversión de caudal másico, empleado hasta ahora, a caudal volumétrico para la corriente caliente:

$$Q_{vl} = \frac{W_{cal}}{\rho} \quad (11)$$

Anexo de cálculo del intercambiador de calor

Será necesario conocer la sección transversal de paso de los respectivos tubos, por lo que se calculará mediante la expresión:

$$S_1 = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} \quad (12)$$

Conocidos ambos valores se determinará la velocidad a la que circula el fluido calefactor por el tubo interior

$$v_1 = \frac{Q_{v1}}{S_1} \quad (13)$$

A continuación se realizarán los mismos pasos para la corriente a precalentar. Primero se realizará la correspondiente conversión de flujo másico a volumétrico:

$$Q_{v2} = \frac{W_{frio}}{\rho} \quad (14)$$

Para el cálculo de la sección habrá que tener presente la geometría de corona circular por lo que la expresión a emplear será:

$$S_2 = \pi \cdot \left(\frac{D_2^2}{4} - \frac{D_1^2}{4} \right) \quad (15)$$

Con ambos valores ya conocidos se obtendrá la velocidad con que circula el fluido frío por la corona externa

$$v_2 = \frac{Q_{v2}}{S_2} \quad (16)$$

Anexo de cálculo del intercambiador de calor

Conocidas todas estas magnitudes se pueden obtener los valores de los respectivos coeficientes individuales de transferencia de calor mediante la *Ecuación de Dittus-Boelter*, que se expresa en su forma desarrollada tanto para el tubo interno como para el externo.

$$h_{ci} = 0,024 \cdot \frac{K}{D_1} \cdot \left(\frac{v_1 \cdot \rho \cdot D_1}{\mu} \right)^{0,8} \left(\frac{\mu}{k \cdot \rho} \right)^{0,3} \quad (17)$$

$$h_{ce} = 0,0225 \cdot \frac{K}{D_{eq}} \cdot \left(\frac{v_2 \cdot \rho \cdot D_{eq}}{\mu} \right)^{0,8} \left(\frac{\mu}{k \cdot \rho} \right)^{0,3} \quad (18)$$

Por el tubo interno circulará la corriente efluente del reactor, por lo que las propiedades del fluido se considerará como la correspondiente a la mezcla agua-aire. Mientras que por el tubo externo circulará la corriente a precalentar cuyas propiedades se pueden considerar son sólo las del agua.

También se puede calcular el incremento de temperatura media logarítmica, una vez finalizado el cálculo iterativo anteriormente comentado.

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_2 - T_4) - (T_1 - T_3)}{\ln \left(\frac{T_2 - T_4}{T_1 - T_3} \right)} \quad (19)$$

Una vez conocidos los respectivos coeficientes individuales de transferencia de calor se calculará el coeficiente global de transferencia de calor, en adelante U, mediante la expresión:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{ce}} + \frac{\varepsilon}{K \cdot D_{ml}} + \frac{D_e}{h_{ci} \cdot D_i}} \quad (20)$$

Obtenido el valor de U, se pasará a obtener el valor del área del intercambiador; teniendo presente que el valor del calor transferido será el que se obtenga en la última iteración del cálculo de T₄, además de los valores de temperatura media logarítmica y U.

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T_{ml}} \quad (21)$$

Como ya se indicó al inicio de este anexo, se considerará el intercambiador compuesto por tres tramos, por lo que estos cálculos se repetirán para cada uno de los tramos correspondientes. En cada uno de ellos se tendrán presentes los valores de las temperaturas de entrada y salida de cada tramo, de manera que las propiedades termofísicas de los fluidos y las de los materiales seleccionados para su construcción, irán variando a medida que se vaya produciendo su paso por el intercambiador de calor.

El punto de partida para todos los cálculos será la temperatura de salida del reactor tubular. El caudal másico se mantendrá constante durante todo el proceso, y será igual al caudal másico de la corriente de alimentación fría más el de oxidante. Además, el resto de valores serán fijados como criterios de diseño, o bien como resultado de la normativa a aplicar. Como criterios de diseño se establecen las temperaturas de entrada y salida de la corriente que va a ser tratada, y la de salida de la corriente tratada que debe ser acorde con la normativa ($< 50^{\circ}\text{C}$).

Por otro lado, el valor de la temperatura de salida del fluido frío es, en primera estimación, 673 K; pero los cálculos indicarán a qué temperatura realmente entrará dicha corriente al reactor pues este es el valor que se ve sometido al cálculo iterativo ya comentado.

Los tramos en que se ha separado el intercambiador ha sido según el comportamiento del fluido en cada tramo, por lo que se encontrará un primer tramo “*supercrítico*” donde la corriente tratada todavía está en el rango de temperaturas de comportamiento supercrítico, el segundo tramo se presenta como “*transición*” pues es en este tramo donde se produce la variación de las propiedades de la corriente tratada. El tercer, y último, tramo es el indicado como “*subcrítico*” pues ya la corriente tratada se encuentra dentro de un rango de temperaturas donde las propiedades ya no presenta un comportamiento supercrítico.

Anexo de cálculo del intercambiador de calor

Es por ello que los cálculos y las expresiones anteriormente indicadas se repetirán tres veces, una por tramo. Luego se sumarán de manera global los valores obtenidos de las características de diseño del equipo, y podrá hacerse una aproximación del coste de la unidad en el “Anexo de optimización”.

3.3.1 Tramo Supercrítico

En este primer tramo debe tenerse mucha precaución seleccionando la temperatura de entrada de la corriente a precalentar. Ya que dicha temperatura, T_3 , va a venir marcada por la siguiente etapa, cosa que también ocurrirá en el siguiente tramo, al corresponder al fluido frío. Como también se ha comentado T_4 comenzará teniendo un valor conocido, que irá variando al participar de un cálculo iterativo. En esta primera etapa el valor de T_3 será:

T_3 (K)	585,7
-----------	-------

Tabla 37: Valor de T_3 (temperatura de entrada del fluido frío) procedente de la etapa anterior

Al igual que se hizo en el “Anexo de cálculo de reactor tubular” se indicarán los valores finales obtenidos en este primer tramo de cálculos para, posteriormente, representar todos los cálculos de manera conjunta.

Partiendo de los datos iniciales anteriormente citados, se calcularían en primer lugar las temperaturas promedio mediante las expresiones (1) y (2) donde, como ya se dijo, T_4 se comportará como una variable de recirculación por lo que será necesario recalcularla hasta hallar un valor invariable. El resultado, después de varias etapas de cálculo, es:

T_4 (K)	672,15
T prom ₁ (K)	751,1
T prom ₂ (K)	628,9

Tabla 38: Valores de temperaturas en el tramo supercrítico, siendo Tprom1 la correspondiente al fluido caliente, y Tprom2 la correspondiente al fluido frío.

Anexo de cálculo del intercambiador de calor

Tras obtener estos valores se calcularán los valores de las distintas propiedades termofísicas de las corrientes, según las expresiones (3), (6), (7), (8) y (9), dependiendo de por cual de los dos tubos vayan a circular y en cual de los distintos tramos en los que se ha dividido el intercambiador de calor. Por último se realiza el cálculo de la temperatura media logarítmica (19) en contracorriente correspondiente a este tramo. Esto lleva a los siguientes resultados:

<i>Mezcla Aire/Agua</i>		Agua	Aire	Promedio
	c_p (J.g ⁻¹ .K ⁻¹)	4,2	1,1	2,7
	k (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,11	0,06	0,1
	ρ (Kg/m ³)	98,2	105,1	101,7
	μ (Pa.s)	2,98E-05	3,74296E-05	3,36E-05
<i>Agua Refrigeración</i>				
	c_p (J.g ⁻¹ .K ⁻¹)	8		
	k (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,46		
	ρ (Kg/m ³)	596,94		
	μ (Pa.s)	7,84E-05		
	<i>Material</i>	<i>Acero 316</i>	<i>Inconel 625</i>	
<i>Frío</i>	K (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	18,63	22,08	
<i>Caliente</i>		20,26	24,55	

Tabla 39: Valores de las distintas propiedades según temperaturas promedios

ΔT_{ml} (K)	57,24
---------------------	-------

Tabla 40: Valor temperatura media logarítmica para tramo supercrítico

En la Tabla 39, los valores remarcados son los empleados en los cálculos del ejemplo elegido.

Una vez calculados todos estos valores, se siguen dos caminos paralelos para la resolución del resto de cálculos: por un lado se calculará el calor que desprende la corriente que se está enfriando; mientras que por el otro se obtendrán las características de las corrientes a las temperaturas de operación establecidas.

Anexo de cálculo del intercambiador de calor

Se comenzará por el calor desprendido por la corriente de efluente (4) que, admitiendo comportamiento adiabático, será absorbido por la corriente a tratar en el reactor para aumentar su temperatura. En este bucle es donde se recalculará el valor de T_4 mediante la ecuación (5), de modo que el nuevo valor será introducido en el cálculo de la T_{prom2} ; lo que hará que se recalculen todas las propiedades anteriores. El calor desprendido es:

Q (W)	65469
-------	-------

Tabla 41: Calor desprendido/absorbido en el tramo supercrítico

Habiendo recalculado todas las propiedades con el nuevo valor de T_4 , se estará en disposición de calcular los caudales volumétricos y las velocidades de ambas corrientes. Pero antes será necesario calcular las secciones del tubo interior y de la corona circular formada por ambos tubos, así como el diámetro equivalente correspondiente a dicha corona. Estos valores van a permanecer constantes a lo largo del intercambiador por lo que sólo se presentarán en esta ocasión. Los valores obtenidos en las ecuaciones (12), (15) y (10) son los siguientes:

D_0 (m)	1,39E-02
D_1 (m)	1,76E-02
S_0 (m ²)	1,52E-04
S_1 (m ²)	9,07E-05
D_{eq} (m)	3,76E-03

Tabla 42: Áreas de los tubos y diámetro equivalente

Conocidos estos valores, y utilizando las expresiones (11) y (13) para el caso de la corriente de efluente, y las (14) y (16) para la corriente a precalentar; los resultados obtenidos de caudales volumétricos y velocidades son los siguientes:

Qv_1 (m ³ /h)	5,75
vel ₁ (m/s)	10,53
Qv_2 (m ³ /h)	0,58
vel ₂ (m/s)	1,77

Tabla 43: Caudales volumétricos y velocidades en el tramo supercrítico

Anexo de cálculo del intercambiador de calor

Donde el subíndice 1 hace referencia a la corriente de fluido caliente, y el subíndice 2 a la corriente de fluido frío.

Una vez conocidas las velocidades de ambas corrientes, y los valores de las distintas propiedades termofísicas para este tramo, se empleará la *Ecuación de Dittus-Boelter*, ecuación (17) para el fluido caliente y ecuación (18) para el fluido frío, para calcular los valores de los coeficientes de transmisión de calor por convección para cada uno de los tubos. Y una vez conocidos dichos valores, y los dependientes de las características de los tubos, se podrá calcular el coeficiente global de transferencia de calor (U) para este tramo del intercambiador mediante la ecuación (20). Los resultados obtenidos son:

h_{ce} ($W m^{-2} K^{-1}$)	h_{ci} ($W m^{-2} K^{-1}$)	U ($W m^{-2} K^{-1}$)
828922	1178988	1910

Tabla 44: Coeficientes individuales y global de transferencia de calor.

Hallado el valor de U para este tramo se obtendrá el área de intercambio referente a dicho tramo, lo que a su vez permitirá conocer la longitud que deberán tener los tubos.

Este dato será de importancia a la hora de realizar cálculos en el *Anexo de Optimización* puesto que los precios de los tubos empleados son función de la longitud. Para este cálculo se empleará el calor obtenido en uno de los pasos anteriores, y mediante la expresión (21) obtendremos dicho área. El cálculo de la longitud se realiza mediante la relación geométrica existente entre el área y la longitud de un cilindro ($A = \pi \cdot D \cdot L$). Los resultados obtenidos son:

$A(m^2)$	0,6
$L(m)$	13,72

Tabla 45: Área y longitud para el tramo supercrítico

3.3.2 Tramo de Transición

Para este tramo sólo se representarán los resultados obtenidos en este tramo, pues no se repetirán de nuevo todas las ecuaciones, así como las etapas de cálculo. Primero se señalarán las condiciones iniciales para este segundo tramo de intercambiador.

<i>Variables de Diseño</i>		<i>Variables Fijas</i>	
D ₀ (m)	1,39E-02	T ₁ (K)	676
D ₁ (m)	1,76E-02	T ₂ (K)	601
T ₄ (K)	585,73	T ₃ (K)	448,58
S ₀ (m2)	1,52E-04	W _{cal} (Kg/h)	584,68
S ₁ (m2)	9,07E-05	W _{frío} (Kg/h)	350
D _{eq} (m)	3,76E-03		
T prom ₁ (K)	638,5		
T prom ₂ (K)	517,2		

Tabla 46: Valores iniciales para el tramo de transición

Con estas condiciones iniciales las propiedades termo-físicas de ambas corrientes serán las siguientes:

<i>Mezcla</i>		Agua	Aire	Promedio
<i>Aire/Agua</i>	<i>c_p</i> (J.g ⁻¹ .K ⁻¹)	9,1	1,1	5,1
	<i>k</i> (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,44	0,05	0,2
	<i>ρ</i> (Kg/m ³)	548,2	122,6	335,4
	<i>μ</i> (Pa.s)	5,30E-05	3,41E-05	4,36E-05
<i>Agua Refrigeración</i>	<i>c_p</i> (J.g ⁻¹ .K ⁻¹)	4,7		
	<i>k</i> (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,65		
	<i>ρ</i> (Kg/m ³)	823,4		
	<i>μ</i> (Pa.s)	1,23E-04		
<i>Frío</i>	<i>Material</i>	<i>Acero 316</i>	<i>Inconel 625</i>	
		K (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	17,03	19,83
<i>Caliente</i>		18,76	22,28	

Tabla 47: Propiedades termofísicas para el tramo de transición

ΔT_{ml} (K)	78,55
---------------------	-------

Tabla 48: Temperatura media logarítmica para el tramo de transición

Anexo de cálculo del intercambiador de calor

El calor desprendido/absorbido en este segundo tramo será:

Q (W)	62364
-------	-------

Tabla 49: Calor absorbido/cedido en tramo transición

Los caudales volumétricos y velocidades de las dos corrientes circulantes, recordando que la geometría y dimensiones de los tubos se mantienen constantes, serán:

Qv ₁ (m ³ /h)	1,74
vel ₁ (m/s)	3,19
Qv ₂ (m ³ /h)	0,43
vel ₂ (m/s)	1,30

Tabla 50: Caudales volumétricos y velocidades en el tramo de transición

Una vez conocidos todos estos valores se calcularán los coeficientes de transmisión de calor por convección y el U para este segundo tramo de intercambiador. Los resultados obtenidos son:

h _{ce} (W m ⁻² K ⁻¹)	h _{ci} (W m ⁻² K ⁻¹)	U (W m ⁻² K ⁻¹)
399309	839464	6473

Tabla 51: Coeficientes individuales y global de transferencia de calor

Lo que lleva a la obtención del área de intercambio correspondiente a este segundo tramo en que se ha dividido el intercambiador, así como la longitud de tubo necesaria.

A (m ²)	0,12
L (m)	2,81

Tabla 52: Área y longitud para el tramo de transición

Con todos estos datos se iniciarán los cálculos para el tercer y último tramo de intercambiador. En este punto intermedio del intercambiador, recordar que el valor inicial de T₃ está fijado en el inicio del tercer tramo, y va variando a medida que la corriente a precalentar circula a través del intercambiador buscando el aumento de temperatura; es por eso que será necesaria una presentación global al final del proceso de cálculo donde queden representadas las principales variables que intervienen en el diseño del intercambiador.

3.3.3 Tramo Subcrítico

Para el último tramo en que se ha dividido el intercambiador se procederá de la misma manera que en los dos casos anteriores, por lo que el primer paso será presentar las condiciones iniciales para este último tramo.

<i>Variables de Diseño</i>		<i>Variables Fijas</i>	
D ₀ (m)	1,39E-02	T ₁ (K)	601
D ₁ (m)	1,76E-02	T ₂ (K)	473
T ₄ (K)	448,58	T ₃ (K)	298
S ₀ (m ²)	1,52E-04	W _{cal} (Kg/h)	584,68
S ₁ (m ²)	9,07E-05	W _{frío} (Kg/h)	350
D _{eq} (m)	3,76E-03		
T prom ₁ (K)	537		
T prom ₂ (K)	373,29		

Tabla 53: Valores iniciales para el tramo subcrítico

Conocidos los datos de partida se obtendrán los valores de las propiedades termo-físicas necesarias para el desarrollo del resto de cálculos.

<i>Mezcla Aire/Agua</i>	<i>c_p</i> (J.g ⁻¹ .K ⁻¹)	Agua	Aire	Promedio
	<i>k</i> (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	4,8	1,1	3,0
	<i>ρ</i> (Kg/m ³)	0,63	0,05	0,3
	<i>μ</i> (Pa.s)	793,2	145,3	469,3
<i>Agua Refrigeración</i>	<i>c_p</i> (J.g ⁻¹ .K ⁻¹)	1,12E-04	3,11E-05	7,15E-05
	<i>k</i> (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	4,2		
	<i>ρ</i> (Kg/m ³)	0,69		
	<i>μ</i> (Pa.s)	964,0		
<i>Frío Caliente</i>	<i>K</i> (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	<i>Material</i>	<i>Acero 316</i>	<i>Inconel 625</i>
			14,55	16,93
			17,33	20,23

Tabla 54: Propiedades termofísicas en el tramo subcrítico

ΔT_{ml} (K)	110,62
---------------------	--------

Tabla 55: Temperatura media logarítmica para el tramo subcrítico

Anexo de cálculo del intercambiador de calor

Disponiendo de estos datos, se calculará el calor absorbido/disipado en este último tramo de intercambiador. El cual resulta ser:

Q (W)	61793
-------	-------

Tabla 56: Calor absorbido/cedido en el tramo subcrítico

También se obtendrán los caudales volumétricos y velocidades de las corrientes.

Qv ₁ (m ³ /h)	1,25
vel ₁ (m/s)	2,28
Qv ₂ (m ³ /h)	0,36
vel ₂ (m/s)	0,52

Tabla 57: Caudales volumétricos y velocidades en el tramo subcrítico

De esta forma ya se dispone de todos los valores necesarios para calcular los coeficientes de transmisión de calor por convección, así como el coeficiente global de transferencia de calor para este último tramo de intercambiador.

h _{ce} (W m ⁻² K ⁻¹)	h _{ci} (W m ⁻² K ⁻¹)	U (W m ⁻² K ⁻¹)
124701	513238	5769

Tabla 58: Coeficientes individuales y global de transferencia de calor para el tramo subcrítico

Estos son los últimos valores necesarios para obtener tanto el área de intercambio como la longitud de este tramo de intercambiador.

A (m ²)	0,1
L (m)	2,22

Tabla 59: Área y longitud para el tramo subcrítico

3.3.4 Intercambiador de calor global

Una vez obtenidas las variables de diseño para cada uno de los tramos en que se dividió el intercambiador es el momento de realizar un resumen con los valores globales, de manera que el intercambiador quede representado como un todo. Por eso a continuación se representarán todas las variables fijas y de diseño del intercambiador.

D ₀ (m)	1,39E-02
D ₁ (m)	1,76E-02
T ₁ (K)	826,24
T ₂ (K)	676
T ₃ (K)	298
T ₄ (K)	670,88
W _{cal} (Kg/h)	584,68
W _{frío} (Kg/h)	350

Tabla 60: Valores iniciales globales para el intercambiador de calor

Longitud Total (m)	18,7
Área total (m ²)	0,82
Q Total (Kw)	190
U Global (Wm ⁻² K ⁻¹)	14151,4
ΔT _{ml} (K)	16,37

Tabla 61: Resultados globales para el intercambiador de calor

Finalmente se adjuntan las hojas de cálculos para cada uno de los tramos en que se ha dividido el intercambiador, donde se podrán observar todos los cálculos realizados en cada uno de ellos, así como tener una visión de conjunto de los mismos.

TRAMO SUBCRÍTICO															
Variables de Diseño				Variables Fijas				Condiciones Dittus-Boelter							
D0	1,39E-02	m		T1	601	K		Pr > 0,5	Pr	1,72	Re	6521	208196	124701	513238
D1	1,76E-02	m		T2	473	K		Re > 10000	Re						
T4	448,58	K		T3	298	K									
S0	1,52E-04	m ²		Weal	584,68	kg/h									
S1	1,94E-04	m ²		Wfrio	350	kg/h									
Deq	3,67E-03	m													
Tprom 1	537	K													
Tprom 2	373,29	K													
25 Mpa															
Mezcla Agua/Aire		Agua	Aire	Promedio											
Cp		4,8	1,1	3,0	J g ⁻¹ K ⁻¹			Qv1	1,25	m ³ /h					
k		0,63	0,05	0,3	W m ⁻¹ K ⁻¹			vell	2,28	m/s					
ρ		793,2	145,3	469,3	kg/m ³			Qv2	0,36	m ³ /h					
μ		1,12E-04	3,11E-05	7,15E-05	Pa s			vel2	0,52	m/s					
Agua Refrigeración															
25 Mpa															
Cp		4,2	J g ⁻¹ K ⁻¹												
k		0,69	W m ⁻¹ K ⁻¹												
ρ		964,0	kg/m ³												
μ		2,82E-04	Pa s												
Agua Caliente															
25 Mpa															
Cp															
k															
ρ															
μ															
Material															
<i>Aero 316 Inconel</i>															
Frio															
Caliente															
W															
K															
ΔTml															
K															

Tabla 64: Cálculos realizados para el tramo subcrítico

3.4. Anexo de cálculo de tuberías.

Como se señaló en el “*Anexo de cálculo del reactor tubular*” y en el “*Anexo de cálculo del intercambiador de calor*” para la selección de los distintos tubos que formarán las dos unidades se ha seguido la norma ASME B31.1 Power Piping, donde se desarrollan y explican los cálculos a realizar sobre los tubos elegidos, así como las condiciones que deben de cumplir.

En este anexo se pretende detallar qué cálculos se han realizado empleando los distintos diámetros suministrados, así como explicar el sentido de los mismos. Hay que recordar que todos estos cálculos tienen carácter teórico, por lo que en caso de llevarse a cabo la planta aquí ejemplificada, o cualquier otra que saliera de los cálculos de la amplia variedad de simulaciones posibles, sería necesario una comprobación más exhaustiva de los resultados aquí obtenidos.

El primer paso será conocer los materiales elegidos, así como la variación que sufre la tensión máxima admisible al variar la temperatura. Los materiales ya fueron descritos en la “*Memoria Descriptiva*”, se trata del *Acero A312 Grado TP316L* y la aleación *Inconel 625*.

La variación de la tensión máxima admisible de ambos materiales se puede encontrar en los apéndices de la norma ASME B31.1, y en las figuras a continuación representadas. Dichas variaciones han sido recogidas en dos gráficas de manera que los valores puedan ser ajustados y conocer cualquier valor dentro del rango de temperaturas considerados.

Table A-3 ASME B31.1-2001

**TABLE A-3
STAINLESS STEELS (CONT'D)**

Spec. No.	Type or Grade	Class	UNS Alloy No.	Nominal Composition	P-No.	Notes	Specified Minimum Tensile, ksi	Specified Minimum Yield, ksi	E or F
Seamless Pipe and Tube (Cont'd)									
Austenitic (Cont'd)									
A 312	TP304	...	S30400	18Cr-8Ni	8	(10)	75	30	1.00
	TP304	...	S30400	18Cr-8Ni	8	(9)(10)	75	30	1.00
	TP304H	...	S30409	18Cr-8Ni	8	...	75	30	1.00
	TP304H	...	S30409	18Cr-8Ni	8	(9)	75	30	1.00
A 312	TP304L	...	S30403	18Cr-8Ni	8	(1)	70	25	1.00
	TP304L	...	S30403	18Cr-8Ni	8	(1)(9)	70	25	1.00
	TP304N	...	S30451	18Cr-8Ni-N	8	(10)	80	35	1.00
	TP304N	...	S30451	18Cr-8Ni-N	8	(9)(10)	80	35	1.00
A 312	TP309H	...	S30909	23Cr-12Ni	8	(9)	75	30	1.00
	TP309H	...	S30909	23Cr-12Ni	8	...	75	30	1.00
	TP310H	...	S31009	25Cr-20Ni	8	(9)	75	30	1.00
	TP310H	...	S31009	25Cr-20Ni	8	...	75	30	1.00
A 312	TP316	...	S31600	16Cr-12Ni-2Mo	8	(10)	75	30	1.00
	TP316	...	S31600	16Cr-12Ni-2Mo	8	(9)(10)	75	30	1.00
	TP316H	...	S31609	16Cr-12Ni-2Mo	8	...	75	30	1.00
	TP316H	...	S31609	16Cr-12Ni-2Mo	8	(9)	75	30	1.00
A 312	TP316L	...	S31603	16Cr-12Ni-2Mo	8	(1)	70	25	1.00
	TP316L	...	S31603	16Cr-12Ni-2Mo	8	(1)(9)	70	25	1.00
	TP316N	...	S31651	16Cr-12Ni-2Mo-N	8	(10)	80	35	1.00
	TP316N	...	S31651	16Cr-12Ni-2Mo-N	8	(9)(10)	80	35	1.00
A 312	TP317	...	S31700	18Cr-13Ni-3Mo	8	(1)(10)	75	30	1.00
	TP317	...	S31700	18Cr-13Ni-3Mo	8	(1)(9)(10)	75	30	1.00
	TP321	...	S32100	18Cr-10Ni-Ti	8	(10)	75	30	1.00
	TP321	...	S32100	18Cr-10Ni-Ti	8	(9)(10)	75	30	1.00
	TP321H	...	S32109	18Cr-10Ni-Ti	8	...	75	30	1.00
	TP321H	...	S32109	18Cr-10Ni-Ti	8	(9)	75	30	1.00
A 312	TP347	...	S34700	18Cr-10Ni-Cb	8	(10)	75	30	1.00
	TP347	...	S34700	18Cr-10Ni-Cb	8	(9)(10)	75	30	1.00
	TP347H	...	S34709	18Cr-10Ni-Cb	8	...	75	30	1.00
	TP347H	...	S34709	18Cr-10Ni-Cb	8	(9)	75	30	1.00

Fig.19: Tensión máxima admisible respecto de la temperatura para el acero 316L

ASME B31.1-2001																Table A-3			
TABLE A-3 STAINLESS STEELS (CONT'D)																			
Maximum Allowable Stress Values in Tension, ksi, for Metal Temperature, °F, Not Exceeding																			
-20 to 100	200	300	400	500	600	650	700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	Type or Grade	Spec. No.
Seamless Pipe and Tube (Cont'd)																			
Austenitic (Cont'd)																			
18.8	15.7	14.1	13.0	12.2	11.4	11.3	11.1	10.8	10.6	10.4	10.2	10.0	9.8	9.5	8.9	7.7	6.1	TP304	A 312
18.8	17.8	16.6	16.2	15.9	15.9	15.9	15.9	15.6	15.2	14.9	14.7	14.4	13.8	12.2	9.8	7.7	6.1	TP304	
18.8	15.7	14.1	13.0	12.2	11.4	11.3	11.1	10.8	10.6	10.4	10.2	10.0	9.8	9.5	8.9	7.7	6.1	TP304H	
18.8	17.8	16.6	16.2	15.9	15.9	15.9	15.9	15.6	15.2	14.9	14.7	14.4	13.8	12.2	9.8	7.7	6.1	TP304H	
15.7	13.4	12.0	11.0	10.3	9.7	9.5	9.4	9.2	9.1	...	...	...	...	...	...	...	...	TP304L	A 312
15.7	15.7	15.3	14.7	14.4	14.0	13.7	13.5	13.3	13.0	...	...	...	...	...	...	...	...	TP304L	
20.0	17.9	15.7	14.1	13.0	12.4	12.2	11.9	11.8	11.6	11.3	11.1	10.8	10.6	10.3	9.8	7.7	6.1	TP304N	
20.0	20.0	19.0	18.3	17.8	17.4	17.3	17.2	16.9	16.7	16.3	15.9	15.6	15.0	12.4	9.8	7.7	6.1	TP304N	
18.8	18.8	18.7	18.3	17.9	17.5	17.3	17.1	16.8	16.5	16.1	15.6	15.1	13.8	10.3	7.6	5.5	4.0	TP309H	A 312
18.8	17.6	16.1	15.1	14.1	13.9	13.7	13.5	13.3	13.1	12.9	12.7	12.5	12.8	10.3	7.6	5.5	4.0	TP309H	
18.8	18.4	17.6	17.4	17.4	17.4	17.4	17.4	17.2	17.0	16.7	16.3	15.9	13.8	10.3	7.6	5.5	4.0	TP310H	
18.8	17.6	16.1	15.1	14.3	13.7	13.5	13.3	13.1	12.9	12.7	12.5	12.3	12.1	10.3	7.6	5.5	4.0	TP310H	
18.8	16.2	14.6	13.4	12.5	11.8	11.6	11.3	11.2	11.0	10.9	10.8	10.7	10.6	10.5	10.3	9.3	7.4	TP316	A 312
18.8	18.8	18.4	18.1	18.0	17.0	16.7	16.3	16.1	15.9	15.7	15.6	15.4	15.3	14.5	12.4	9.8	7.4	TP316	
18.8	16.2	14.6	13.4	12.5	11.8	11.6	11.3	11.2	11.0	10.9	10.8	10.7	10.6	10.5	10.3	9.3	7.4	TP316H	
18.8	18.8	18.4	18.1	18.0	17.0	16.7	16.3	16.1	15.9	15.7	15.6	15.4	15.3	14.5	12.4	9.8	7.4	TP316H	
15.7	13.3	11.9	10.8	10.0	9.4	9.2	9.0	8.8	8.6	8.4	...	...	...	...	...	...	...	TP316L	A 312
15.7	15.7	15.7	15.5	14.4	13.5	13.2	12.9	12.6	12.4	12.1	...	...	...	...	...	...	...	TP316L	
20.0	19.4	17.8	16.5	15.4	14.6	14.2	13.9	13.6	13.3	13.1	12.8	12.6	12.4	12.2	11.7	9.8	7.4	TP316N	
20.0	20.0	19.2	18.8	18.6	18.6	18.6	18.6	18.5	18.4	18.3	18.1	17.8	17.4	15.8	12.4	9.8	7.4	TP316N	
18.8	16.2	14.6	13.4	12.5	11.8	11.6	11.3	11.2	11.0	10.9	10.8	10.7	10.6	10.5	10.3	9.3	7.4	TP317	A 312
18.8	18.8	18.4	18.1	18.0	17.0	16.7	16.3	16.1	15.9	15.7	15.5	15.4	15.3	14.5	12.4	9.8	7.4	TP317	
18.8	15.9	14.2	12.9	12.0	11.4	11.2	11.0	10.9	10.8	10.7	10.6	10.6	10.4	9.2	6.9	5.0	3.6	TP321	
18.8	18.4	17.3	17.1	17.1	16.4	16.1	15.8	15.7	15.5	15.4	15.3	15.2	13.8	9.6	6.9	5.0	3.6	TP321	
18.8	15.9	14.2	12.9	12.0	11.4	11.2	11.0	10.9	10.8	10.7	10.6	10.6	10.5	10.1	8.8	6.9	5.4	TP321H	
18.8	18.4	17.3	17.1	17.1	16.4	16.1	15.8	15.7	15.5	15.4	15.3	15.2	14.0	11.7	9.1	6.9	5.4	TP321H	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18.8	17.3	16.1	15.0	14.1	13.4	13.2	12.9	12.8	12.7	12.7	12.6	12.6	12.5	11.9	9.1	6.1	4.4	TP347	A 312
18.8	17.9	16.4	15.5	14.9	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.6	14.0	12.1	9.1	6.1	4.4	TP347
18.8	17.3	16.1	15.0	14.1	13.4	13.2	12.9	12.8	12.8	12.7	12.6	12.6	12.6	12.5	12.1	10.5	7.9	TP347H	
18.8	17.9	16.4	15.5	14.9	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.6	14.4	14.1	13.0	10.5	7.9	TP347H		
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fig.20: Tensión máxima admisible respecto de la temperatura para el acero 316L (continuación)

ASME B31.1-2001		Table C-2 (SI)																
TABLE C-2 (SI)																		
MODULI OF ELASTICITY FOR NONFERROUS MATERIAL																		
E = Modulus of Elasticity, GPa (Note 1)																		
Materials	Temperature, °C																	
	-75	20	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
High Nickel Alloys																		
No2200 (200)																		
No2201 (201)	214	207	205	202	199	197	194	191	189	186	183	180	176	172	169	164	161	156
No4400 (400)	185	179	178	175	173	170	168	166	164	161	158	156	153	149	146	142	139	135
No6002 (X)	203	197	195	192	189	187	184	182	179	177	174	171	167	163	160	156	153	148
No6000 (600)	221	214	212	209	206	203	200	198	195	192	189	186	182	178	174	170	166	161
No625 (625)	214	207	205	202	199	197	194	191	189	186	183	180	176	172	169	164	161	156
No8000 (800)	203	197	195	192	189	187	184	182	179	177	174	171	167	163	160	156	153	148
No8010 (800H)	203	197	195	192	189	187	184	182	179	177	174	171	167	163	160	156	153	148
No10001 (B)	222	214	213	210	207	204	201	198	196	193	190	186	182	178	175	170	167	161
No6007 (6)	198	192	190	187	185	182	180	177	175	172	169	167	163	159	156	152	149	144
No6045 (C-4)	212	205	204	201	198	195	193	190	188	185	182	179	175	171	167	163	160	155
No6020 (20Mat)	198	192	190	187	185	182	180	177	175	172	169	167	163	159	156	152	149	144
No10276 (C-276)	212	205	204	201	198	195	193	190	188	185	182	179	175	171	167	163	160	155
No10665 (B-2)	224	217	215	212	209	206	203	200	198	195	191	188	184	180	176	172	168	163

Fig.21: Tensión máxima admisible respecto de la temperatura para el Inconel 625 (ASME B31.1)

Los materiales empleados se encuentran remarcados. A continuación, Tabla 57, se listan los valores correspondientes a cada uno de ellos.

Inconel 625		Acero A312 Grado TP316L	
Temperatura (°C)	E (GPa)	T ^a (°C)	E (MPa)
20	207	20	93,1
50	205	50	93,1
100	202	100	93,1
150	199	200	93,1
200	197	212	93,1
250	194	392	79,1
300	191	572	70,7
350	189	752	64,4
400	186	932	59,5
450	183		
500	180		
550	176		
600	172		
650	169		
700	164		
750	161		
800	156		

Tabla 65: Tensión máxima admisible frente a la temperatura

La representación de estos valores da lugar a las figuras 22 y 23, donde se observa el comportamiento de la tensión máxima admisible al aumentar la temperatura.

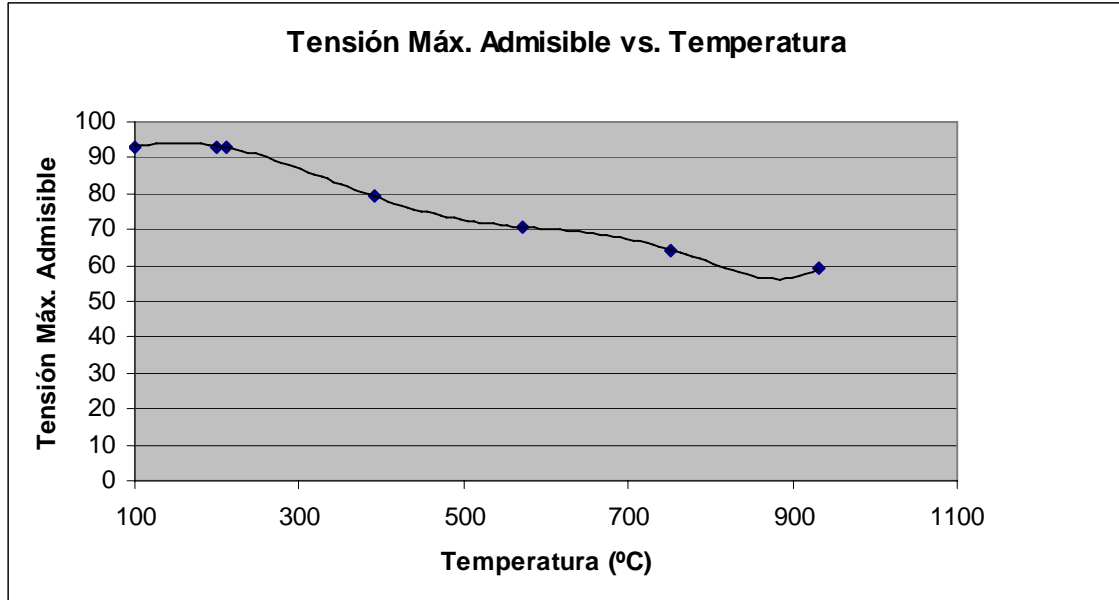


Fig. 22: Tensión máxima admisible del acero frente a la temperatura

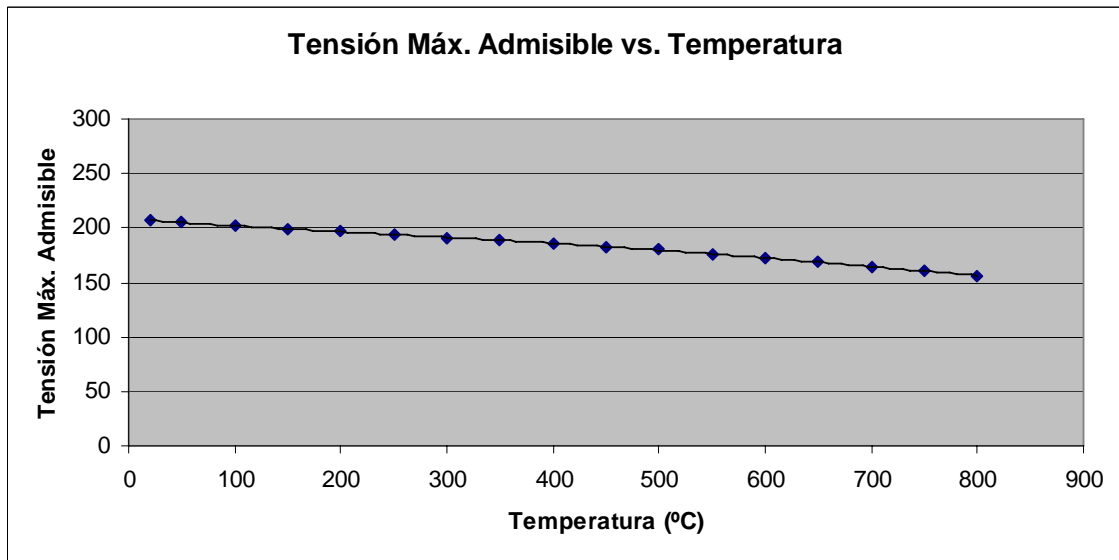


Fig. 23: Tensión máxima admisible del Inconel 625 frente a la temperatura

Las ecuaciones de ajuste que se obtienen, así como sus coeficientes de regresión, son las siguientes:

	Ecuación Ajuste	r ²
Acero 316L	$y = 4,63E-17.T^6 - 2,78E-13.T^5 + 6,69E-10.T^4 - 8,37E-7.T^3 + 5,97E-4.T^2 - 0,27.T + 130,29$	0,9999
Inconel 625	$y = 8,76E-11.T^4 - 1,78294E-7.T^3 + 9,26E-5.T^2 - 6,99E-2.T + 208,23$	0,9996

Tabla 66: Ecuaciones de ajuste y coeficientes de regresión de ambos materiales

Además, habrá que tener presente la eficiencia de la soldadura (E) empleada en la confección del tubo. Se puede consultar en la norma ASME B31.1 los distintos valores que puede presentar, pero se ha establecido como criterio de diseño que el tubo suministrado debe ser sin soldadura, según oferta realizada al fabricante; es decir, fabricado por cualquier otro de los métodos posibles. Por ello, el valor de este factor de calidad, en adelante E, se tomará como 1 (E = 1).

Este valor de E se multiplica por el valor de la tensión máxima admisible, por lo que si se emplearan tubos con algún tipo de soldadura este valor se vería reducido pudiendo entonces no soportar las condiciones de operación tan exigentes de una planta de estas características.

Conocidos todos estos datos, así como los fijados para el diseño de los tubos y los dados por la norma, se pueden calcular los espesores de los tubos suministrados en la oferta que se puede encontrar en el “Anexo de optimización”. Para ello primero se debe conocer la expresión que se empleará en la comprobación de los espesores de pared de los tubos.

La expresión es la siguiente:

$$t_m = \left[\frac{P \cdot D_0}{2 \cdot (S \cdot E + P \cdot y)} + A \right] \cdot M$$

Donde:

- t_m : espesor mínimo de pared
- P_d : presión interna de diseño ($P_d = 1,1 \cdot P$) $P = 25$ MPa
- D_0 : diámetro externo del tubo
- SE : esfuerzo máximo admisible del material
- S : esfuerzo básico permisible del material, excluyendo juntas, materiales fundidos o factores de calidad de grado estructural.
- E : Factor de calidad, es uno o el producto de más de uno de los siguientes factores de calidad
 - E_j : Factor de calidad de uniones
 - E_c : Factor de calidad de fundiciones
 - E_s : Factor de calidad de grado estructural
 - Se ha considerado $E=1$
- A : sobre-espesor por corrosión, normalmente se toma un valor de $A = 1,5$ mm
- y : coeficiente de redistribución de esfuerzos perimetrales, varía con el material, como podemos observar en la Fig. 23
- M : tolerancia de fabricación, la mayor parte de las especificaciones ASTM permiten una tolerancia del 12,5%; $M=1,125$

VALUES OF y								
Temperature, °F	900 and Below	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250 and Above
Temperature, °C	482 and Below	510	538	566	593	621	649	677 and Above
Ferritic steels	0.4	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Austenitic steels	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7	0.7	0.7
Nickel Alloys UNS Nos. N08800, N08810, N08825	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7

GENERAL NOTES:

(a) The value of y may be interpolated between the 50°F (27.8°C) values shown in the Table. For cast iron and nonferrous materials, y equals 0.4.

(b) For pipe with a D_o/t_m ratio less than 6, the value of y for ferritic and austenitic steels designed for temperatures of 900°F (480°C) and below shall be taken as:

$$y = \frac{d}{d + D_o} \quad (5)$$

Fig. 24: Valores del parámetro y , y su variación con la temperatura (ASME B31.1)

Como se ha indicado, la presión de diseño para el cálculo de los espesores se ha incrementado en un 10% como criterio de diseño; de esta forma se comprueba que las tuberías soportarían la presión de operación (25 MPa), así como cualquier aumento repentino dentro del porcentaje añadido. Señalar también que se ha considerado que será posible disponer de tuberías de Inconel 625 de los mismos diámetros comerciales que el Acero 316L. Esto deberá consultarse a suministradores de este material, y conocer cuales son los diámetros disponibles realmente debiendo realizar un nuevo estudio de los espesores en las nuevas condiciones de diámetros para el Inconel 625.

Para la temperatura de diseño se ha optado por tomar un valor más desfavorable para la instalación, por lo que se ha tomado como temperatura de diseño 700 °C; temperatura que supera en 100 °C la temperatura de operación máxima que puede alcanzar la instalación (600 °C).

Los resultados que se obtienen son los que a continuación se representan:

Acero 316L / Inconel 625				
De (mm)	Di (mm)	e (mm)	t_m Inconel	t_m Acero
13,70	10,68	3,02	0,18764308	0,516488295
17,1	13,9	3,2	0,187678589	0,598135025
21,3	17,57	3,73	0,187722454	0,698992751
26,7	22,79	3,91	0,18777885	0,82866697
33,4	28,85	4,55	0,187848824	0,989559056
42,2	37,35	4,85	0,187940729	1,200880004
48,3	43,22	5,08	0,188004437	1,3473363844
60,3	54,76	5,54	0,188129763	1,635528774
73	65,99	7,01	0,188262399	1,940503325
88,9	81,28	7,62	0,188428456	2,322321857
114,3	105,74	8,56	0,188693729	2,93227096
141,3	131,77	9,53	0,188975713	3,580642052
168,3	157,33	10,97	0,189257696	4,229013145
219,1	206,3	12,7	0,189788242	5,448911349

Tabla 67: Espesores de tubo necesarios para los distintos materiales

Se comprueba que los espesores comerciales para ambos materiales (e (mm)) son superiores en todos los casos a los espesores de pared mínimos calculados (t_m) que serían necesarios para los dos tipos de material, por lo que cualquiera de los diámetros representados podrán operar en las condiciones impuestas.

3.5. Anexo de cálculo de la optimización

Una vez realizados los cálculos que permiten conocer tanto el volumen del reactor como el área del intercambiador de calor, se debe proceder a la búsqueda del óptimo del proceso, pero es necesario conocer previamente las ecuaciones que permiten realizar una estimación de costes de los principales equipos de la planta.

Debe distinguirse claramente entre los *costes detallados*, calculados para la construcción de la planta, y los *costes aproximados*, estimados para la optimización del proceso. Los primeros se evalúan mediante el conocimiento del diseño y con el empleo de ofertas de construcción de los equipos y de los edificios necesarios dentro de la planta. Para los segundos sólo es posible basarse en los elementos principales del proceso y en variables de diseño importantes. Si esto se realiza con la suficiente efectividad se puede cometer un error menor al 15%. En la práctica existen numerosas situaciones en las que la obtención de conclusiones más avanzadas sobre los datos de costes requiere un consumo excesivo de tiempo, por lo que el diseñador debe contentarse con este nivel de precisión.

Durante el desarrollo de este anexo, deberán tenerse presentes las siguientes consideraciones:

1. La estimación rápida del inmovilizado y de los costes de fabricación para un proceso durante los estudios iniciales de diseño es un área crítica de la ingeniería de procesos.
2. La incertidumbre en la estimación de costes se traduce en incertidumbre en la optimización del proceso.
3. Con frecuencia, para reducir el trabajo y el tiempo de evaluación de diversas estimaciones, es posible aproximar los datos de coste mediante correlaciones que proporcionan suficiente precisión para las fases iniciales del diseño.
4. Es necesario que en el futuro se perfeccionen métodos de

estimación de costes adecuados a las necesidades de las diversas fases del desarrollo del diseño.

3.5.1. Estimación del inmovilizado necesario para los elementos principales del equipo.

La estimación del inmovilizado requerido suele realizarse con frecuencia por el siguiente procedimiento: primeramente se construye una lista con los elementos principales del equipo de proceso necesarios; en el presente proyecto los elementos principales que se considerarán son: el reactor, el intercambiador de calor, el compresor y la bomba de alimentación.

Como muchos datos de costes se han podido correlacionar frente a un parámetro de capacidad es práctica habitual presentar datos de costes en forma de una ecuación potencial:

$$I = I_B \left(\frac{Q}{Q_B} \right)^M$$

Donde:

- I = inmovilizado a calcular
- I_B = inmovilizado base
- Q_B = capacidad base de trabajo
- Q = capacidad del equipo cuyo coste queremos conocer
- M = pendiente

Debe fijarse claramente el intervalo de capacidades en el que resultan válidas estas correlaciones de coste de equipo, el límite inferior debe coincidir con la capacidad de las unidades comerciales de menor tamaño.

Anexo de cálculo de la optimización

Como las correlaciones de costes son un compromiso práctico que proporcionan rápidamente estimaciones de costes aproximados, el ingeniero debe conocer las fuentes de los datos usados en la construcción de estas correlaciones. Así mismo se han solicitado presupuestos seguros de empresas para reducir la incertidumbre de los costes de los elementos mayores de diseño especial, a pesar del tiempo necesario para obtener esta documentación.

Otra expresión aceptada para la estimación del precio de una unidad es:

$$Coste|_{actual} = Coste|_{base} \cdot \left[\frac{I_{M\&S-actual}}{I_{M\&S-base}} \right] \cdot \left[\frac{Q}{Q_{base}} \right]^M \quad (2)$$

Donde:

- Coste: es el coste del equipo en el año seleccionado como base (Coste base) y el que se quiere calcular (Coste actual)
- $I_{M\&S}$: son los índices de Marshall y Swift referentes a la unidad de la que se quiere conocer el precio, al igual que en el caso del coste debe conocerse el año elegido como referencia y en el que se quiere obtener el precio.
- Q: capacidad de los equipos, ya que con esta expresión se pueden estimar precios de equipos con mayor capacidad de trabajo.
- M: pendiente, que como ya se ha comentado, se ajusta al comprobar que la relación precio-capacidad aumenta exponencialmente.

Todos estos valores se pueden encontrar en la bibliografía (*Rudd & Watson, 1976*). Se ha decidido actualizar el año de referencia al año 2000 como base de cálculo, dado que cuanto mayor sea la diferencia entre el año actual y el tomado como base puede producir un mayor encarecimiento del equipo.

Anexo de cálculo de la optimización

Los índices de Marshall y Swift se calculan anualmente y son publicados en el *Chemical Engineering Magazine*. Aquí se emplearán el CEPCI (*Índice de Coste de Plantas de Ingeniería Química*), otro índice más acorde con el objetivo del presente proyecto, obtenidos de la web (<http://ca.geocities.com/fhcurry@rogers.com/>). En la fig.24 se relaciona la evolución de estos índices desde el año 1950 hasta el 2005, además de detallar los índices para los distintos tipos de equipos que se pueden emplear (Tabla 65). Estos índices dan la relación de los costes de diversos elementos en una fecha dada respecto a su coste en una fecha base, que permite efectuar interpolaciones y extrapolaciones en el tiempo.

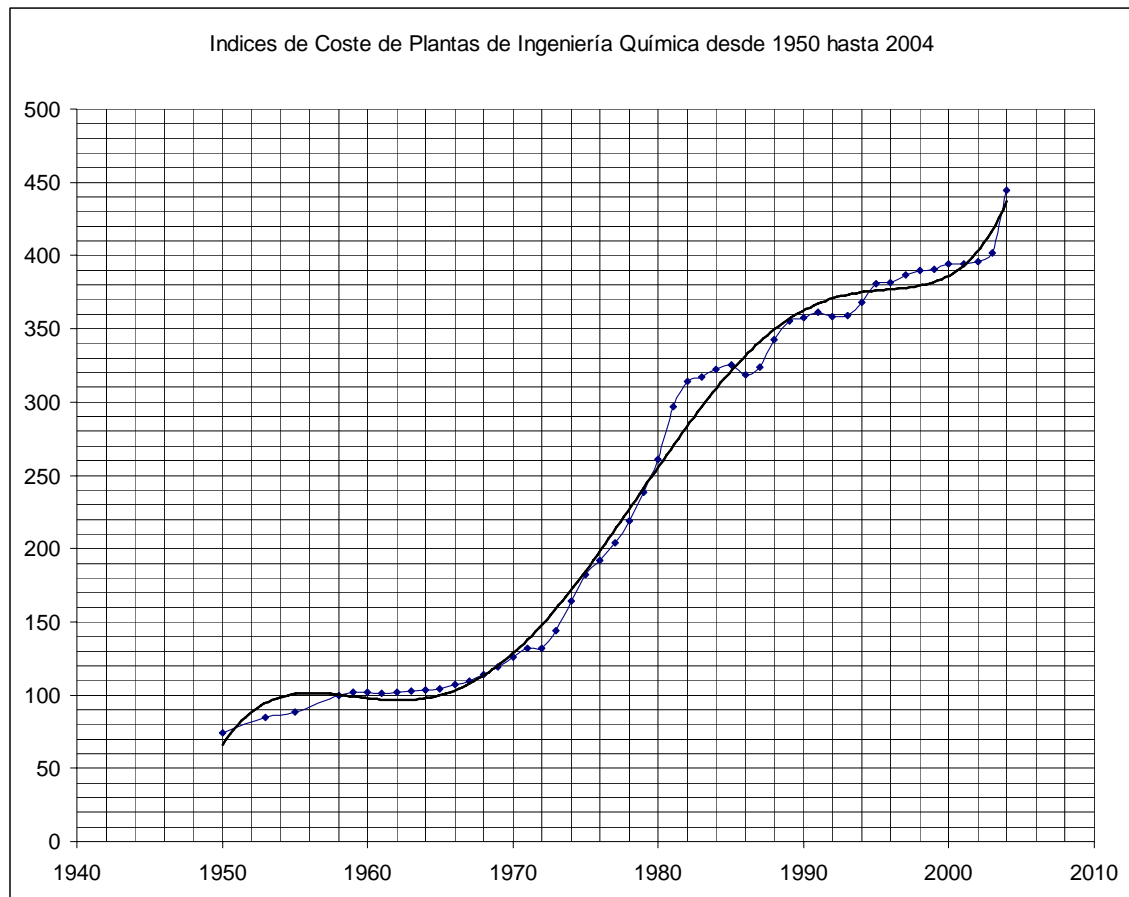


Fig.25: Evolución índices CEPCI frente al tiempo

Anexo de cálculo de la optimización

Ecuación de Ajuste y r^2	
Índice	$2,10104320347987E-07.x^6 -$ $2,46727279416815E-03.x^5 +$ $1,20707271000123E+01.x^4 -$ $3,14914672919916E+04.x^3 +$ $4,62081412195359E+07.x^2 -$ $3,61564305425969E+10.x +$ $1,17864538542832E+13$
r^2	0,993

Tabla 68: Ecuación de ajuste de los índices frente al tiempo

Índices Desglosados	
Equipamiento	549,5
Cambiadores de calor y Tanques	420,7
Maquinaria de Proceso	526,1
Tuberías, válvulas y uniones	631,5
Instrumental de Proceso	383,3
Bombas y Compresores	756,1
Equipamiento Eléctrico	376,1
Soporte estructural & Misc.	589,0
Trabajo de Construcción	309,4
Edificios	450,1
Ingeniería & Supervisión	346,9
2000 (año base)	394,1

Tabla 69: Desglose de los índices según uso

Los índices remarcados en la Tabla 69 serán los que se emplearán en los cálculos de las expresiones de costes totales.

Con toda esta información se pueden estimar los precios de los distintos equipos participantes en el presente proyecto; pero se ha creído oportuno obtener ecuaciones de coste de los equipos para, de esta manera, estimar valores intermedios y poder englobarlos según la dimensión característica principal de cada uno de ellos, como son el caudal a impulsar y la potencia en el caso de bomba y compresor.

Se ha recurrido a diferentes casas comerciales para obtener precios de los distintos equipos, de manera que se puedan realizar estimaciones que relacionen la característica principal de cada equipo con sus precios. A continuación se detallan las distintas ofertas recibidas, en las que se pueden observar los precios ofertados, y que son los empleados para obtener las estimaciones antes comentadas.

3.5.1.1 COMPRESOR

Como se observa en cada uno de los equipos se encuentran las características de trabajo de los distintos compresores, que ya fueron detalladas en la “*Memoria Descriptiva*”, así como los precios de cada uno de ellos. Los datos del compresor de capacidad $Q= 150$ l/min se han obtenido a través de un proyecto desarrollado anteriormente por el *Grupo de Análisis y Diseño de Procesos con Fluidos Supercríticos* del Departamento de Ingeniería Química.

Para representar las características de los compresores se ha empleado el caudal. De manera que se ha representado los precios de los equipos frente a los caudales que pueden suministrar los equipos, realizando un ajuste polinómico de los datos.

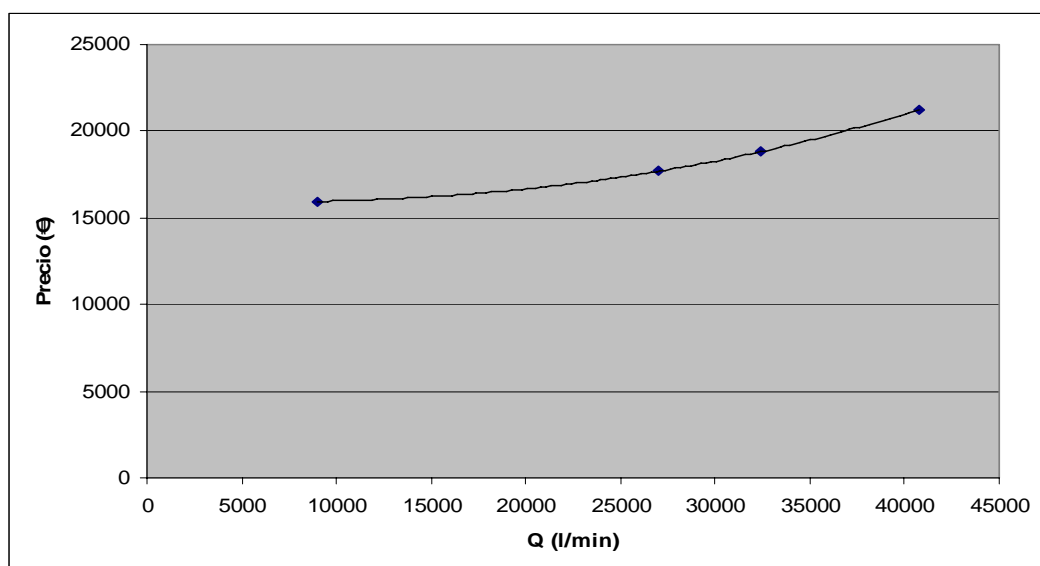


Fig.26: Representación precio frente caudal de aire

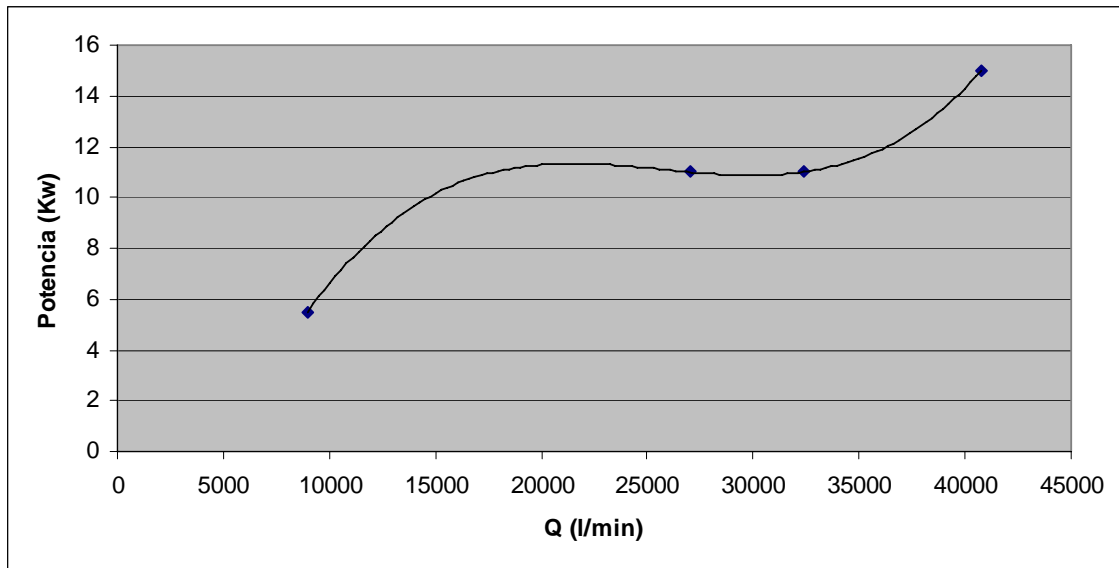


Fig. 27: Representación potencia frente a caudal de aire

Donde:

- Q: Caudal volumétrico de aire (l/h).
- Pot: Potencia de los equipos (Kw.).
- Precio: Precio equipos (€).

Las ecuaciones de ajuste que se obtienen son:

	Ecuación de Ajuste	r ²
Precio	$0,00000000003504389064.Q^3 + 0,00000246686302740898.Q^2 - 0,029522730274658.Q + 15991,0016709744$	1
Potencia	$0,000000000001495738553.Q^3 - 0,000000115366446717229.Q^2 + 0,00288373494156856.Q - 12,1993256948117$	1

Tabla 69: ecuaciones de ajuste precio y potencia frente a caudal


Anexo de cálculo de la optimización


Con estas expresiones se pueden obtener precio y potencia para cualquier caudal, siempre que se encuentre dentro de los valores empleados en la representación. Es por ello que, a partir de esos ajustes, se han establecido rangos de caudales que han permitido obtener valores promedios de precios y potencia para dichos equipos, y así ampliar la gama de equipos, sabiendo que muchos de ellos son sólo valores calculados.

	Q (l/h)	Potencia (Kw)	Precio (€)
COMPRESORES	3600-9000	5,5	15950,7
	9000-41000	12,3	19257
	41000-60000	36,7	25614,5
	60000-90000	213,8	43731
	90000-120000	794,7	82344,2

Tabla 70: Rango de compresores promediados a partir de ecuaciones de ajuste

En caso que el caudal de aire que se emplea sea menor al que es capaz de suministrar el menor de los equipos señalados cabría la posibilidad de realizar un bypass en la corriente de aire para emplear solamente el caudal de aire necesario. Los precios obtenidos se multiplicarán por los respectivos índices CEPCI, y añadiéndole los costes de operación propios del equipo, es decir, costes de electricidad, mantenimiento, etc. Esta línea de cálculo se seguirá también con las bombas y las tuberías a emplear para la fabricación tanto del reactor como del intercambiador.





MARINE VISION, S.L.
 Pol. Ind. La Vega, nave 19
 29650-MIJAS COSTA. MÁLAGA.
 Tlf: 34+95 247.32.55 y 34+95 247.31.94
 Fax: 34+952.585 545
www.marinevision.com
sales@marinevision.com

DESTINATARIO/TO: UNIVERSIDAD DE CADIZ. DPTO.INGENIERÍA QUÍMICA
FECHA/DATE: 05/10/06
ATTN: [REDACTED]

TOTAL PAGES./SHEETS: 3

Muy Sr. Mío:
 En contestación a su petición telefónica, remitimos nuestra mejor oferta para los compresores **BAUER** de su interés, según detalle:

VERTICUS 5 MODELO V180 15-5 (CAUDAL 680 l/m)

V180-11-5 COMPRESOR INSONORIZADO MODELO VERTICUS V180..... 21.273 EUROS.-
 PRESIÓN FINAL 330 BAR. MOTOR TRIFASICO.
 CAUDAL 680 L/M. r.p.m: 1400. 15 Kw. PESO UNIDAD 455 Kg.

OTROS EQUIPAMIENTOS Y CARACTERISTICAS DEL MODELO V180

- CAUDAL: 680 L/M.
- CONTROL ELECTRONICO DE FUNCIONES "BAUER-CONTROL" (standard)
- SISTEMA DE PURGAS DE CONDENSADOS AUTOMATICOS
- SISTEMA DE PURIFICACION P61.
- SISTEMA INDICADOR SATURACION FILTRO "SECURUS
- UNIDAD SIN GRIFOS NI RAMPA DE CARGA.
- PESO DEL SISTEMA: 455 KG APROX.
- KW/HP: 15.
- NIVEL SONORO: APROX. 68-72 Db a 1 m.
- NORMAS CUMPLIDAS SISTEMA FILTRADO: DIN 3188 Y PNEUROP 6611.



VERTICUS 5 MODELO V150 11-5 (CAUDAL 540 l/m)

V150-11-5 COMPRESOR INSONORIZADO MODELO VERTICUS V150..... 18.816 EUROS.-
 PRESIÓN FINAL 225 BAR. MOTOR TRIFASICO.
 CAUDAL 540 L/M. r.p.m: 1230. 11 Kw. PESO UNIDAD 440 Kg.

OTROS EQUIPAMIENTOS Y CARACTERISTICAS DEL MODELO V150

- CAUDAL: 540 L/M.
- CONTROL ELECTRONICO DE FUNCIONES "BAUER-CONTROL" (standard)
- SISTEMA DE PURGAS DE CONDENSADOS AUTOMATICOS
- SISTEMA DE PURIFICACION P61.
- SISTEMA INDICADOR SATURACION FILTRO "SECURUS
- UNIDAD SIN GRIFOS NI RAMPA DE CARGA.
- PESO DEL SISTEMA: 440 KG APROX.
- KW/HP: 11.
- NIVEL SONORO: APROX. 68-72 Db a 1 m.
- NORMAS CUMPLIDAS SISTEMA FILTRADO: DIN 3188 Y PNEUROP 6611.

Fig. 28: Oferta recibida para grupo de compresores Bauer Kompressoren



MARINE VISION, S.L.
Pol. Ind. La Vega, nave 19
29650-MIJAS COSTA. MÁLAGA.
Tlf: 34+95 247.32.55 y 34+95 247.31.94
Fax: 34+952.585 545
[www. marinevision.com](http://www.marinevision.com)
sales@marinevision.com

VERTICUS 5 MODELO V15.1-11-5 (CAUDAL 450 l/m)

V15.1-11-5 COMPRESOR INSONORIZADO MODELO VERTICUS V150..... 17.682 EUROS.-
PRESIÓN FINAL 330 BAR. MOTOR TRIFASICO.
CAUDAL 450 L/M. r.p.m: 1320. 11 Kw. PESO UNIDAD 440 Kg.

OTROS EQUIPAMIENTOS Y CARACTERISTICAS DEL MODELO V15

- CAUDAL: 450 L/M.
- CONTROL ELECTRONICO DE FUNCIONES "BAUER-CONTROL" (standard)
- SISTEMA DE PURGAS DE CONDENSADOS AUTOMATICOS
- SISTEMA DE PURIFICACION P61.
- SISTEMA INDICADOR SATURACION FILTRO "SECURUS
- UNIDAD SIN GRIFOS NI RAMPA DE CARGA.
- PESO DEL SISTEMA: 440 KG APROX.
- KW/HP: 11.
- NIVEL SONORO: APROX. 68-72 Db a 1 m.
- NORMAS CUMPLIDAS SISTEMA FILTRADO: DIN 3188 Y PNEUROP 6611.

PRECIOS IVA NO INCLUIDO
DESCUENTOS YA APLICADOS.
TRANSPORTES DE NUESTRO ALMACEN A DESTINO: DEBIDOS.
FORMA DE PAGO: CONTADO TRANSFERENCIA BANCARIA.

Esperando que la presente oferta sea de su interés, y estando a su disposición para cualquier consulta, reciba un cordial saludo.

www.marinevision.com

Fig. 29: Oferta recibida para grupo de compresores Bauer Kompressoren (continuación)

3.5.1.2 TUBERÍAS

En la siguiente tabla se desarrolla la oferta enviada por *Cuñado S.A.* a través de su delegación de Sevilla. Las características de estas tuberías, como ya se especificó en el “*Anexo de Cálculo de Tuberías*” son: Tuberías sin soldadura, especificación A312, Grado TP 316L, según ASME B31.1.

Díámetros exterior (mm)	Espesor (cedula XS)	Precios (€/metro lineal)
13,7	3,02	17,56
17,1	3,2	20,21
21,3	3,73	25,73
26,7	3,91	33,10
33,4	4,55	42,70
42,2	4,85	57,53
48,3	5,08	69,76
60,3	5,54	92,05
73	7,01	136,56
88,9	7,62	181,91
114,3	8,56	259,99
141,3	9,53	366
168,3	10,97	517,49
219,1	12,70	839,79

Tabla 70: Relación diámetros y precios según oferta recibida.

Para el caso del Inconel 625, se han supuesto los mismos diámetros pero se ha establecido como criterio de diseño que los precios que se emplearán sean los aquí suministrados multiplicados por cinco, siendo éste un factor de escala que permite aproximar al precio real del Inconel a raíz de la experiencia del *Grupo de Análisis y Diseño de Procesos con Fluidos Supercríticos* del Departamento de Ingeniería Química..

Anexo de cálculo de la optimización

En las figuras 30 y 31 se relaciona precio frente a diámetro, y se realiza un ajuste polinómico de los datos, lo que permitirá conocer los precios de cualquier diámetro que se encuentre dentro del rango aquí representado. Para el cálculo del coste, debe multiplicarse el precio obtenido por la longitud de los tubos.

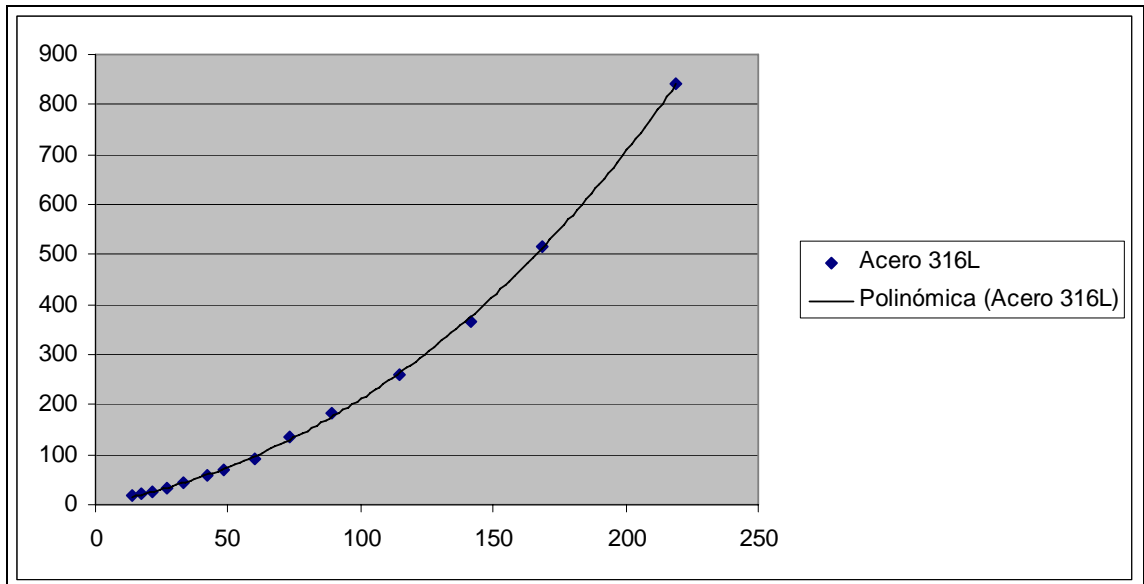


Fig. 30: Representación precio frente diámetro para Acero 316L

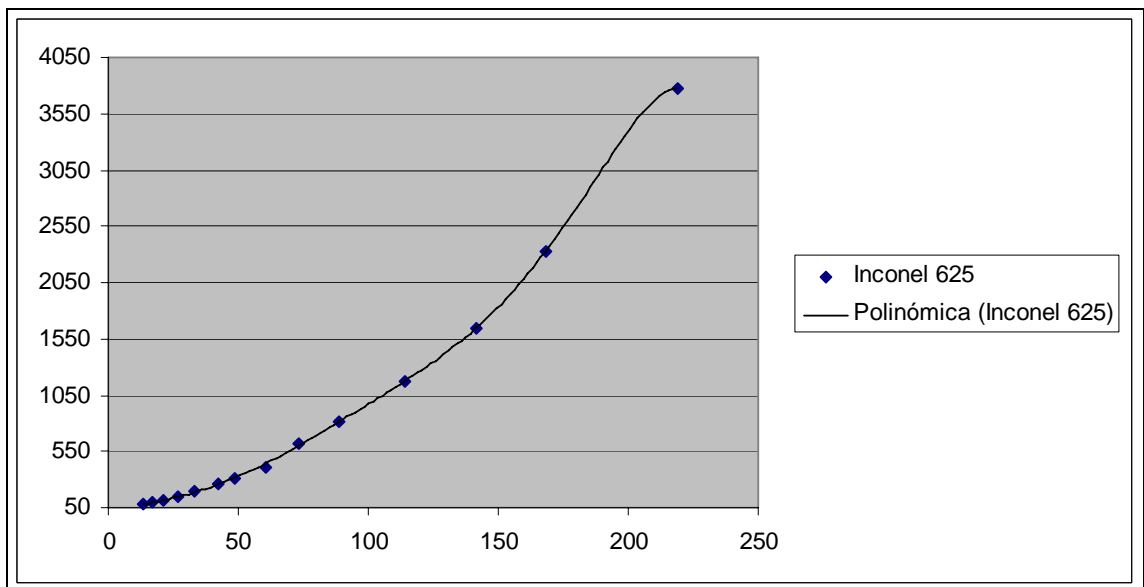


Fig. 31: Representación precio frente diámetro para Inconel 625

Anexo de cálculo de la optimización

Material	Ecuación Ajuste	r ²
Acero 316L	16705,2634927667.D ³ + 10746,766778136.D ² + 1132,40074754691.D + 1,93435365818864	0,9995
Inconel 625	75173,6857174635.D ³ + 48360,4505016105.D ² + 5095,80336396108.D + 8,70459146184861	0,9995

Tabla 71: Ecuaciones ajustes de los distintos materiales con su coeficiente de ajuste

A la hora de realizar los cálculos referentes al reactor se emplearán cualquiera de las expresiones arriba indicadas para los diámetros (expresados en metros). Pero para los cálculos que afecten al intercambiador (formado por dos tubos concéntricos) se ha decidido que en vez de emplear una expresión para el diámetro interno y otra para el diámetro externo, se empleará una única expresión para el diámetro interno que será multiplicada por dos.

Para realizar los cálculos no se empleará la ecuación (2), si no que se usará una variante (2') en la que no se tendrá en cuenta el término que representa la variación de la característica del equipo, ya que al emplear relaciones obtenidas directamente de los fabricantes, cualquier variación que sufra esta característica va a quedar inmediatamente reflejada en el coste del equipo. Esto se hace extensivo al caso de la bomba y compresor donde el razonamiento es análogo.

$$Coste|_{actual} = Coste|_{base} \cdot \left[\frac{I_{M\&S-actual}}{I_{M\&S-base}} \right] \quad (2')$$

3.5.1.3 BOMBAS

Para las bombas se han empleado datos suministrados por la casa comercial *Dosapro Milton-Roy*. Con estos datos se procederá de la misma manera que con compresores y tuberías; se representarán dichos datos realizando el correspondiente ajuste y empleando las respectivas ecuaciones de ajuste para estimar el precio de la bomba, y el coste de la electricidad que va a consumir dicha bomba para desarrollar su trabajo.

Q (l/h)	Precio (€)	Potencia (Kw.)
0,9	1800	0,25
5,48	2383,45	0,37
23	4074	1,1
107	6038	4
231	6038	15
438	13.451	18.5

Tabla 72: Oferta recibida de bombas Dosapro Milton-Roy

A partir de estos datos se obtienen las siguientes gráficas, con sus respectivos ajustes.

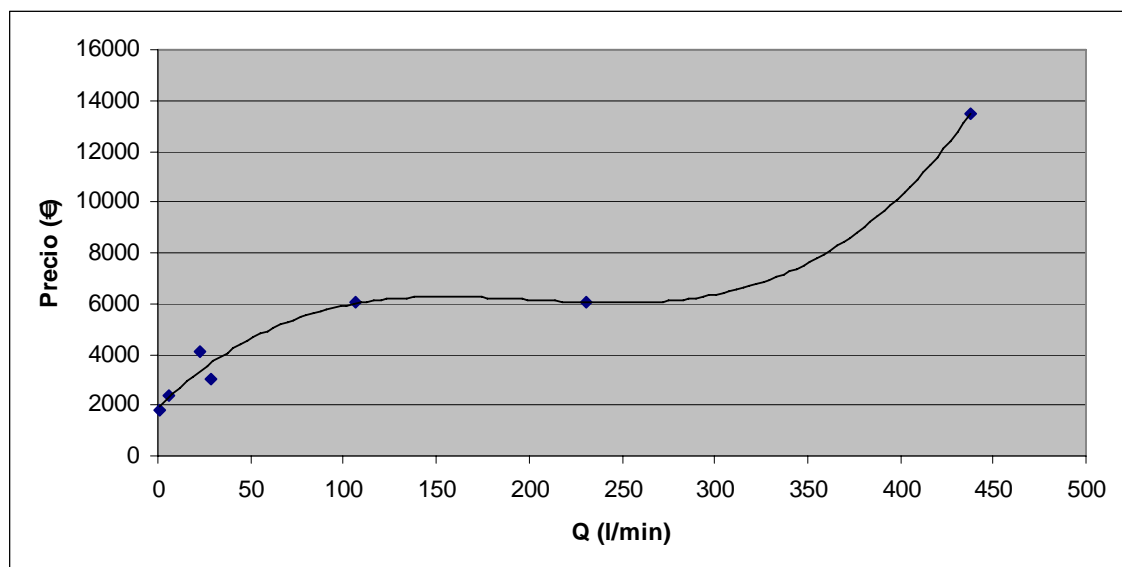


Fig. 32: Representación de precio frente caudal

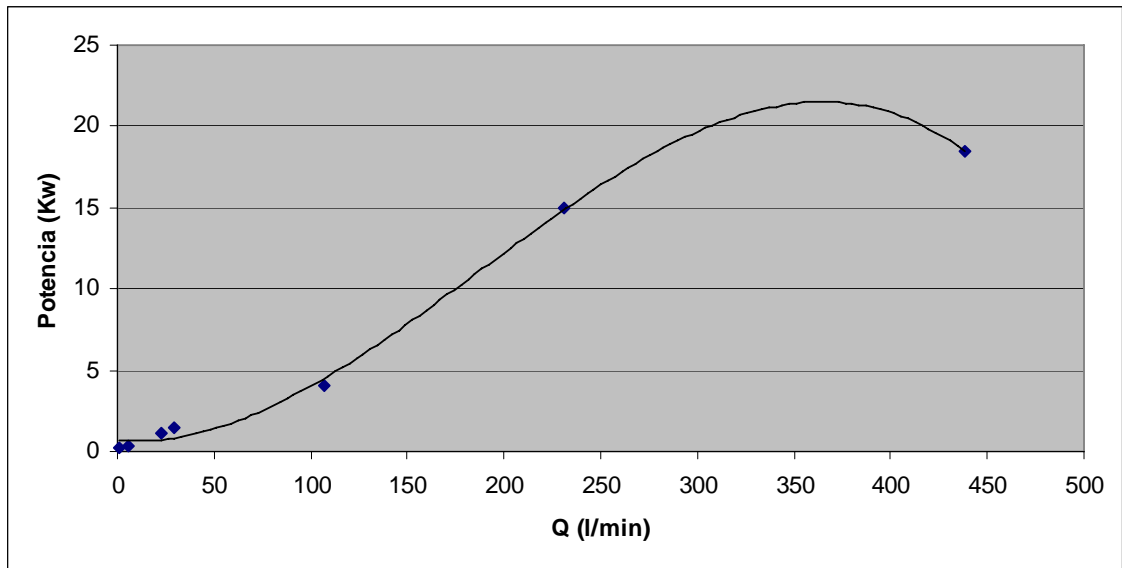


Fig. 33: Representación potencia frente a caudal

	Ecuación	r ²
Precio	$0,0006213331198478.Q^3 -$ $0,374772626081972.Q^2 +$ $71,2981142317558.Q +$ $1910,95330529768$	0,9897
Potencia	$0,000699809651774685.Q^2 +$ $0,0217360877841226.Q +$ $0,229870675176353$	0,9999

Tabla 73: Ecuaciones de ajustes y sus respectivos r²

A partir de las ecuaciones de ajustes se han estimado nuevos rangos de caudales para la bomba, de manera que se pueda ampliar el rango de valores sobre los que se pueda elegir a la hora de simular una instalación OASC. A partir de estos nuevos rangos se calculará el coste total correspondiente a cada uno de los equipos, de la manera que a continuación se describe, para posteriormente buscar la función objetivo, de aquí en adelante F.O., que se optimizará.

Anexo de cálculo de la optimización

	Rango (l/h)	Potencia (Kw)	Precio (€)
BOMBAS	0,5-2	0,25	1800
	2-9	0,37	2383,5
	9-25	1,1	4074
	25-50	1,92	4722,1
	50-75	4,1	4754
	75-100	7,2	3093,6
	100-225	4	6038
	225-400	15	6038
	400-438	18,5	13451

Tabla74: Rango de bombas promediadas a partir de ecuaciones de ajuste

3.5.2 CÁLCULO DEL INMOVILIZADO

Antes de realizar ningún cálculo ha sido necesario conocer las combinaciones posibles que se pueden dar en el presente proyecto, resultando ser cuatro:

1. Fenol + Acero 316
2. Fenol + Inconel 625
3. Biocut + Acero 316
4. Biocut + Inconel 625.

Tras esto se debe seleccionar un método de estimación del inmovilizado de los existentes en la bibliografía como pueden ser el de Guthrie o el de estimación factorial, entre otros. Finalmente se ha optado por este último, también conocido como método factorial de Lang en honor de su creador, por ser el que permite una aproximación mucho mayor a la realidad.

Este método permite evaluar el inmovilizado de un sistema completo a partir de los costes obtenidos para los elementos principales del equipo. El punto de partida es la evaluación del inmovilizado necesario para los elementos principales del equipo de proceso, al que se designará I_E .

Anexo de cálculo de la optimización

Se ha observado que los costes de otros elementos esenciales, necesarios para completar el sistema de proceso pueden correlacionarse con el inmovilizado requerido para los elementos principales del equipo, y que el inmovilizado global puede estimarse aplicando factores experimentales a este inmovilizado base (I_E). Se obtiene así la siguiente ecuación de estimación factorial, en la que los factores experimentales f se obtienen analizando datos de muchos sistemas de procesos similares:

$$I_F = \left[I_E + \left(\sum_i f_i I_E \right) \right] f_I \quad (3)$$

Donde:

- I_F : inmovilizado para el sistema completo
- I_E : Inmovilizado para los elementos principales
- f_i : factores multiplicadores para la estimación de costes de tuberías, instrumentación, etc.
- f_I : factor multiplicador para la estimación de gastos indirectos como honorarios de ingeniería, contingencias, etc.

Todos estos factores multiplicadores se encuentran en la figura de la página siguiente:

TABLA 12. Factores para estimar el coste total de la planta

COSTE DEL EQUIPO DE PROCESO INSTALADO		I_E
FACTORES EXPERIMENTALES COMO FRACCIÓN DE I_E		
<i>Tuberías de proceso</i>		f_1
Proceso de sólidos		0,07-0,10
Proceso mixto		0,10-0,30
Proceso de fluidos		0,30-0,60
<i>Instrumentación</i>		f_2
Control poco automatizado		0,02-0,05
Control parcialmente automatizado		0,05-0,10
Control complejo, centralizado		0,10-0,15
<i>Edificios de fabricación</i>		f_3
Construcción abierta		0,05-0,20
Construcción semiabierta		0,20-0,60
Construcción cerrada		0,60-1,00
<i>Plantas de servicios</i>		f_4
Escasa adición a las existentes		0,00-0,05
Adición considerable a las existentes		0,05-0,25
Plantas de servicios totalmente nuevas		0,25-1,00
<i>Conexiones entre unidades</i>		f_5
Entre las unidades de servicios		0,00-0,05
Entre unidades de proceso separadas		0,05-0,15
Entre unidades de proceso dispersas		0,15-0,25
COSTE FISICO TOTAL		$I_E \left(1 + \sum_i f_i \right)$
FACTORES EXPERIMENTALES COMO FRACCIÓN DEL COSTE FISICO		
<i>Ingeniería y construcción</i>		f_{I1}
Ingeniería inmediata		0,20-0,35
Ingeniería compleja		0,35-0,50
<i>Factores de tamaño</i>		f_{I2}
Unidad comercial grande		0,00-0,05
Unidad comercial pequeña		0,05-0,15
Unidad experimental		0,15-0,35
<i>Contingencias</i>		f_{I3}
De la compañía		0,10-0,20
Variaciones imprevistas		0,20-0,30
Procesos exploratorios		0,30-0,50
Factor de costes indirectos	$f_I = \sum_i f_{Ii}$	
COSTE TOTAL DE LA PLANTA		$I_F = I_E \left(1 + \sum_i f_i \right) f_I$

Fig. 34: Factores para estimar el coste total de la planta (Rudd y Watson, 1976)

Anexo de cálculo de la optimización

Como se puede comprobar en la Fig.34 todos los valores se encuentran dentro de un intervalo, por lo que se ha tomado el valor medio de dicho intervalo como valor a emplear en los cálculos.

Además, se han calculado nuevos factores partiendo del coste de una planta piloto existente; para ello se han agrupado los costes desglosados en grupos de similares características, y se han dividido por el coste total de la planta conociendo de esta manera el peso de cada uno de estos grupos frente al total. De manera que todos los factores que se emplearán se encuentran recogidos en la siguiente tabla:

<i>Factores de Coste</i>			
<i>Directos</i>		<i>Indirectos</i>	
Proceso de Fluidos	0,45	Ingeniería Compleja	0,425
Control Complejo	0,125	Unidad Experimental	0,25
Construcción Cerrada	0,8	<i>Contingencias</i>	
Planta Totalmente Nueva	0,625	De la Compañía	0,15
Unidades Proceso Separadas	0,2	Variaciones Imprevistas	0,25
Bombas	0,08	Gastos Generales	0,3
Tubos	0,31	Servicios Técnicos	0,13
Compresor	0,2	Imprevistos	0,13
Seguridad	0,07		
Montaje	0,02	<i>f_i</i>	2,635
Aislamiento	0,01		
Instrumentación	0,18		
Auxiliar	0,04		
<i>f_i</i>	4,11		
		<i>F_L</i>	10,82985

Tabla 74: valores de los distintos factores empleados

Como se puede comprobar en la Tabla 74, los factores se han dividido según sean costes directos e indirectos, es decir, según afecten directamente al proceso o no. Estos valores se han sumado siguiendo las ecuaciones presentes en la Fig. 34, obteniendo los valores correspondientes de f_i y f_l , que se han multiplicado dando lugar al factor de Lang (F_L). Una vez obtenido F_L comienza el cálculo del coste total de cada uno de los equipos que se va a desglosar para un fácil entendimiento.

Partiendo de la ecuación de ajuste correspondiente a cada equipo se seleccionarán de la Tabla 69 los índices CEPCI correspondientes a cada unidad y el del año base para realizar los cálculos, generando un cociente entre los índices que multiplicarán a las expresiones de ajuste. Esta operación da como resultado el inmovilizado de los elementos principales (I_E).

Una vez calculado I_E se multiplicarán cada una de las expresiones por el factor de Lang (F_L) y se dividirá por el tiempo estimado de amortización de la planta, al que se ha llamado T en el presente proyecto y que se ha supuesto de 5 años. El periodo de amortización de una planta representa la vida útil que se supone puede tener la instalación, en este caso resulta mucho más bajo de lo habitual (10-15 años) dadas las exigentes condiciones de operación a la que se ve sometida la instalación.

Estas expresiones permiten conocer el inmovilizado para el sistema completo (I_F). Tras lo cual se deberán calcular los costes de operación de manera que con la conjunción de ambas expresiones se obtengan los costes totales, si se refleja en una ecuación sería la siguiente:

$$Coste.Total = \left(\frac{I_E \cdot F_L}{T} \right) + Costes.Operation (4)$$

Para los costes de operación se ha supuesto que el mayor gasto corresponderá al consumo eléctrico, para estimarlo se ha tomado como referencia el valor del €/kWh presente en el *Real Decreto 1634/2006 del 30 de Diciembre de 2006* que asigna para una tarifa general con una potencia superior a 15 Kw un valor de 0,091706 €/kWh.

Anexo de cálculo de la optimización

Dicha cantidad multiplicará a las ecuaciones de ajuste que se han obtenido, y que relacionan la potencia con el caudal que impulsarán tanto la bomba como el compresor. Además, se ha estimado que la planta trabajará durante 300 días al año, en periodos de 24 horas al día, lo que supone 7200 horas de trabajo al año que al multiplicarlo por el tiempo de amortización de la instalación permite obtener ecuaciones con las unidades homogeneizadas.

También se ha supuesto que la planta tendrá dos empleados, ambos técnicos de grado medio, uno de ellos se encargará del control de la instalación mientras que el otro se encargará del mantenimiento. Estimándose que tendrán un contrato a tiempo completo, y en vez de emplear los sueldos que recibirían, se emplearán los costes anuales que suponen para la empresa, que deberán de multiplicarse por el tiempo de amortización de la planta. Dichos costes son:

	Tec. Control Automata	Tec. Mantenimiento
Coste Anual	33220,73 €	26293,9 €

Tabla 75: costes anuales de los empleados en la instalación

Finalmente el coste total de la planta vendrá dado por la ecuación (4) donde se sumarán todos los términos a los que se ha ido haciendo referencia anteriormente, y que se dividirá por el caudal a tratar para así obtener unos de los objetivos del presente proyecto, conocer el coste de una planta OASC en función del caudal tratado.

En las siguientes tablas se pueden encontrar englobados los pasos de cálculos descritos que han llevado a la obtención de los costes totales para las bombas y compresores, así como los de reactor e intercambiador.

Anexo de cálculo de la optimización

	Rango (l/h)	Precio (€)	CEPCI	I _E	I _F	Potencia (Kw)	Costes Operación	Costes Totales
BOMBAS	0,5-2	1800	1,92	3453,4	7479,9	0,25	165,1	7645
	2-9	2383,5	1,92	4572,8	9904,5	0,37	244,3	10148,8
	9-25	4074	1,92	7816,2	16929,6	1,1	726,3	17655,9
	25-50	4722,1	1,92	9059,5	19622,6	1,92	1265,5	20888,2
	50-75	4754	1,92	9120,8	19755,3	4,1	2699,5	22454,8
	75-100	3093,6	1,92	5935,3	12855,6	7,2	4733,3	17588,8
COMPRESORES	3600-9000	15950,7	1,92	30602,1	66283,3	5,5	3631,6	69914,8
	9000-41000	19257	1,92	36945,5	80022,8	12,3	8143,5	88166,3
	41000-60000	25614,5	1,92	49142,7	106441,7	36,7	24242,1	130683,7
	60000-90000	43731	1,92	83900,1	181725	213,8	141172,6	322897,6
	90000-120000	82344,2	1,92	157981,3	342182,8	794,7	524698	866880,8

Tabla 76: Obtención de costes totales para bombas y compresores

En el caso de reactor e intercambiador de calor hay que tener presente la salvedad de que dichos valores deberán ser multiplicados por la longitud de cada uno de los equipos previamente calculados en sus respectivos anexos.

	Equipo	Ecuación Ajuste (€/ml)	CEPCI	I _E	Ecuación Costes Totales (€/ml) = I _F
ACERO 316L	Reactor	16705D ³ + 10747D ² + 1132D + 2	1,33	22300D + 14346D ² + 1511D + 2	48302D ³ + 31074D ² + 3274D + 6
	Intercambiador de Calor		2,13	35665D ³ + 22944D ² + 2417D + 4	77251D ³ + 49696D ² + 5237D + 9
INCONEL 625	Reactor	75174D ³ + 48360D ² + 5096D + 9	1,33	100352D ³ + 64558D ² + 6802D + 11	217360D ³ + 139831D ² + 14734D + 25
	Intercambiador de Calor		2,13	160495D ³ + 103249D ² + 10879D + 18	347627D ³ + 223634D ² + 23564D + 40

Tabla 77: Obtención de costes totales para reactor e intercambiador para Acero 316L e Inconel 625

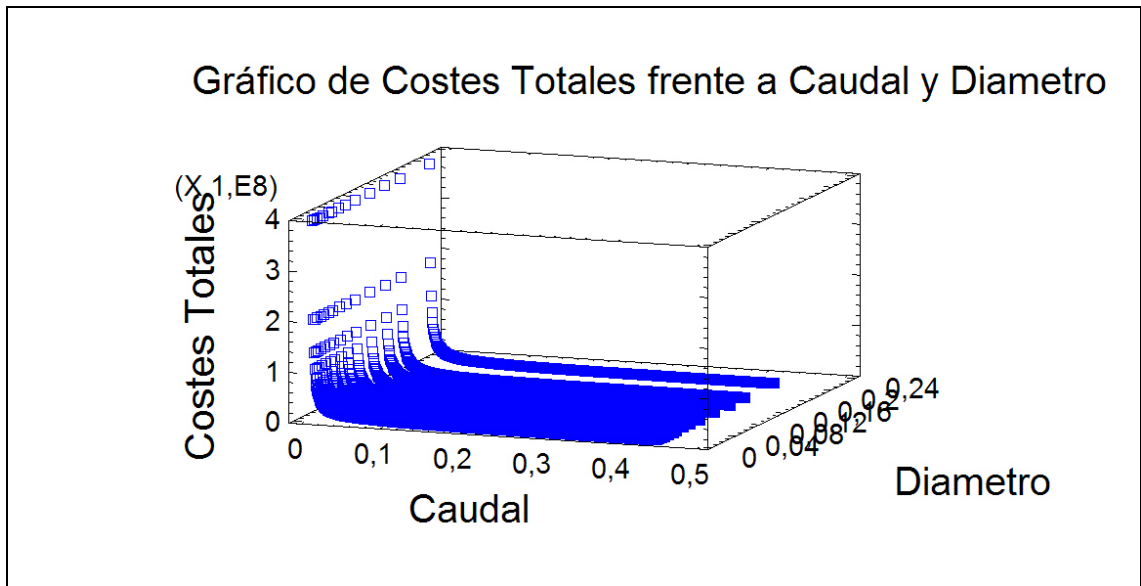


Fig. 35: Representación de los costes totales frente al caudal y diámetro para la combinación acero + fenol

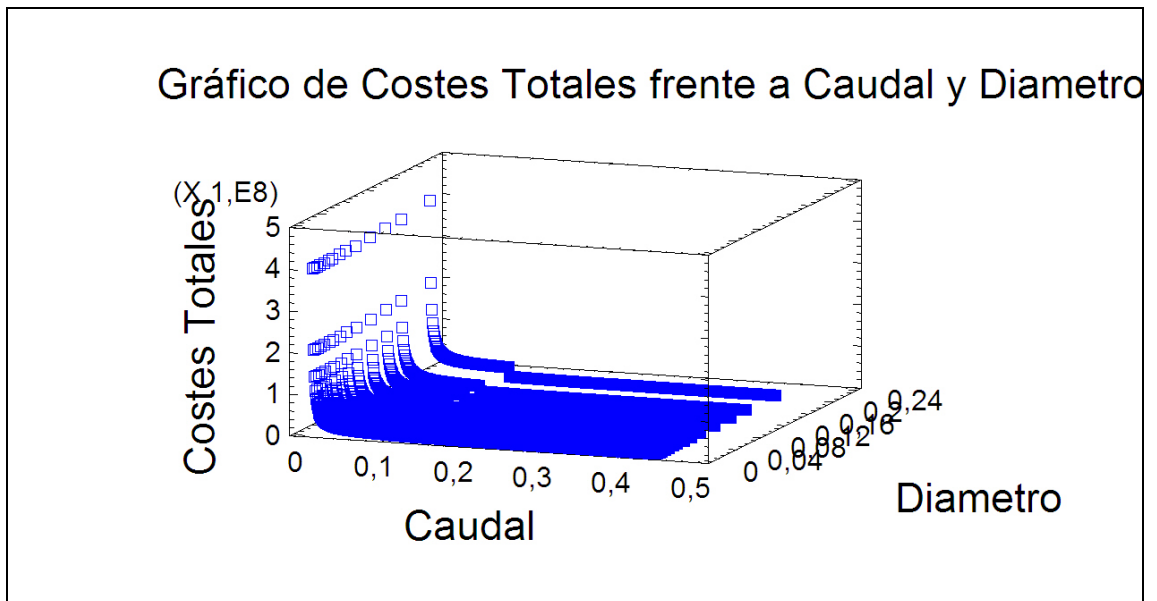


Fig. 36: Representación de los costes totales frente al caudal y diámetro para la combinación acero + biocut

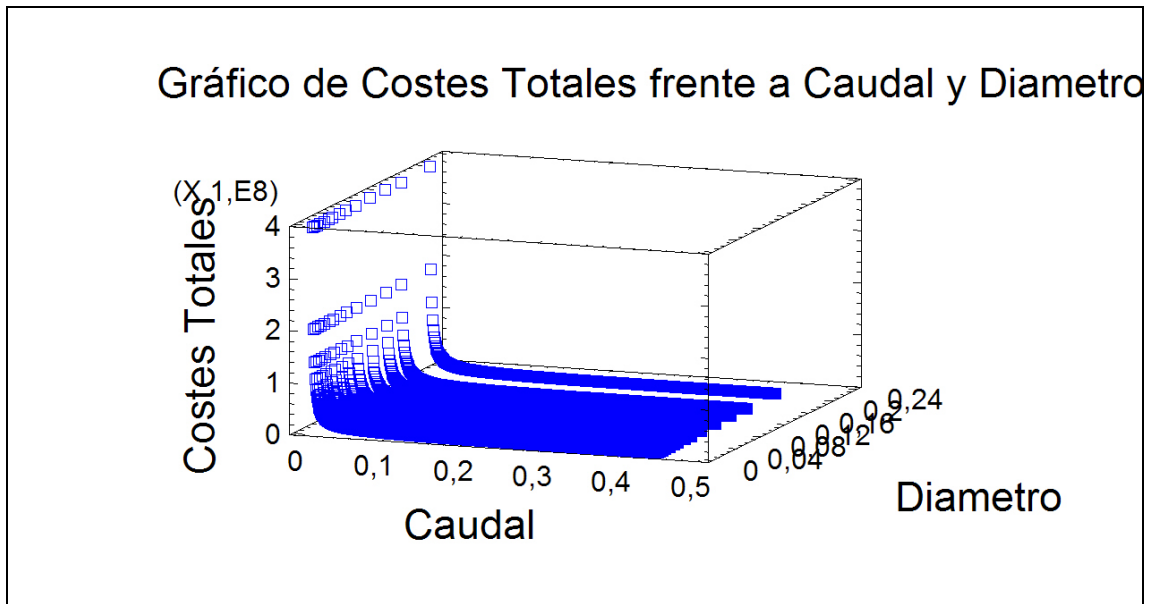


Fig.37: Representación de los costes totales frente al caudal y diámetro para la combinación inconel + fenol

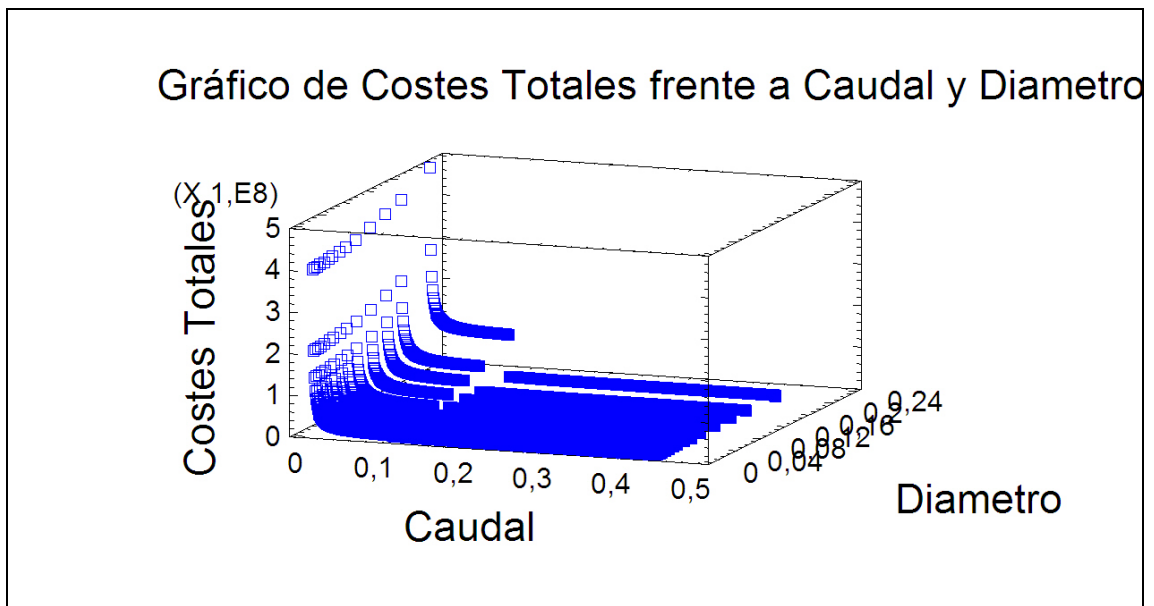


Fig.38: Representación de los costes totales frente al caudal y diámetro para la combinación inconel + biocut

Anexo de cálculo de la optimización

Estas gráficas proceden del tratamiento mediante el programa “Statgraphics” de todos los datos representados en la Tabla 82 y sucesivas que se incluyen al final del presente anexo, donde se encuentran los costes de cada uno de los equipos y el coste total de la instalación por m³ tratado. Una vez llevados dichos datos al citado programa además de representarlos se ha realizado un ajuste múltiple, de manera que el ajuste ahí obtenido se emplee como F.O. para la optimización.

El resultado de dicho ajuste es:

	Ecuación	r ² (%)
1	$1,88721 \cdot 10^7 + 1,8646 \cdot 10^6 \cdot D - 5,78379 \cdot 10^7 \cdot Q$	9 %
2	$2,09961 \cdot 10^7 + 2,76832 \cdot 10^7 \cdot D - 7,01281 \cdot 10^7 \cdot Q$	13 %
3	$2,84898 \cdot 10^7 + 1,22118 \cdot 10^8 \cdot D - 1,13245 \cdot 10^8 \cdot Q$	26 %
4	$1,87678 \cdot 10^7 + 8,35094 \cdot 10^6 \cdot D - 5,79593 \cdot 10^7 \cdot Q$	9 %

Tabla 78: Ajustes de los costes totales frente a caudal y diámetro

Donde:

1. Acero 316 + Fenol
2. Acero 316 + Biocut
3. Inconel 625 + Biocut
4. Inconel 625 + Fenol

3.5.3 Optimización

Anexo de cálculo de la optimización

Conocidas las expresiones de costes totales, ya se puede proceder a la optimización de cada una de ellas, pero sólo se realizará para el caso 1 que es la combinación que se tomó como base del ejemplo emprendido en el “*Anexo de Cálculo del Reactor Tubular*”.

El primer paso para realizar la optimización será la selección de uno de los diversos métodos existentes en la bibliografía. Pero antes se explicará el porqué de la optimización y que objetivo se persigue con su uso.

La optimización es: “*El proceso de encontrar el conjunto de condiciones requeridas para conseguir el mejor resultado*”. En el caso de este proyecto consistirá en buscar las condiciones de operación de la planta para que su coste sea mínimo.

Para ello se empleará la función objetivo obtenida (F.O.), que no es otra cosa que una función dependiente de las variables de diseño, y que debe llevar a la obtención del resultado perseguido. Por esa razón se estudiarán las características de la función objetivo en el intervalo; cuando se habla de características se hace referencia a:

- Representación de la misma.
- Continuidad de la función, funciones continuas, discontinuas, discretas. Teniendo especial cuidado con las que presentan forma de dientes de sierra.
- Comportamiento de la función, es decir, creciente o decreciente, unimodal o multimodal.

Para conocer todo esto se pueden emplear diversos métodos, los cuales se pueden dividir en:

Métodos Analíticos

Este tipo de métodos se basan en el número de variables de diseño y/o facilidad a la hora de derivar, Además de ser funciones restringidas, es decir, se buscará el óptimo en puntos estacionarios dentro del intervalo o en los extremos del mismo. Las características que deben cumplir son:

- Expresión Analítica de la Función.
- Función Objetivo continua en el intervalo de estudio.
- El óptimo debe ser un punto estacionario, es decir su primera derivada debe ser igual a cero, y la segunda mayor, menor o igual a cero según se busque un mínimo, máximo o punto de inflexión.

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. Habitualmente se investiga el valor de la función objetivo en los extremos del intervalo por varios motivos, entre los cuales se pueden destacar:

- Si la función objetivo es lineal el óptimo podrá localizarse fácilmente sin necesidad de investigar el intervalo completo, ya que el óptimo estará en uno de los extremos del intervalo.
- La naturaleza de la función en el límite puede ser completamente distinta de la región válida.

Dentro de los métodos numéricos podemos encontrar los siguientes métodos:

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

Al tener que trabajar con una función objetivo formada por dos variables se ha

Anexo de cálculo de la optimización

decidido emplear el *Método de Rosenbrock* de optimización, que se describirá a continuación y, del que después se expondrán sus resultados.

Este método permite calcular numéricamente el óptimo de una función de N variables independientes, en el presente proyecto dos variables, no restringidas. Es decir, las variables no tienen porqué tomar valores dentro de un intervalo determinado.

El procedimiento se puede resumir de la siguiente forma:

A partir de un punto base y de forma secuencial se efectúan movimientos en cada una de las N direcciones de búsqueda, que en la primera etapa coinciden con las de los ejes coordenados, con una longitud que va modificándose según los resultados que se van obteniendo. Cuando se concluye una etapa, a partir de la información obtenida en los movimientos anteriores, se selecciona un nuevo conjunto de direcciones de búsqueda ortogonales entre sí. Con estas direcciones, y a partir del punto final de la etapa anterior, se comienza una nueva etapa.

Si el movimiento en una dirección conduce a una mejora en el valor de la función (*éxito*), el punto resultante se toma como punto de partida para el movimiento en la siguiente dirección. Si, por el contrario, empeora el valor de la función (*fracaso*) se mantiene el mismo punto para el movimiento en la siguiente dirección. Un conjunto de N movimientos secuenciales, uno para cada dirección, constituye un ciclo.

En cada nuevo ciclo, la longitud de movimiento para cada dirección quedará modificada, multiplicándose por un factor α ($\alpha > 1$) o por un factor β ($-1 < \beta < 0$), según se haya obtenido en el ciclo anterior un éxito o un fracaso, respectivamente, en la dirección correspondiente. Los valores recomendados para estos parámetros son:

- $\alpha = 3$
- $\beta = -0,5$

Se efectúan tantos ciclos como sean necesarios hasta obtener al menos un éxito y

Anexo de cálculo de la optimización

un fracaso en cada una de las direcciones. Los éxitos o fracasos en un ciclo influyen sobre la longitud de movimiento en el ciclo siguiente.

La precisión de este método se comprueba mediante el valor absoluto del cociente entre la longitud de movimiento, cuando se realiza la prueba y la longitud inicial del mismo, en todas las direcciones, es menor que el error previamente elegido por el usuario.

Al consultar la bibliografía se ha encontrado una correspondencia de este método en el lenguaje de programación elegido (Basic) para la implementación de todos los cálculos ha realizar con este método de optimización, que se desarrollará en el “*Anexo de Programación*” junto con el resto de la aplicación.

El primer paso será conocer el valor tanto de las variables como de la función objetivo antes de comenzar la optimización para, de esa manera, disponer de un valor sobre el que poder comparar los resultados obtenidos. Como ya se indicó, el ejemplo desarrollado corresponde a la combinación de Acero 316 y Fenol por lo que es necesario acudir a la expresión de optimización nº 1 presentada en la tabla 69, con lo que en este caso resulta:

Q (m ³ /h)	D (m)	Coste Inicial (€/m ³)
0,2	0,0171	7330437,94

Tabla 79: datos de partida para la optimización

Se ha establecido una longitud inicial del movimiento de 0,1 y un error de 0,5. Aunque este error puede resultar muy elevado, se han probado con otros valores y, aunque la optimización es mucho más efectiva, las variables óptimas que se obtienen resultan carentes de sentido físico por lo que se ha establecido el error en el valor anteriormente citado.

Los resultados que facilita la aplicación tras el proceso de optimización son los

Anexo de cálculo de la optimización

siguientes:

Q^* (m ³ /h)	D^* (m)	Coste Óptimo (€/m ³)
0,3	0,0171	1546647,94

Tabla 80: valores óptimos del ejemplo desarrollado

Si realizamos la comparación entre el coste inicial y el coste optimizado, se puede comprobar en cuanto se ha reducido el coste.

Coste Inicial (€/m ³)	Coste Óptimo (€/m ³)	Diferencia (€/m ³)
7330437,94	1546647,94	5783790

Tabla 81: comparación del valor inicial y del valor óptimo

Anexo de cálculo de la optimización

Acero+Fenol									
Q (l/h)	Q (m3/h)	D (m)	Bomba	Compresor	Reactor	CC	Operarios	Coste Total (€)	Coste Total (€/m3)
1	0,001	0,01068	8305	84441	6	12	297573	390338	390338326
1	0,001	0,0139	8305	84441	8	16	297573	390344	390343902
1	0,001	0,01757	8305	84441	11	21	297573	390351	390350613
1	0,001	0,02279	8305	84441	14	27	297573	390361	390360826
1	0,001	0,02885	8305	84441	18	36	297573	390374	390373685
1	0,001	0,03735	8305	84441	25	49	297573	390394	390393590
1	0,001	0,04322	8305	84441	30	59	297573	390409	390408643
1	0,001	0,05476	8305	84441	41	81	297573	390441	390441460
1	0,001	0,06599	8305	84441	53	105	297573	390478	390477648
1	0,001	0,08128	8305	84441	73	142	297573	390534	390533979
1	0,001	0,10574	8305	84441	109	213	297573	390642	390642046
1	0,001	0,13177	8305	84441	157	307	297573	390783	390783096
1	0,001	0,15733	8305	84441	213	417	297573	390950	390949798
1	0,001	0,2064	8305	84441	350	686	297573	391356	391355739
2	0,002	0,01068	8305	84441	13	15	297573	390347	195173546
2	0,002	0,0139	8305	84441	17	19	297573	390355	195177631
2	0,002	0,01757	8305	84441	21	25	297573	390365	195182548
2	0,002	0,02279	8305	84441	28	33	297573	390380	195190031
2	0,002	0,02885	8305	84441	37	43	297573	390399	195199454
2	0,002	0,03735	8305	84441	50	58	297573	390428	195214037
2	0,002	0,04322	8305	84441	60	70	297573	390450	195225067
2	0,002	0,05476	8305	84441	82	96	297573	390498	195249112
2	0,002	0,06599	8305	84441	107	125	297573	390551	195275627
2	0,002	0,08128	8305	84441	145	169	297573	390634	195316900
2	0,002	0,10574	8305	84441	218	254	297573	390792	195396081
2	0,002	0,13177	8305	84441	314	366	297573	390999	195499428
2	0,002	0,15733	8305	84441	426	497	297573	391243	195621570
2	0,002	0,2064	8305	84441	701	818	297573	391838	195919003

437	0,437	0,01068	116972	84441	2784	318	297573	502088	1148943
437	0,437	0,0139	116972	84441	3608	412	297573	503006	1151044
437	0,437	0,01757	116972	84441	4600	526	297573	504112	1153574
437	0,437	0,02279	116972	84441	6109	698	297573	505794	1157423
437	0,437	0,02885	116972	84441	8009	916	297573	507912	1162269
437	0,437	0,03735	116972	84441	10951	1252	297573	511190	1169770
437	0,437	0,04322	116972	84441	13176	1506	297573	513669	1175443
437	0,437	0,05476	116972	84441	18026	2061	297573	519073	1187811
437	0,437	0,06599	116972	84441	23374	2672	297573	525033	1201449
437	0,437	0,08128	116972	84441	31700	3624	297573	534310	1222678
437	0,437	0,10574	116972	84441	47671	5450	297573	552108	1263405
437	0,437	0,13177	116972	84441	68517	7834	297573	575337	1316562
437	0,437	0,15733	116972	84441	93155	10651	297573	602792	1379386
437	0,437	0,2064	116972	84441	153150	17510	297573	669646	1532371
438	0,438	0,01068	116972	84441	2790	319	297573	502095	1146336
438	0,438	0,0139	116972	84441	3616	413	297573	503015	1148437
438	0,438	0,01757	116972	84441	4610	527	297573	504123	1150966
438	0,438	0,02279	116972	84441	6123	700	297573	505809	1154815
438	0,438	0,02885	116972	84441	8028	918	297573	507932	1159661
438	0,438	0,03735	116972	84441	10976	1255	297573	511217	1167163
438	0,438	0,04322	116972	84441	13206	1510	297573	513702	1172836
438	0,438	0,05476	116972	84441	18067	2065	297573	519119	1185203
438	0,438	0,06599	116972	84441	23428	2678	297573	525092	1198840
438	0,438	0,08128	116972	84441	31772	3632	297573	534390	1220069
438	0,438	0,10574	116972	84441	47780	5462	297573	552228	1260795
438	0,438	0,13177	116972	84441	68674	7850	297573	575510	1313951
438	0,438	0,15733	116972	84441	93368	10673	297573	603027	1376773
438	0,438	0,2064	116972	84441	153500	17546	297573	670033	1529755

Tabla 82: Cálculo de costes totales a partir de costes de cada equipo para Acero + Fenol

Anexo de cálculo de la optimización

Acero+Biocut									
Q (l/h)	Q (m3/h)	D (m)	Bomba	Compresor	Reactor	CC	Operarios	Coste Total (€)	Coste Total (€/m3)
1	0,001	0,01068	8305	84441	420	7	297573	390746	390746467
1	0,001	0,0139	8305	84441	544	9	297573	390873	390872856
1	0,001	0,01757	8305	84441	694	12	297573	391025	391025002
1	0,001	0,02279	8305	84441	921	16	297573	391257	391256523
1	0,001	0,02885	8305	84441	1208	21	297573	391548	391548044
1	0,001	0,03735	8305	84441	1651	29	297573	391999	391999264
1	0,001	0,04322	8305	84441	1987	34	297573	392341	392340522
1	0,001	0,05476	8305	84441	2718	47	297573	393084	393084462
1	0,001	0,06599	8305	84441	3524	61	297573	393905	393904814
1	0,001	0,08128	8305	84441	4780	83	297573	395182	395181816
1	0,001	0,10574	8305	84441	7188	124	297573	397632	397631642
1	0,001	0,13177	8305	84441	10331	178	297573	400829	400829173
1	0,001	0,15733	8305	84441	14046	243	297573	404608	404608228
1	0,001	0,2064	8305	84441	23093	399	297573	413811	413810716
2	0,002	0,01068	8305	84441	839	8	297573	391167	195583666
2	0,002	0,0139	8305	84441	1088	11	297573	391418	195709151
2	0,002	0,01757	8305	84441	1387	14	297573	391720	195860209
2	0,002	0,02279	8305	84441	1842	18	297573	392180	196090073
2	0,002	0,02885	8305	84441	2415	24	297573	392759	196379508
2	0,002	0,03735	8305	84441	3303	33	297573	393655	196827500
2	0,002	0,04322	8305	84441	3973	40	297573	394333	197166316
2	0,002	0,05476	8305	84441	5436	54	297573	395810	197904934
2	0,002	0,06599	8305	84441	7049	70	297573	397439	198719416
2	0,002	0,08128	8305	84441	9560	95	297573	399975	199987282
2	0,002	0,10574	8305	84441	14376	144	297573	404839	202419579
2	0,002	0,13177	8305	84441	20663	206	297573	411188	205594233
2	0,002	0,15733	8305	84441	28092	281	297573	418693	209346250
2	0,002	0,2064	8305	84441	46185	461	297573	436966	218482897
437	0,437	0,01068	116972	84441	6085	55	297573	505126	1155895
437	0,437	0,0139	116972	84441	7886	71	297573	506943	1160053
437	0,437	0,01757	116972	84441	10054	90	297573	509131	1165060
437	0,437	0,02279	116972	84441	13354	120	297573	512460	1172678
437	0,437	0,02885	116972	84441	17509	157	297573	516652	1182270
437	0,437	0,03735	116972	84441	23939	215	297573	523140	1197118
437	0,437	0,04322	116972	84441	28802	259	297573	528048	1208347
437	0,437	0,05476	116972	84441	39405	354	297573	538745	1232826
437	0,437	0,06599	116972	84441	51096	459	297573	550541	1259820
437	0,437	0,08128	116972	84441	69295	623	297573	568904	1301839
437	0,437	0,10574	116972	84441	104208	937	297573	604131	1382450
437	0,437	0,13177	116972	84441	149777	1346	297573	650109	1487665
437	0,437	0,15733	116972	84441	203634	1830	297573	704450	1612014
437	0,437	0,2064	116972	84441	334781	3009	297573	836777	1914821
438	0,438	0,2064	116972	84441	6099	55	297573	505140	1153288
438	0,438	0,2064	116972	84441	7904	71	297573	506961	1157446
438	0,438	0,2064	116972	84441	10077	91	297573	509154	1162453
438	0,438	0,2064	116972	84441	13385	120	297573	512491	1170071
438	0,438	0,2064	116972	84441	17549	158	297573	516692	1179663
438	0,438	0,2064	116972	84441	23994	215	297573	523196	1194510
438	0,438	0,2064	116972	84441	28868	259	297573	528114	1205739
438	0,438	0,2064	116972	84441	39495	355	297573	538836	1230218
438	0,438	0,2064	116972	84441	51213	460	297573	550659	1257212
438	0,438	0,2064	116972	84441	69453	624	297573	569063	1299231
438	0,438	0,2064	116972	84441	104446	938	297573	604371	1379842
438	0,438	0,2064	116972	84441	150120	1348	297573	650454	1485055
438	0,438	0,2064	116972	84441	204100	1833	297573	704919	1609404
438	0,438	0,2064	116972	84441	335547	3013	297573	837547	1912208

Tabla 83: Cálculo de costes totales a partir de costes de cada equipo para Acero + Biocut

Anexo de cálculo de la optimización

Inconel+Biocut									
Q (l/h)	Q (m3/h)	D (m)	Bomba	Compresor	Reactor	CC	Operarios	Coste Total (€)	Coste Total (€/m3)
1	0,001	0,01068	8305	84441	1889	33	297573	392241	392240881
1	0,001	0,0139	8305	84441	2448	42	297573	392810	392809632
1	0,001	0,01757	8305	84441	3121	54	297573	393494	393494290
1	0,001	0,02279	8305	84441	4145	72	297573	394536	394536133
1	0,001	0,02885	8305	84441	5435	94	297573	395848	395847977
1	0,001	0,03735	8305	84441	7431	128	297573	397878	397878470
1	0,001	0,04322	8305	84441	8940	154	297573	399414	399414129
1	0,001	0,05476	8305	84441	12231	211	297573	402762	402761860
1	0,001	0,06599	8305	84441	15860	274	297573	406453	406453442
1	0,001	0,08128	8305	84441	21509	371	297573	412200	412199952
1	0,001	0,10574	8305	84441	32346	558	297573	423224	423224167
1	0,001	0,13177	8305	84441	46491	803	297573	437613	437613057
1	0,001	0,15733	8305	84441	63208	1091	297573	454619	454618805
1	0,001	0,2064	8305	84441	103916	1794	297573	4960300	496030002
2	0,002	0,01068	8305	84441	3778	38	297573	394135	197067388
2	0,002	0,0139	8305	84441	4896	49	297573	395264	197632070
2	0,002	0,01757	8305	84441	6242	62	297573	396624	198311829
2	0,002	0,02279	8305	84441	8290	83	297573	398692	199346218
2	0,002	0,02885	8305	84441	10869	109	297573	401297	200648677
2	0,002	0,03735	8305	84441	14861	148	297573	405329	202664642
2	0,002	0,04322	8305	84441	17881	179	297573	408379	204189314
2	0,002	0,05476	8305	84441	24462	244	297573	415026	207513093
2	0,002	0,06599	8305	84441	31720	317	297573	422357	211178263
2	0,002	0,08128	8305	84441	43018	430	297573	433767	216883658
2	0,002	0,10574	8305	84441	64692	646	297573	455658	227828997
2	0,002	0,13177	8305	84441	92982	929	297573	484230	242114938
2	0,002	0,15733	8305	84441	126416	1263	297573	517998	258999015
2	0,002	0,2064	8305	84441	207833	2076	297573	600228	300113926

437	0,437	0,01068	116972	84441	27382	246	297573	526615	1205068
437	0,437	0,0139	116972	84441	35488	319	297573	534793	1223783
437	0,437	0,01757	116972	84441	45245	407	297573	544638	1246311
437	0,437	0,02279	116972	84441	60093	540	297573	559619	1280593
437	0,437	0,02885	116972	84441	78788	708	297573	578483	1323759
437	0,437	0,03735	116972	84441	107726	968	297573	607680	1390572
437	0,437	0,04322	116972	84441	129611	1165	297573	629762	1441103
437	0,437	0,05476	116972	84441	177320	1594	297573	677900	1551260
437	0,437	0,06599	116972	84441	229930	2067	297573	730983	1672731
437	0,437	0,08128	116972	84441	311826	2803	297573	813615	1861819
437	0,437	0,10574	116972	84441	468936	4215	297573	972137	2224569
437	0,437	0,13177	116972	84441	673997	6058	297573	1179041	2698034
437	0,437	0,15733	116972	84441	916351	8236	297573	1423574	3257606
437	0,437	0,2064	116972	84441	1506516	13540	297573	2019043	4620235
438	0,438	0,01068	116972	84441	27445	246	297573	526678	1202461
438	0,438	0,0139	116972	84441	35569	319	297573	534875	1221175
438	0,438	0,01757	116972	84441	45349	407	297573	544742	1243704
438	0,438	0,02279	116972	84441	60230	541	297573	559757	1277985
438	0,438	0,02885	116972	84441	78969	709	297573	578664	1321151
438	0,438	0,03735	116972	84441	107972	970	297573	607928	1387963
438	0,438	0,04322	116972	84441	129907	1167	297573	630060	1438494
438	0,438	0,05476	116972	84441	177726	1596	297573	678309	1548650
438	0,438	0,06599	116972	84441	230457	2070	297573	731512	1670120
438	0,438	0,08128	116972	84441	312539	2807	297573	814332	1859207
438	0,438	0,10574	116972	84441	470009	4221	297573	973216	2221954
438	0,438	0,13177	116972	84441	675539	6067	297573	1180592	2695415
438	0,438	0,15733	116972	84441	918448	8248	297573	1425683	3254983
438	0,438	0,2064	116972	84441	1509964	13560	297573	2022510	4617603

Tabla 84: Cálculo de costes totales a partir de costes de cada equipo para Inconel + Biocut

Anexo de cálculo de la optimización

Inconel+Fenol									
Q (l/h)	Q (m3/h)	D (m)	Bomba	Compresor	Reactor	CC	Operarios	Coste Total (€)	Coste Total (€/m3)
1	0,001	0,01068	8305	84441	29	56	297573	390404	390404248
1	0,001	0,0139	8305	84441	37	73	297573	390429	390429337
1	0,001	0,01757	8305	84441	47	93	297573	390460	390459538
1	0,001	0,02279	8305	84441	63	123	297573	390505	390505496
1	0,001	0,02885	8305	84441	82	161	297573	390563	390563365
1	0,001	0,03735	8305	84441	113	221	297573	390653	390652934
1	0,001	0,04322	8305	84441	136	266	297573	390721	390720675
1	0,001	0,05476	8305	84441	186	363	297573	390868	390868350
1	0,001	0,06599	8305	84441	241	471	297573	391031	391031194
1	0,001	0,08128	8305	84441	326	639	297573	391285	391284684
1	0,001	0,10574	8305	84441	491	961	297573	391771	391770986
1	0,001	0,13177	8305	84441	706	1381	297573	392406	392405710
1	0,001	0,15733	8305	84441	959	1877	297573	393156	393155869
1	0,001	0,2064	8305	84441	1577	3086	297573	394983	394982604
2	0,002	0,01068	8305	84441	57	67	297573	390444	195221847
2	0,002	0,0139	8305	84441	74	87	297573	390480	195240229
2	0,002	0,01757	8305	84441	95	110	297573	390525	195262358
2	0,002	0,02279	8305	84441	126	147	297573	390592	195296031
2	0,002	0,02885	8305	84441	165	192	297573	390677	195338431
2	0,002	0,03735	8305	84441	226	263	297573	390808	195404059
2	0,002	0,04322	8305	84441	271	317	297573	390907	195453692
2	0,002	0,05476	8305	84441	371	433	297573	391124	195561894
2	0,002	0,06599	8305	84441	481	562	297573	391362	195681209
2	0,002	0,08128	8305	84441	653	762	297573	391734	195866942
2	0,002	0,10574	8305	84441	982	1145	297573	392447	196223254
2	0,002	0,13177	8305	84441	1411	1646	297573	393377	196688316
2	0,002	0,15733	8305	84441	1919	2238	297573	394476	197237957
2	0,002	0,2064	8305	84441	3154	3679	297573	397153	198576403

437	0,437	0,01068	116972	84441	12526	1432	297573	512945	1173787
437	0,437	0,0139	116972	84441	16234	1856	297573	517077	1183242
437	0,437	0,01757	116972	84441	20698	2366	297573	522051	1194624
437	0,437	0,02279	116972	84441	27490	3143	297573	529620	1211944
437	0,437	0,02885	116972	84441	36043	4121	297573	539150	1233753
437	0,437	0,03735	116972	84441	49280	5634	297573	553901	1267508
437	0,437	0,04322	116972	84441	59292	6779	297573	565057	1293037
437	0,437	0,05476	116972	84441	81117	9275	297573	589378	1348691
437	0,437	0,06599	116972	84441	105184	12026	297573	616197	1410062
437	0,437	0,08128	116972	84441	142648	16310	297573	657944	1505593
437	0,437	0,10574	116972	84441	214520	24527	297573	738034	1688864
437	0,437	0,13177	116972	84441	308328	35252	297573	842567	1928070
437	0,437	0,15733	116972	84441	419196	47929	297573	966111	2210779
437	0,437	0,2064	116972	84441	689174	78796	297573	1266956	2899214
438	0,438	0,01068	116972	84441	12555	1435	297573	512976	1171179
438	0,438	0,0139	116972	84441	16271	1860	297573	517118	1180634
438	0,438	0,01757	116972	84441	20745	2371	297573	522103	1192016
438	0,438	0,02279	116972	84441	27553	3150	297573	529689	1209335
438	0,438	0,02885	116972	84441	36125	4129	297573	539241	1231143
438	0,438	0,03735	116972	84441	49393	5646	297573	554025	1264898
438	0,438	0,04322	116972	84441	59428	6793	297573	565207	1290427
438	0,438	0,05476	116972	84441	81303	9294	297573	589583	1346080
438	0,438	0,06599	116972	84441	105425	12051	297573	616462	1407448
438	0,438	0,08128	116972	84441	142975	16343	297573	658304	1502978
438	0,438	0,10574	116972	84441	215011	24578	297573	738575	1686244
438	0,438	0,13177	116972	84441	309033	35325	297573	843345	1925444
438	0,438	0,15733	116972	84441	420155	48027	297573	967169	2208147
438	0,438	0,2064	116972	84441	690751	78959	297573	1268696	2896565

Tabla 85: Cálculo de costes totales a partir de costes de cada equipo para Inconel + Fenol

3.6. Anexo de programación

Dado que existen dos grados de libertad en el sistema, es decir, existen dos variables de diseño (Q y D) que pueden tomar cada una de ellas varios valores se ha desarrollado un programa de optimización que permita seleccionar de todos esos valores posibles, cuáles son los que conducen a la planta óptima, es decir, a la planta con coste total mínimo. Por tanto una vez conocidos todos las expresiones desarrolladas en los distintos anexos llega el momento del diseño y desarrollo de la aplicación informática que permita automatizar todos los cálculos hasta el momento realizados.

Como se ha comentado en la “*Memoria Descriptiva*” se desarrolla bajo el entorno Windows, muy común en el día a día, y mediante un lenguaje de programación bastante habitual en el desarrollo de aplicaciones para dicho entorno, como es el VisualBasic .NET.

En este apartado se pretende mostrar el proceso de adaptación de todos los cálculos al lenguaje de programación, así como los límites que se han establecido para algunos de los cálculos, y que han sido desarrollados en los respectivos anexos.

Partiendo del diseño externo de la aplicación, se representan como variables de entrada aquellas que resultaron elegidas como variables de diseño en el proceso de selección de variables (diámetros, coeficiente de exceso de aire, concentración, caudal másico). Como resultados se mostrarán los más relevantes de cada una de las unidades de cara a su evaluación por parte del Ingeniero en una primera estimación de dichos resultados (coeficiente global de transferencia de calor, calor absorbido/cedido, longitud reactor e intercambiador de calor, etc.).

Como puede observarse en la Fig. 39 en la parte izquierda de la pantalla se encuentran las variables de entrada, a introducir por el usuario y que son: el caudal másico que se va a tratar, la concentración de la sustancia a eliminar presente en la misma, el exceso de aire que se empleará en la reacción, la conversión que se desea alcanzar(fijada por los límites del vertido). Además, se han añadido dos cuadros

contenedores, o “*groupbox*”, donde se han incluido controles para realizar la selección del compuesto que se desea eliminar, y el material a emplear en la instalación. Y para comenzar a ejecutar el programa hay que dar un valor de partida.

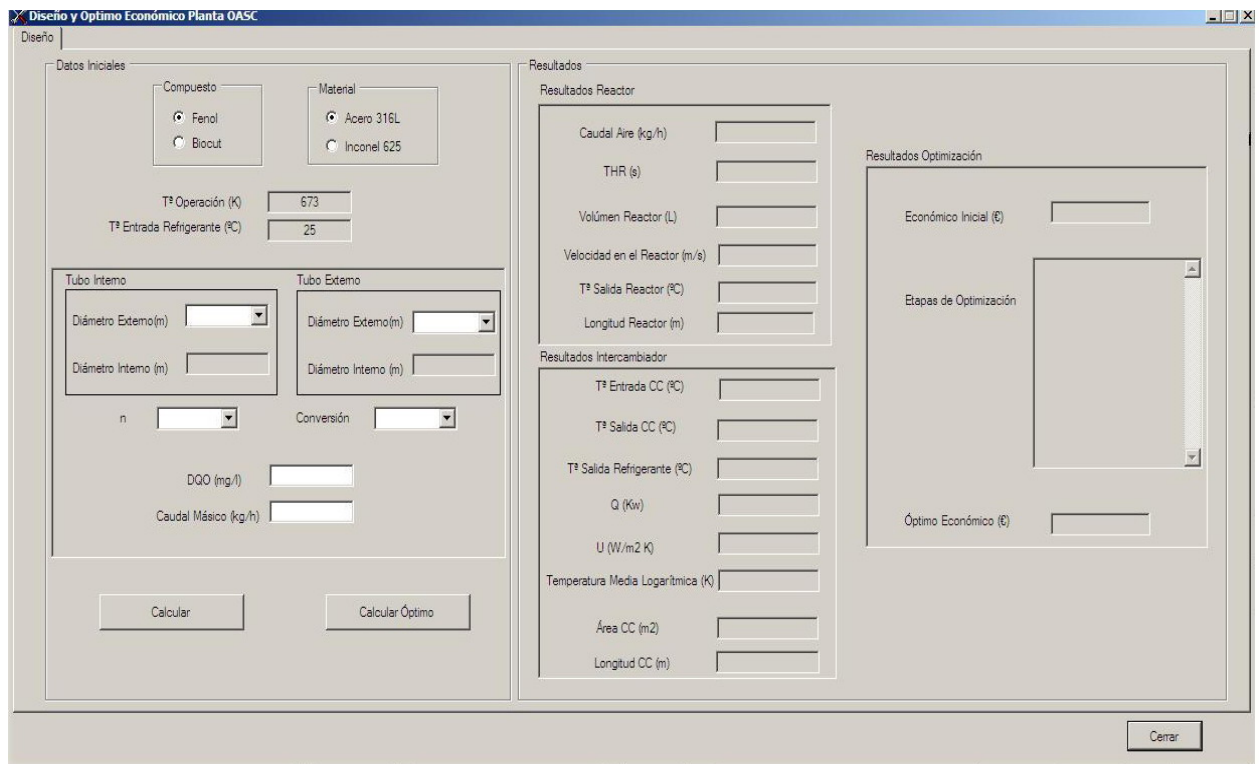


Fig. 39: Pantalla del programa

En la parte derecha de la pantalla de la aplicación se pueden encontrar todos los resultados que se mostrarán tras la resolución de los cálculos correspondientes a cada una de las unidades, así como el óptimo económico que presenta un cuadro de texto donde se visualizarán las etapas de cálculo de la optimización.

Tras esta breve introducción y descripción de la parte externa de la aplicación, se procederá a explicar los pasos más importantes en la conversión de los cálculos al lenguaje de programación Visual Basic, para lo que se seguirá el orden que se ha establecido a la hora de presentar los resultados obtenidos en los distintos anexos.

Por ello el primer paso será la obtención del volumen del reactor tubular, para lo que será necesario definir todas las variables que van a intervenir en dichos cálculos.

<pre>Dim Ca1 As Double Dim Ca2 As Double Dim Fresiduo As Double Dim K As Double Dim Media As Double Dim incremento As Double Dim sumatorio As Double Dim Xa As Double Dim Volumen As Double Dim A As Double Dim VelocidadReaccion1 As Double Dim VelocidadReaccion2 As Double Dim CpResiduo As Double Dim CpAire As Double Dim Te As Double Dim Ts As Double Dim TAux As Double Dim Entalpia As Integer Dim RoAgua As Double Dim R As Double Dim SumAux As Double</pre>

Tabla 86: Variables para el cálculo del reactor

La clasificación de las variables se puede observar en la parte de la derecha de la columna, y se corresponde al tipo de variables que va a manejar el programa como se puede comprobar en la Fig. 40, donde se muestran algunos tipos de variables y los intervalos de valores que engloban y la memoria que se necesita para su empleo.

Nombre del tipo de datos	Asignación de memoria	Intervalo de valores
Decimal (reales de gran precisión)	16 bytes	0 a +/- 79.228.162.514.264.337.593.543.950.335 sin separador decimal 0 a +/- 7,9228162514264337593543950335 con 28 posiciones a la derecha del signo decimal
Double (reales con precisión doble)	8 bytes	-1,79769313486231570E+308 a -4,94065645841246544E-324 para valores negativos; 4,94065645841246544E-324 a 1,79769313486231570E+308 para valores positivos
Integer (entero)	4 bytes	-2.147.483.648 a 2.147.483.647

Fig.40: Tipos de variables en VisualBasic .NET

Una vez definidas todas las variables, es necesario iniciar algunas de ellas, evitando así que se produzcan problemas cuando comiencen los cálculos. Estos valores no tienen porqué coincidir con los que el usuario va a introducir a la hora de realizar los cálculos.

```

' Inicialización de las Variables
  Cal = Ca0
  incremento = 0.05
  sumatorio = 0
  Xa = 0
  Te = Te0

  If Comp = "Fenol" Then
    A = 21.87761624
    Entalpia = 2440
    Ea = 39200
  ElseIf Comp = "Biocut" Then
    A = 3207
    Entalpia = 5960
    Ea = 62200
  End If
  ROAgua = 1
  R = 8.314
    
```

Tabla 87: Valores iniciales de variables fijas

Mediante un bucle *If* se permite a la aplicación tomar los valores del factor de frecuencia (A), energía de activación (Ea) y entalpía en función de qué compuesto se haya seleccionado para realizar los cálculos. Si el usuario marca en la pantalla la opción "Fenol" el programa entrará en la primera parte del bucle tomando los valores correspondientes. Si no es así, y se ha marcado "Biocut" el programa entrará en la segunda parte del bucle iniciada por la orden *ElseIf*. El programa se puede ampliar/modificar con facilidad para cualquier otro tipo de residuos; siempre y cuando se conozcan los parámetros cinéticos y termodinámicos en el proceso OASC

Una vez establecidos los valores iniciales, se comienza a desarrollar el algoritmo correspondiente a la obtención del volumen del reactor, para lo que se crea un bucle del tipo *While* que permite realizar las operaciones en él hasta que se alcance la condición impuesta para ello, en este caso que la conversión (X_a) sea inferior al valor elegido en la pantalla por el usuario mediante el control "combobox" llamado conversión. Una vez que se alcanza dicho valor, el bucle se para y deja de realizar los cálculos. En cada paso del bucle se obtienen dos valores: el correspondiente al paso de cálculo y al inmediatamente posterior permitiendo de esta manera disponer de dos valores y poder realizar los promedios necesarios


```

'Calculo del Volumen

While Xa < XaFinal

    'calculo Cai
    Ca1 = Math.Round(Ca0 * (1 - Xa), 0)
    Fresiduo = Ca1 * Fa0 / RoAgua
    Faire = Math.Round(Fresiduo * FuncionCompuesto(Comp), 9)
    K = Math.Round(A * Math.Exp((0 - Ea) / (R * Te)), 9)
    VelocidadReaccion1 = Math.Round(K * Ca1, 9)
    CpResiduo = Math.Round(AjusteAgua(Te), 9)
    CpAire = Math.Round(AjusteAire(Te), 9)

    If Xa >= 0.1 Then
        Media = Math.Round((1 / VelocidadReaccion1 + 1 /
VelocidadReaccion2) / 2, 9)
        sumatorio = Math.Round(sumatorio + incremento * Media, 9)
        SumAux = sumatorio

    End If

    'Incremento Xa
    If Xa < 0.8 Then
        incremento = 0.05
    Else
        incremento = 0.01
    End If

    Ts = Math.Round(Te - (((0 - Entalpia) * Fresiduo * incremento) /
(((Fa0 * CpResiduo) + (Faire * CpAire))))) , 9)
    Te = Ts
    TAux = Te
    Xa = Math.Round(Xa + incremento, 2)

    'calculo cai+1
    Ca2 = Math.Round(Ca0 * (1 - Xa), 0)
    Fresiduo = Ca2 * Fa0 / RoAgua
    Faire = Math.Round(Fresiduo * FuncionCompuesto(Comp), 9)
    K = Math.Round(A * Math.Exp((0 - Ea) / (R * Te)), 9)
    VelocidadReaccion2 = Math.Round(K * Ca2, 9)
    CpResiduo = Math.Round(AjusteAgua(Te), 9)
    CpAire = Math.Round(AjusteAire(Te), 9)

    'Incremento Xa
    If Xa < 0.8 Then
        incremento = 0.05
    Else
        incremento = 0.01
    End If

    Ts = Math.Round(Te - (((0 - Entalpia) * Fresiduo * incremento) /
(((Fa0 * CpResiduo) + (Faire * CpAire))))) , 9)
    Te = Ts
    Media = Math.Round((1 / VelocidadReaccion1 + 1 /
VelocidadReaccion2) / 2, 9)
    sumatorio = Math.Round(sumatorio + incremento * Media, 9)
    Xa = Math.Round(Xa + incremento, 2)

End While
Volumen = sumatorio * Fa0 * 1000000 / 3600

'valores devueltos
vol = Volumen
IFinal = TAux

End Sub

```

Tabla 88: Algoritmo de cálculo para la obtención del volumen del reactor

Todos los resultados han sido redondeados con la instrucción *Math.Round* a nueve decimales. Esto se ha mantenido en toda la programación realizada, variando el número de decimales en función de la exactitud buscada. Una vez finalizado el bucle *While* y mediante la variable *Sumatorio*, junto con el cambio de unidades necesario y el valor de caudal empleado se calcula finalmente el valor del volumen.

Estos cálculos se realizan en un *módulo*, por lo que para poder presentarlos en el formulario correspondiente a la pantalla debe ser llamado desde el *formulario principal*, es decir el formulario identifica qué valores ha suministrado el usuario, se los pasa al modulo y éste devuelve los resultados pedidos que luego son mostrados en pantalla. Para ello todo el procedimiento de cálculo debe ser incluido en el botón *calcular*.

Antes se ha incluido el cálculo de la fracción másica para que, a la hora de introducir los valores de concentración, el usuario sepa si se encuentra dentro del rango establecido para las dos especies a tratar, si el usuario introduce un valor superior a los límites establecidos saldrá un mensaje en pantalla advirtiéndolo de ello.

```
If Compuesto = "Fenol" Then
    FraccionMasica = CaInicial / 10000
    If FraccionMasica > 150000 Then
        MsgBox("La Fracción Másica No Puede Ser Mayor De 150.000
mg/l Para El Fenol")
    Else
        VolumenReactor(FaInicial, CaInicial, Compuesto, Ea,
TIInicial, TFinal, vol, Faire)
        ro = (AjusteDensidad(TFinal) + AjusteDensidad(TIInicial)) /
2
        Velocidad = 4 * FaInicial / (ro * Math.PI * DInicial *
DInicial) * (1 / 3600)
        THR = vol * CaInicial / FaInicial * 0.000001 * 3600
    End If
Else
    FraccionMasica = CaInicial / 10000 * (1 / 2.264)

    If FraccionMasica > 350 Then
        MsgBox("La Fracción Másica No Puede Ser Mayor De 350 mg/l
Para El Biocut")
    Else
        VolumenReactor(FaInicial, CaInicial, Compuesto, Ea,
TIInicial, TFinal, vol, Faire)
        ro = (AjusteDensidad(TFinal) + AjusteDensidad(TIInicial)) /
2
        Velocidad = 4 * FaInicial / (ro * Math.PI * DInicial *
DInicial) * (1 / 3600)
        THR = vol * CaInicial / FaInicial * 0.000001 * 3600
    End If
End If
```

Tabla 89: Llamada al cálculo del volumen del reactor en el módulo

Se han empleado funciones auxiliares que permiten el cálculo de las capacidades caloríficas de aire y agua, así como el cálculo necesario para la obtención del caudal de aire a partir del caudal inicial y la densidad para su empleo en el cálculo de la velocidad dentro del reactor, consiguiendo simplificar de esta manera las expresiones de cálculo.

```
Public Function FuncionCompuesto(ByVal compuesto As String) As Double
    Dim aux As Double
    Dim Exc As Double

    exc = CDB1(frmPrincipal.cboExceso.Text)
    If compuesto = "Fenol" Then
        aux = 1 / 94 * 7 * 32 * 100 / 21 * Exc
    ElseIf compuesto = "Biocut" Then
        aux = Exc
    Else
        aux = 0
    End If
    FuncionCompuesto = Math.Round(aux, 9)
End Function

Public Function AjusteAgua(ByVal Temp As Double) As Double
    Dim aux As Double

    aux = 0.00000000000212216687963354 * Math.Pow(Temp, 6)
    aux = aux - 0.0000000102339795951759 * Math.Pow(Temp, 5)
    aux = aux + 0.0000205397216201822 * Math.Pow(Temp, 4)
    aux = aux - 0.0219609077525297 * Math.Pow(Temp, 3)
    aux = aux + 13.1931930822798 * Math.Pow(Temp, 2)
    aux = aux - 4222.68604322594 * Temp
    aux = aux + 562580.56335989

    AjusteAgua = Math.Round(aux, 9)

End Function

Public Function AjusteAire(ByVal Temp As Double) As Double
    Dim aux As Double

    aux = 4.26073228E-17 * Math.Pow(Temp, 6)
    aux = aux - 0.00000000000017030698435831 * Math.Pow(Temp, 5)
    aux = aux + 0.000000000282852643977507 * Math.Pow(Temp, 4)
    aux = aux - 0.000000251308383822454 * Math.Pow(Temp, 3)
    aux = aux + 0.00012719697826253 * Math.Pow(Temp, 2)
    aux = aux - 0.0351287286866558 * Temp
    aux = aux + 5.28858572925601

    AjusteAire = Math.Round(aux, 9)

End Function

Public Function AjusteDensidad(ByVal Temp As Double) As Double
    Dim aux As Double

    aux = 0.0000000000401861043009691 * Math.Pow(Temp, 6)
    aux = aux - 0.000000191460298230779 * Math.Pow(Temp, 5)
    aux = aux + 0.000379477792953638 * Math.Pow(Temp, 4)
    aux = aux - 0.400509369528836 * Math.Pow(Temp, 3)
    aux = aux + 237.404317474267 * Math.Pow(Temp, 2)
    aux = aux - 74938.0352523147 * Temp
    aux = aux + 9841604.42590838

    AjusteDensidad = Math.Round(aux, 9)

End Function
```

Tabla 90: Funciones auxiliares empleadas en el cálculo del volumen

Anexo de programación

Tras el desarrollo del código para el cálculo del volumen del reactor, se continuará desarrollando el necesario para el intercambiador de calor. Al igual que se hizo en el “*Anexo de cálculo del intercambiador de calor*”, se han dividido los cálculos en tres tramos y se ha seguido el algoritmo de cálculo establecido en dicho anexo. A continuación, se va a representar el código correspondiente a la parte del *módulo* donde se establecen dichos cálculos y, a continuación, se hará lo mismo con la parte del *formulario principal* que realiza la llamada a dichos cálculos.

```
PI = Math.Round(Math.PI, 14)
CpF = CpFrio
CpC = CpCal
Tprom1 = (T1 + T2) / 2
Tprom2 = (T3 + T4) / 2

If (Material = "Acero") And (Compuesto = "Fenol") Then
    KMaterialCal = Math.Round(0.0000000188413338536886 *
Math.Pow(Tprom1, 3) - 0.0000400416287238198 * Math.Pow(Tprom1, 2) +
0.0415938163999887 * Tprom1 + 3.62312995966895, 2)
    KMaterialFrio = Math.Round(0.0000000188413338536886 *
Math.Pow(Tprom2, 3) - 0.0000400416287238198 * Math.Pow(Tprom2, 2) +
0.0415938163999887 * Tprom2 + 3.62312995966895, 2)

    ElseIf (Material = "Inconel") And (Compuesto = "Fenol") Then
        KMaterialCal = Math.Round(0.0201706441855506 * Tprom1 +
9.396817484868, 2)
        KMaterialFrio = Math.Round(0.0201706441855506 * Tprom2 +
9.396817484868, 2)

    ElseIf (Material = "Acero") And (Compuesto = "Biocut") Then
        KMaterialCal = Math.Round(0.0000000188413338536886 *
Math.Pow(Tprom1, 3) - 0.0000400416287238198 * Math.Pow(Tprom1, 2) +
0.0415938163999887 * Tprom1 + 3.62312995966895, 2)
        KMaterialFrio = Math.Round(0.0000000188413338536886 *
Math.Pow(Tprom2, 3) - 0.0000400416287238198 * Math.Pow(Tprom2, 2) +
0.0415938163999887 * Tprom2 + 3.62312995966895, 2)

    ElseIf (Material = "Inconel") And (Compuesto = "Biocut") Then
        KMaterialCal = Math.Round(0.0201706441855506 * Tprom1 +
9.396817484868, 2)
        KMaterialFrio = Math.Round(0.0201706441855506 * Tprom2 +
9.396817484868, 2)
    End If

S0 = Math.Round(PI * (D0interno * D0interno) / 4, 9)
S1 = Math.Round(PI * (d0externo * d0externo / 4 - D0interno *
D0interno / 4), 9)
Deq = Math.Round(d0externo - D0interno, 9)
```

Tabla 91: Bucle de selección de la conductividad térmica del material

```
I = 0

While I < 50
    Q = WCal * CpC * (T1 - T2) * 1000 / 3600
    CpF = Math.Round(0.000000000000198085451641141 * Math.Pow(Tprom2,
6) - 0.000000000533248862155329 * Math.Pow(Tprom2, 5) +
0.000000591910393431401 * Math.Pow(Tprom2, 4) - 0.00034657017843829 *
Math.Pow(Tprom2, 3) + 0.112852107079162 * Math.Pow(Tprom2, 2) -
19.3724878230126 * Tprom2 + 1373.5738983946, 2)
    T4 = T3 + Q / (Wfrio * CpF) * 3600 / 1000
    Tprom2 = (T3 + T4) / 2

    I = I + 1
```

Tabla 92: Bucle de cálculo de T₄

En la Tabla 91 se encuentra el código desarrollado para permitir conocer la conductividad térmica del material seleccionado, dicho cálculo dependerá de la disposición geométrica de los tubos, pues al interno le corresponde el valor llamado “*KMaterialCal*” y si es el tubo externo le corresponde el valor llamado “*KMaterialFrio*”. Además están incluidos los cálculos de las respectivas áreas.

En la Tabla 92 se presenta el bucle “*While*” que permite recalcularse el valor de T₄. Se ha establecido que este bucle se repita cincuenta veces, pues se ha comprobado que ese número de repeticiones son suficientes para obtener un resultado estable de T₄. Con el nuevo valor de temperatura se recalcularán todas las propiedades termofísicas de las corrientes y materiales.

A continuación, en las Tablas 93, 94 y 95, se presenta el código correspondiente a los cálculos del intercambiador que se encuentra en el módulo. Puede observarse como, además de las propiedades termo-físicas, también se calculan en cada uno de los tramos el coeficiente global de transferencia de calor (U), el área de intercambio (A) y la longitud total del tubo (L).

```

If Tramo = 3 Then
    TempLog = ((T2 - T4) - (T1 - T3)) / Math.Log((T2 - T4) / (T1 -
T3))
    RoCal = Math.Round(-0.0000000000133931733477653 * Math.Pow(Tprom1,
6) + 0.0000000369844031300495 * Math.Pow(Tprom1, 5) - 0.0000420626741913888 *
Math.Pow(Tprom1, 4) + 0.0252064170766029 * Math.Pow(Tprom1, 3) -
8.3930461744187 * Math.Pow(Tprom1, 2) + 1471.66884631996 * Tprom1 -
105102.493643485, 2)
    RoFrio = Math.Round(-0.0000000000133931733477653 *
Math.Pow(Tprom2, 6) + 0.0000000369844031300495 * Math.Pow(Tprom2, 5) -
0.0000420626741913888 * Math.Pow(Tprom2, 4) + 0.0252064170766029 *
Math.Pow(Tprom2, 3) - 8.3930461744187 * Math.Pow(Tprom2, 2) + 1471.66884631996
* Tprom2 - 105102.493643485, 2)
    KFluidoFrio = Math.Round(-0.00000000000000059438216588968 *
Math.Pow(Tprom2, 6) + 0.0000000000178029732338898 * Math.Pow(Tprom2, 5) -
0.00000000223078094103586 * Math.Pow(Tprom2, 4) + 0.00000149049358713203 *
Math.Pow(Tprom2, 3) - 0.000562659675927417 * Math.Pow(Tprom2, 2) +
0.114514044790936 * Tprom2 - 9.16084260782536, 2)
    KFluidoCal = Math.Round(-0.00000000000000059438216588968 *
Math.Pow(Tprom1, 6) + 0.0000000000178029732338898 * Math.Pow(Tprom1, 5) -
0.00000000223078094103586 * Math.Pow(Tprom1, 4) + 0.00000149049358713203 *
Math.Pow(Tprom1, 3) - 0.000562659675927417 * Math.Pow(Tprom1, 2) +
0.114514044790936 * Tprom1 - 9.16084260782536, 2)
    MuCal = 5.335858058518E-19 * Math.Pow(Tprom1, 6) -
0.00000000000000214546969617692 * Math.Pow(Tprom1, 5) +
0.00000000000354033319008666 * Math.Pow(Tprom1, 4) - 0.00000000306584992096756
* Math.Pow(Tprom1, 3) + 0.00000146929697287399 * Math.Pow(Tprom1, 2) -
0.000370164551775677 * Tprom1 + 0.0385587102187432
    MuFrio = 5.335858058518E-19 * Math.Pow(Tprom2, 6) -
0.00000000000000214546969617692 * Math.Pow(Tprom2, 5) +
0.00000000000354033319008666 * Math.Pow(Tprom2, 4) - 0.00000000306584992096756
* Math.Pow(Tprom2, 3) + 0.00000146929697287399 * Math.Pow(Tprom2, 2) -
0.000370164551775677 * Tprom2 + 0.0385587102187432
    CpF = Math.Round(0.00000000000198085451641141 * Math.Pow(Tprom2,
6) - 0.000000000533248862155329 * Math.Pow(Tprom2, 5) +
0.000000591910393431401 * Math.Pow(Tprom2, 4) - 0.00034657017843829 *
Math.Pow(Tprom2, 3) + 0.112852107079162 * Math.Pow(Tprom2, 2) -
19.3724878230126 * Tprom2 + 1373.5738983946, 2)
    CpC = Math.Round(0.00000000000198085451641141 * Math.Pow(Tprom1,
6) - 0.000000000533248862155329 * Math.Pow(Tprom1, 5) +
0.000000591910393431401 * Math.Pow(Tprom1, 4) - 0.00034657017843829 *
Math.Pow(Tprom1, 3) + 0.112852107079162 * Math.Pow(Tprom1, 2) -
19.3724878230126 * Tprom1 + 1373.5738983946, 2)
    QvCal = WCal / RoCal
    QvFrio = Wfrio / RoFrio
    Vcal = QvCal / S0 * 1 / 3600
    Vfrio = QvFrio / S1 * 1 / 3600
    PrCal = MuCal * CpC / KFluidoCal * 1000
    PrFrio = MuFrio * CpF / KFluidoFrio * 1000
    ReFrio = Vfrio * RoFrio * Deq / MuFrio
    ReCal = Vcal * RoCal * D0interno / MuCal
    hce = 0.0225 * KMaterialFrio / Deq * Math.Pow(ReFrio, 0.8) *
Math.Pow(PrFrio, 0.4)
    hci = 0.024 * KMaterialCal / D0interno * Math.Pow(ReCal, 0.8) *
Math.Pow(PrCal, 0.3)
    DiamLog = (Dlinterno - D0interno) / Math.Log(Dlinterno /
D0interno)
    term1 = 1 / hce
    term2 = Espesor * Dlinterno / (KMaterialCal * DiamLog)
    term3 = D0interno / (hce * Dlinterno)
    U = 1 / (term1 + term2 + term3)
    Area = Q / (U * TempLog)
    L = Area / (PI * D0interno)

```

Tabla 93: Código para tramo subcrítico del intercambiador


```

ElseIf Tramo = 2 Then
    TempLog = ((T2 - T4) - (T1 - T3)) / Math.Log((T2 - T4) / (T1 -
T3))
    RoCal = Math.Round(-0.0000000000133931733477653 * Math.Pow(Tprom1,
6) + 0.0000000369844031300495 * Math.Pow(Tprom1, 5) - 0.0000420626741913888 *
Math.Pow(Tprom1, 4) + 0.0252064170766029 * Math.Pow(Tprom1, 3) -
8.3930461744187 * Math.Pow(Tprom1, 2) + 1471.66884631996 * Tprom1 -
105102.493643485, 2)
    RoFrio = Math.Round(-0.0000000000133931733477653 *
Math.Pow(Tprom2, 6) + 0.0000000369844031300495 * Math.Pow(Tprom2, 5) -
0.0000420626741913888 * Math.Pow(Tprom2, 4) + 0.0252064170766029 *
Math.Pow(Tprom2, 3) - 8.3930461744187 * Math.Pow(Tprom2, 2) + 1471.66884631996
* Tprom2 - 105102.493643485, 2)
    KFluidoFrio = Math.Round(-0.00000000000000059438216588968 *
Math.Pow(Tprom2, 6) + 0.0000000000178029732338898 * Math.Pow(Tprom2, 5) -
0.00000000223078094103586 * Math.Pow(Tprom2, 4) + 0.00000149049358713203 *
Math.Pow(Tprom2, 3) - 0.000562659675927417 * Math.Pow(Tprom2, 2) +
0.114514044790936 * Tprom2 - 9.16084260782536, 2)
    KFluidoCal = Math.Round(-0.00000000000000059438216588968 *
Math.Pow(Tprom1, 6) + 0.0000000000178029732338898 * Math.Pow(Tprom1, 5) -
0.00000000223078094103586 * Math.Pow(Tprom1, 4) + 0.00000149049358713203 *
Math.Pow(Tprom1, 3) - 0.000562659675927417 * Math.Pow(Tprom1, 2) +
0.114514044790936 * Tprom1 - 9.16084260782536, 2)
    MuCal = 5.335858058518E-19 * Math.Pow(Tprom1, 6) -
0.00000000000000214546969617692 * Math.Pow(Tprom1, 5) +
0.000000000000354033319008666 * Math.Pow(Tprom1, 4) - 0.00000000306584992096756
* Math.Pow(Tprom1, 3) + 0.00000146929697287399 * Math.Pow(Tprom1, 2) -
0.000370164551775677 * Tprom1 + 0.0385587102187432
    MuFrio = 5.335858058518E-19 * Math.Pow(Tprom2, 6) -
0.00000000000000214546969617692 * Math.Pow(Tprom2, 5) +
0.000000000000354033319008666 * Math.Pow(Tprom2, 4) - 0.00000000306584992096756
* Math.Pow(Tprom2, 3) + 0.00000146929697287399 * Math.Pow(Tprom2, 2) -
0.000370164551775677 * Tprom2 + 0.0385587102187432
    CpF = Math.Round(0.000000000000198085451641141 * Math.Pow(Tprom2,
6) - 0.000000000533248862155329 * Math.Pow(Tprom2, 5) +
0.000000591910393431401 * Math.Pow(Tprom2, 4) - 0.00034657017843829 *
Math.Pow(Tprom2, 3) + 0.112852107079162 * Math.Pow(Tprom2, 2) -
19.3724878230126 * Tprom2 + 1373.5738983946, 2)
    CpC = Math.Round(0.000000000000198085451641141 * Math.Pow(Tprom1,
6) - 0.000000000533248862155329 * Math.Pow(Tprom1, 5) +
0.000000591910393431401 * Math.Pow(Tprom1, 4) - 0.00034657017843829 *
Math.Pow(Tprom1, 3) + 0.112852107079162 * Math.Pow(Tprom1, 2) -
19.3724878230126 * Tprom1 + 1373.5738983946, 2)
    QvCal = WCal / RoCal
    QvFrio = Wfrio / RoFrio
    Vcal = QvCal / S0 * 1 / 3600
    Vfrio = QvFrio / S1 * 1 / 3600
    PrCal = MuCal * CpC / KFluidoCal * 1000
    PrFrio = MuFrio * CpF / KFluidoFrio * 1000
    ReFrio = Vfrio * RoFrio * Deq / MuFrio
    ReCal = Vcal * RoCal * D0interno / MuCal
    hce = 0.0225 * KMaterialFrio / Deq * Math.Pow(ReFrio, 0.8) *
Math.Pow(PrFrio, 0.4)
    hci = 0.024 * KMaterialCal / D0interno * Math.Pow(ReCal, 0.8) *
Math.Pow(PrCal, 0.3)
    DiamLog = (Dlinterno - D0interno) / Math.Log(Dlinterno /
D0interno)
    term1 = 1 / hce
    term2 = Espesor * Dlinterno / (KMaterialCal * DiamLog)
    term3 = D0interno / (hci * Dlinterno)
    U = 1 / (term1 + term2 + term3)
    Area = Q / (U * TempLog)
    L = Area / (PI * D0interno)

```

Tabla 94: Código para el cálculo del tramo de transición (continuación)


```

ElseIf Tramo = 1 Then
    TempLog = Math.Round(((T2 - T4) - (T1 - T3)) / Math.Log((T2 - T4) / (T1 - T3)), 2)
    RoCal = Math.Round(0.000000000401861043009691 * Math.Pow(Tprom1, 6) - 0.00000191460298230779 * Math.Pow(Tprom1, 5) + 0.000379477792953638 * Math.Pow(Tprom1, 4) - 0.400509369528836 * Math.Pow(Tprom1, 3) + 237.404317474267 * Math.Pow(Tprom1, 2) - 74938.0352523147 * Tprom1 + 9841604.42590838, 1)
    RoFrio = Math.Round(-0.000000000133931733477653 * Math.Pow(Tprom2, 6) + 0.000000369844031300495 * Math.Pow(Tprom2, 5) - 0.0000420626741913888 * Math.Pow(Tprom2, 4) + 0.0252064170766029 * Math.Pow(Tprom2, 3) - 8.3930461744187 * Math.Pow(Tprom2, 2) + 1471.66884631996 * Tprom2 - 105102.493643485, 1)
    KFluidoFrio = Math.Round(-0.0000000000000059438216588968 * Math.Pow(Tprom2, 6) + 0.0000000000178029732338898 * Math.Pow(Tprom2, 5) - 0.0000000223078094103586 * Math.Pow(Tprom2, 4) + 0.00000149049358713203 * Math.Pow(Tprom2, 3) - 0.000562659675927417 * Math.Pow(Tprom2, 2) + 0.114514044790936 * Tprom2 - 9.16084260782536, 2)
    KFluidoCal = Math.Round(0.000000000000121476736940579 * Math.Pow(Tprom1, 6) - 0.000000000576592392563284 * Math.Pow(Tprom1, 5) + 0.0000113834212165749 * Math.Pow(Tprom1, 4) - 0.00119649962009207 * Math.Pow(Tprom1, 3) + 0.706173799020872 * Math.Pow(Tprom1, 2) - 221.895102292884 * Tprom1 + 29001.2157203792, 2)
    MuCal = 5.335858058518E-19 * Math.Pow(Tprom1, 6) - 0.0000000000000214546969617692 * Math.Pow(Tprom1, 5) + 0.00000000000354033319008666 * Math.Pow(Tprom1, 4) - 0.00000000306584992096756 * Math.Pow(Tprom1, 3) + 0.00000146929697287399 * Math.Pow(Tprom1, 2) - 0.000370164551775677 * Tprom1 + 0.0385587102187432
    MuFrio = 5.335858058518E-19 * Math.Pow(Tprom2, 6) - 0.0000000000000214546969617692 * Math.Pow(Tprom2, 5) + 0.00000000000354033319008666 * Math.Pow(Tprom2, 4) - 0.00000000306584992096756 * Math.Pow(Tprom2, 3) + 0.00000146929697287399 * Math.Pow(Tprom2, 2) - 0.000370164551775677 * Tprom2 + 0.0385587102187432
    CpF = Math.Round(0.00000000000198085451641141 * Math.Pow(Tprom2, 6) - 0.000000000533248862155329 * Math.Pow(Tprom2, 5) + 0.000000591910393431401 * Math.Pow(Tprom2, 4) - 0.00034657017843829 * Math.Pow(Tprom2, 3) + 0.112852107079162 * Math.Pow(Tprom2, 2) - 19.3724878230126 * Tprom2 + 1373.5738983946, 2)
    CpC = Math.Round(0.00000000000212216687963354 * Math.Pow(Tprom1, 6) - 0.0000000102339795951759 * Math.Pow(Tprom1, 5) + 0.0000205397216201822 * Math.Pow(Tprom1, 4) - 0.0219609077525297 * Math.Pow(Tprom1, 3) + 13.1931930822798 * Math.Pow(Tprom1, 2) - 4222.68604322594 * Tprom1 + 562580.56335989, 2)
    QvCal = WCal / RoCal
    QvFrio = Wfrio / RoFrio
    Vcal = QvCal / S0 * 1 / 3600
    Vfrio = QvFrio / S1 * 1 / 3600
    PrCal = MuCal * CpC / KFluidoCal * 1000
    PrFrio = MuFrio * CpF / KFluidoFrio * 1000
    ReFrio = Vfrio * RoFrio * Deq / MuFrio
    ReCal = Vcal * RoCal * D0interno / MuCal
    hce = 0.0225 * KMaterialFrio / Deq * Math.Pow(ReFrio, 0.8) * Math.Pow(PrFrio, 0.4)
    hci = 0.024 * KMaterialCal / D0interno * Math.Pow(ReCal, 0.8) * Math.Pow(PrCal, 0.3)
    DiamLog = (Dlinterno - D0interno) / Math.Log(Dlinterno / D0interno)
    term1 = 1 / hce
    term2 = Espesor * Dlinterno / (KMaterialCal * DiamLog)
    term3 = D0interno / (hci * Dlinterno)
    U = 1 / (term1 + term2 + term3)
    Area = Q / (U * TempLog)
    L = Area / (PI * D0interno)

```

Tabla 95: Código para el cálculo del tramo supercrítico (continuación)

Anexo de programación

La llamada debe realizarse desde el *formulario principal* para que tengan lugar todos estos cálculos y está incluida, al igual que en el caso del reactor, dentro del botón “*Calcular*” que se encuentra en dicho formulario. De esta forma, una vez dados todos los datos iniciales, al pulsar dicho botón tendrán lugar todos los cálculos

La llamada, al igual que los cálculos, se encuentra dividida en los tres tramos. Esto permite calcular las correspondientes propiedades termofísicas de cada tramo sin tener que generalizarlas para toda la aplicación. Además, como se hizo en el “*Anexo de cálculo del intercambiador de calor*”, ha sido necesario fijar las temperaturas de entrada y salida de refrigerante y efluente. Si esto no se hubiese realizado podría producirse un bucle infinito, es decir, no se obtendría solución alguna al permanecer el programa realizando los mismos cálculos. También se ha variado el orden de cálculo, que se ha establecido desde el tramo subcrítico hasta el tramo inicial o supercrítico (ver anexo correspondiente). Todo esto se puede observar en las tablas 96 y 97.

```

'cambiador de calor tramo 3
    T4 = 445
    T1 = 601
    T2 = 473
    T3 = 298
    Tprom1 = (T1 + T2) / 2
    Tprom2 = (T3 + T4) / 2
    CpFrio = Math.Round(0.000000000000198085451641141 *
Math.Pow(Tprom2, 6) - 0.000000000533248862155329 * Math.Pow(Tprom2, 5) +
0.000000591910393431401 * Math.Pow(Tprom2, 4) - 0.00034657017843829 *
Math.Pow(Tprom2, 3) + 0.112852107079162 * Math.Pow(Tprom2, 2) -
19.3724878230126 * Tprom2 + 1373.5738983946, 2)
    CpCal = Math.Round(0.000000000000198085451641141 *
Math.Pow(Tprom1, 6) - 0.000000000533248862155329 * Math.Pow(Tprom1, 5) +
0.000000591910393431401 * Math.Pow(Tprom1, 4) - 0.00034657017843829 *
Math.Pow(Tprom1, 3) + 0.112852107079162 * Math.Pow(Tprom1, 2) -
19.3724878230126 * Tprom1 + 1373.5738983946, 2)
    Area3 = 0.0
    Q3 = 0.0
    U3 = 0.0
    L3 = 0.0
    WCal = FaInicial
    Wfrio = WCal
    d0interno = CDb1(Me.txtinterno.Text)
    dlinterno = CDb1(Me.cboexterno.Text)
    d0externo = CDb1(Me.txtinterno2.Text)

    CambiadorCalor(d0interno, dlinterno, d0externo, T1, T2, T3, T4,
WCal, Espesor, Wfrio, CpCal, CpFrio, Compuesto, Material, 3, Area3, Q3, U3,
L3)

'cambiador de calor tramo 2
    T3 = T4
    T4 = 535
    T1 = 676
    T2 = 601
    Tprom1 = (T1 + T2) / 2
    Tprom2 = (T3 + T4) / 2
    CpFrio = Math.Round(0.000000000000198085451641141 *
Math.Pow(Tprom2, 6) - 0.000000000533248862155329 * Math.Pow(Tprom2, 5) +
0.000000591910393431401 * Math.Pow(Tprom2, 4) - 0.00034657017843829 *
Math.Pow(Tprom2, 3) + 0.112852107079162 * Math.Pow(Tprom2, 2) -
19.3724878230126 * Tprom2 + 1373.5738983946, 2)
    CpCal = Math.Round(0.000000000000198085451641141 *
Math.Pow(Tprom1, 6) - 0.000000000533248862155329 * Math.Pow(Tprom1, 5) +
0.000000591910393431401 * Math.Pow(Tprom1, 4) - 0.00034657017843829 *
Math.Pow(Tprom1, 3) + 0.112852107079162 * Math.Pow(Tprom1, 2) -
19.3724878230126 * Tprom1 + 1373.5738983946, 2)
    Area2 = 0.0
    Q2 = 0.0
    U2 = 0.0
    L2 = 0.0
    WCal = FaInicial
    Wfrio = WCal
    d0interno = CDb1(Me.txtinterno.Text)
    dlinterno = CDb1(Me.cboexterno.Text)
    d0externo = CDb1(Me.txtinterno2.Text)

    CambiadorCalor(d0interno, dlinterno, d0externo, T1, T2, T3, T4,
WCal, Espesor, Wfrio, CpCal, CpFrio, Compuesto, Material, 2, Area2, Q2, U2,
L2)

```

Tabla 96: Código de llamada a los cálculos del intercambiador por tramos

```

'cambiador de calor tramo 1
T3 = T4
T4 = 673
T1 = TFinal
T2 = 676
Tprom1 = (T1 + T2) / 2
Tprom2 = (T3 + T4) / 2
CpFrio = Math.Round(0.0000000000000198085451641141 *
Math.Pow(Tprom2, 6) - 0.000000000533248862155329 * Math.Pow(Tprom2, 5) +
0.000000591910393431401 * Math.Pow(Tprom2, 4) - 0.00034657017843829 *
Math.Pow(Tprom2, 3) + 0.112852107079162 * Math.Pow(Tprom2, 2) -
19.3724878230126 * Tprom2 + 1373.5738983946, 2)
CpCal = Math.Round(0.00000000000212216687963354 * Math.Pow(Tprom1,
6) - 0.0000000102339795951759 * Math.Pow(Tprom1, 5) + 0.0000205397216201822 *
Math.Pow(Tprom1, 4) - 0.0219609077525297 * Math.Pow(Tprom1, 3) +
13.1931930822798 * Math.Pow(Tprom1, 2) - 4222.68604322594 * Tprom1 +
562580.56335989, 2)
Areal = 0.0
Q1 = 0.0
U1 = 0.0
L1 = 0.0
WCal = FaInicial
Wfrio = WCal
d0interno = CDb1(Me.txtinterno.Text)
dlinterno = CDb1(Me.cboexterno.Text)
d0externo = CDb1(Me.txtinterno2.Text)

CambiadorCalor(d0interno, dlinterno, d0externo, T1, T2, T3, T4,
WCal, Espesor, Wfrio, CpCal, CpFrio, Compuesto, Material, 1, Areal, Q1, U1,
L1)

```

Tabla 97: Código de llamada a los cálculos del intercambiador por tramos (continuación)

Como se puede apreciar en las líneas de código existen elementos del tipo *me.cboexterno.text* y *me.txtinterno.text*. Estas órdenes realizan la llamada a los distintos valores que pueden adoptar los diámetros, presentados en la pantalla inicial mediante un menú del tipo “*combobox*” que permite seleccionar un valor de una lista previamente introducida o a mano, aunque esta opción si se ejecuta llamará a un mensaje de aviso indicando que el valor debe pertenecer a la lista. Se hará mediante la orden *Select Case* que permite relacionarlos con el valor del diámetro interno que es el empleado en el cálculo. Esto se ha realizado tanto para el diámetro interno como para el externo; al ser la estructura la misma se presentará solamente una vez el código correspondiente.

```
Sub SeleccionValorDiametroTuboInterno()  
    Dim aux As Double  
    Dim interior As Double  
  
    aux = CDb1(Me.cboexterno.Text)  
    Select Case aux  
        Case 0.0137  
            interior = 0.01068  
        Case 0.0171  
            interior = 0.0139  
        Case 0.0213  
            interior = 0.01757  
        Case 0.0267  
            interior = 0.02279  
        Case 0.0334  
            interior = 0.02885  
        Case 0.0422  
            interior = 0.03735  
        Case 0.0483  
            interior = 0.04322  
        Case 0.0603  
            interior = 0.05476  
        Case 0.073  
            interior = 0.06599  
        Case 0.0889  
            interior = 0.08128  
        Case 0.1143  
            interior = 0.10574  
        Case 0.1413  
            interior = 0.13177  
        Case 0.1683  
            interior = 0.15733  
        Case 0.2191  
            interior = 0.2064  
        Case Else  
            interior = 0  
            MsgBox("El Valor Seleccionado debe pertenecer a la lista")  
    End Select  
  
    If interior = 0 Then  
        Me.txtinterno.Text = ""  
        Me.cboexterno.Text = ""  
    Else  
        Me.txtinterno.Text = CStr(interior)  
    End If  
  
End Sub
```

Tabla 98: Código para la selección del diámetro del tubo interno y externo

Las llamadas a estas partes del código se realizan mediante las siguientes ordenes, Tabla 99, que se producen cada vez que se usan los controles correspondientes a la elección de los diámetros.

```
Private Sub cboexterno_LostFocus(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles cboexterno.LostFocus
    If Me.cboexterno.Text <> "" Then
        Call Me.SeleccionValorDiametroTuboInterno()
    End If
End Sub

Private Sub cboexterno_SelectedValueChanged(ByVal sender As Object, ByVal
e As System.EventArgs) Handles cboexterno.SelectedValueChanged
    Call Me.SeleccionValorDiametroTuboInterno()
End Sub

Private Sub cboexterno2_LostFocus(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles cboexterno2.LostFocus
    If Me.cboexterno2.Text <> "" Then
        Call Me.SeleccionValorDiametroTuboExterno()
    End If
End Sub

Private Sub cboexterno2_SelectedValueChanged(ByVal sender As Object, ByVal
e As System.EventArgs) Handles cboexterno2.SelectedValueChanged
    Call Me.SeleccionValorDiametroTuboExterno()
End Sub
```

Tabla 99: Llamadas al código de selección de los diámetros, tanto interno como externo

Además, se han incluido mensajes de advertencia ante la posible falta de datos a la hora de iniciar los cálculos. Por ello, la aplicación realizará una comprobación previa antes de realizar dichos cálculos mediante el código mostrado en la Tabla 100:


```

If ComprobarEntrada() Then
    FaInicial = CDb1(Me.txtCaudal.Text)
    CaInicial = CDb1(Me.txtConcentracion.Text)
    DInicial = CDb1(Me.cboexterno.Text)
    TInicial = CDb1(Me.txtTemperatura.Text)

Function ComprobarEntrada() As Boolean
    Dim FaltanDatos As Boolean
    Dim Mensaje As String

    FaltanDatos = False
    Mensaje = ""

    If (Me.txtinterno.Text = "") Then
        Mensaje = Mensaje & "No Se Ha Introducido Valor De Diametro Del
Tubo Interno" & vbCrLf
        FaltanDatos = True
    End If
    If (Me.txtinterno2.Text = "") Then
        Mensaje = Mensaje & "No Se Ha Introducido Valor De Diametro Del
Tubo Externo" & vbCrLf
        FaltanDatos = True
    End If
    If (Me.txtConcentracion.Text = "") Then
        Mensaje = Mensaje & "No Se Ha Introducido Valor De Concentración"
& vbCrLf
        FaltanDatos = True
    End If
    If (Me.txtCaudal.Text = "") Then
        Mensaje = Mensaje & "No Se Ha Introducido Valor De Caudal" &
vbCrLf
        FaltanDatos = True
    End If

    If Not FaltanDatos Then
        If CDb1(Me.txtinterno.Text) < CDb1(Me.txtinterno2.Text) Then
            ComprobarEntrada = True
        Else
            MsgBox("El Diámetro Interno Debe Ser Menor Que El Diámetro
Externo")
            ComprobarEntrada = False
        End If
    Else
        MsgBox(Mensaje)
        ComprobarEntrada = False
    End If

End Function

End Function

```

Tabla 100: Comprobación de los datos de entrada para cálculo del reactor e intercambiador

También se hará una comprobación de los datos iniciales para el proceso de optimización, que irá incluida dentro de la mostrada en la Tabla 101, pero se ha preferido mostrarlo por separado para mayor claridad en el código.

```
Function ComprobarEntradaOptimizacion() As Boolean
    Dim FaltanDatos As Boolean
    Dim Mensaje As String

    FaltanDatos = False
    Mensaje = ""

    If (Me.txtinterno.Text = "") Then
        Mensaje = Mensaje & "No Se Ha Introducido Valor De Diametro Del
Tubo Interno" & vbCrLf
        FaltanDatos = True
    End If
    If (Me.txtcaudal.Text = "") Then
        Mensaje = Mensaje & "No Se Ha Introducido Valor De Caudal" &
vbCrLf
        FaltanDatos = True
    End If

    If FaltanDatos Then MsgBox(Mensaje)
    ComprobarEntradaOptimizacion = Not FaltanDatos
End Function
```

Tabla 101: Comprobación datos iniciales para la optimización

Tras estas etapas, queda por definir el código correspondiente a la optimización, al que ya se hizo referencia en el correspondiente anexo. Dicho código (Programa Rosenbrock) se ha obtenido de un artículo llamado *Programas Basic para la optimización de funciones*, escrito por A. Martínez, R. Muñoz y M.C. Burguet en el año 1985 y publicado en la revista *Ingeniería Química*. Obviamente, por el año de publicación este código difiere en algunos aspectos del actualmente empleado por VisualBasic. NET, por lo que ha sido necesaria su adaptación al actual. El código original permitía seleccionar el caso en que trabajaría (maximizar/minimizar) pero en este caso se ha eliminado esta opción pues el objetivo de la optimización del presente proyecto es muy concreto: minimizar el coste total de la planta, pasándole el número de variables, los términos de las respectivas funciones, los valores de las coordenadas del punto base (valores iniciales para las variables de diseño) y la longitud inicial del movimiento.

Primero se mostrarán todas las variables y constantes que se han definido para este proceso:

```
Dim X0(N) As Double
Dim Y1 As Double
Dim E(N) As Double
Dim F(N) As Double
Dim P(N) As Double
Dim S(N) As Double
Dim X1(N) As Double
Dim A(N, N) As Double
Dim D(N, N) As Double
Dim M(N, N) As Double
Dim R(N) As Double
Dim S1 As Double

Dim ConstA As Double
Dim ConstB As Double
Dim ConstS As Double

Dim Etapa As Integer
Dim I As Integer
Dim J As Integer
Dim K As Integer
Dim L As Integer
Dim aux As Boolean
Dim aux2 As Boolean

ConstA = 3
ConstB = -0.5
```

Tabla 102: Variables y constantes empleadas en la optimización

Tras definir las variables y constantes, se pasa al código propiamente dicho que debe dar el valor óptimo deseado. Para ello se emplearán distintos bucles *For*, y limitando el proceso de optimización a cincuenta etapas para evitar la posibilidad de caer en un bucle infinito, es decir, sin solución. El código resultante queda:


```

For J = 1 To N
  For I = 1 To N
    M(J, I) = 0.0
  Next
  M(J, J) = 1
  X0(J) = X(J)
Next

'punto base inicial
Y = Term(1) * Math.Pow(X(1), 3) + Term(2) * Math.Pow(X(1), 2) +
Term(3) * X(1) + Term(4) * Math.Pow(X(2), 3) + Term(5) * Math.Pow(X(2), 2) +
Term(6) * X(2) + Term(7)

For Etapa = 1 To 50

  For I = 1 To N
    S(I) = S0
    E(I) = 0
    F(I) = 0
    P(I) = 0
  Next

  'comienzo del ciclo
  Do
    For J = 1 To N
      For I = 1 To N
        X1(I) = X0(I) + S(J) * M(J, I)
        X(I) = X1(I)
      Next
      Y = Term(1) * Math.Pow(X(1), 3) + Term(2) * Math.Pow(X(1),
2) + Term(3) * X(1) + Term(4) * Math.Pow(X(2), 3) + Term(5) * Math.Pow(X(2),
2) + Term(6) * X(2) + Term(7)
      Y1 = Y
      If Y1 <= Y0 Then
        E(J) = E(J) + 1
        P(J) = P(J) + S(J)
        S(J) = ConstA * S(J)
        For I = 1 To N
          X0(I) = X1(I)
        Next
        Y0 = Y1
      Else
        F(J) = F(J) + 1
        S(J) = ConstB * S(J)
      End If
    Next
  Do

```

Tabla 103: Código para el comienzo de la optimización

Una vez obtenido dicho código, se realiza una prueba de precisión sobre el valor obtenido así como, en caso de que el resultado no fuese el deseado, establecer nuevas direcciones de cálculo del óptimo y comenzar una nueva etapa de optimización; como se demuestra en las siguientes líneas de código (Tabla 104).

```

'Prueba de Precisión
aux = False
For J = 1 To N
  If Math.Abs(S(J) / S0) <= E0 Then
    aux = True
  End If
Next
If aux Then
  For J = 1 To N
    X(J) = X0(J)
  Next
  Y = Y0
  Rosenbrock = Y
  Exit Function
Else
  aux2 = False
  For J = 1 To N
    If F(J) = 0 Or E(J) = 0 Then
      aux2 = True
    End If
  Next
End If

Loop While aux2

'determinacion nuevas direcciones
For I = 1 To N
  A(N, I) = P(N) * M(N, I)
  For J = N - 1 To 1 Step -1
    A(J, I) = A(J + 1, I) + P(J) * M(J, I)
  Next
Next
For J = 1 To N
  For I = 1 To N
    S1 = A(J, I)
    If J <> 1 Then
      For K = J - 1 To 1 Step -1
        ConstS = 0
        For L = 1 To N
          ConstS = ConstS + A(J, L) * M(K, L)
        Next
        S1 = S1 - ConstS * M(K, I)
      Next
    End If
    D(J, I) = S1
  Next
  ConstS = 0
  For I = 1 To N
    ConstS = ConstS + Math.Pow(D(J, I), 2)
  Next
  R(J) = Math.Sqrt(ConstS)
  For I = 1 To N
    M(J, I) = D(J, I) / R(J)
  Next
Next
Next 'etapa
Rosenbrock = Y

End Function

End Module

```

Tabla 104: Prueba de precisión y establecimiento de nuevas direcciones

Todos los valores necesarios para que la optimización se lleve a cabo son suministrados desde el *formulario principal* donde se ha establecido la longitud inicial del movimiento, así como el error que se va a permitir en los cálculos, así como las distintas funciones a optimizar en función de las combinaciones posibles, y que ya fueron presentadas en el “*Anexo de Optimización*”. También se puede comprobar la existencia del código que realiza la llamada para mostrar los resultados en la pantalla principal, presentando el valor inicial antes de la optimización y el valor optimizado.

```
FaltanDatos = False
  If ComprobarEntradaOptimizacion() Then

    N = 2
    S0 = 0.1
    E0 = 0.5
    X(1) = CDb1(Me.txtCaudal.Text) / 1000
    X(2) = CDb1(Me.txtinterno.Text)
    Y = 0.0
    If Me.optAcero.Checked And Me.optFenol.Checked Then
      Term(1) = 18872100.0
      Term(2) = 1864600.0
      Term(3) = -57837900.0
      material = "acero"
      Compuesto = "fenol"
    ElseIf Me.optInconel.Checked And Me.optFenol.Checked Then
      Term(1) = 18767800.0
      Term(2) = 8350940.0
      Term(3) = -57959300.0
      material = "inconel"
      Compuesto = "fenol"
    ElseIf Me.optAcero.Checked And Me.optBiocut.Checked Then
      Term(1) = 20996100.0
      Term(2) = 27683200.0
      Term(3) = -70128100.0
      material = "acero"
      Compuesto = "biocut"
    ElseIf Me.optInconel.Checked And Me.optBiocut.Checked Then
      Term(1) = 28489800.0
      Term(2) = 122118000.0
      Term(3) = -113245000.0
      material = "inconel"
      Compuesto = "biocut"
    End If

    Y0 = Term(1) + Term(2) * X(2) + Term(3) * X(1)
    Res = Rosenbrock(N, Term, S0, E0, X, Y, Y0)

    Me.txtEconomicoInicial1.Text = CStr(Math.Round(Y0, 2))
    Me.txtOptimo.Text = CStr(Math.Round(Res, 2))

  End If

End Sub
```

Tabla 105: Datos de partida para el proceso de optimización

```
'resultados
Me.txtaire.Text = CStr(Math.Round(Faire / 1000000, 2))
Me.txtentradacc.Text = CStr(Math.Round(TFinal, 2))
Me.txtsalidacc.Text = "473"
Me.txtVelocidad.Text = CStr(Math.Round(Velocidad, 2))
Me.txtsalidarefrigerante.Text = CStr(Math.Round(T4, 2))
Me.txtarea.Text = CStr(Math.Round(Area1 + Area2 + Area3, 2))
Me.txtvolumen.Text = CStr(Math.Round(vol, 2))
Me.txtcalor.Text = CStr(Math.Round((Q1 + Q2 + Q3) / 1000, 2))
Me.txtU.Text = CStr(Math.Round(U1 + U2 + U3, 2))
Me.txtlogaritmica.Text = CStr(Math.Round((Q1 + Q2 + Q3) / (U1 + U2
+ U3) * (Area1 + Area2 + Area3), 2))
Me.txtthr.Text = CStr(Math.Round(THR, 2))
Me.txtLongitud.Text = CStr(Math.Round((L1 + L2 + L3), 2))
```

Tabla 106: Relación de datos obtenidos con las casillas de la pantalla principal

En la Tabla 106 se presenta el código para la asignación de los valores obtenidos en los cálculos a cada una de las casillas que le han sido asignadas en el pantalla principal de la aplicación.

Finalmente, se adjunta el código completo, primero el del *modulo* y, a continuación, el del *formulario principal*, dando con ello por finalizado el presente anexo de programación. Se ha intentado hacer una explicación a grandes rasgos del funcionamiento del programa de optimización diseñado para el presente proyecto ya que entrar al detalle en la explicación de todos y cada uno de los pasos se ha creído innecesaria.

```
Module Modulo
  Public Sub VolumenReactor(ByVal Fa0 As Double, ByVal Ca0 As
Double, ByVal Comp As String, ByVal Ea As Double, ByVal Te0 As Double,
ByRef TFinal As Double, ByRef vol As Double, ByRef Faire As Double,
ByVal XaFinal As Double)
  Dim Ca1 As Double
  Dim Ca2 As Double
  Dim Fresiduo As Double
  Dim K As Double
  Dim Media As Double
  Dim incremento As Double
  Dim sumatorio As Double
  Dim Xa As Double
  Dim Volumen As Double
  Dim A As Double
  Dim VelocidadReaccion1 As Double
  Dim VelocidadReaccion2 As Double
  Dim CpResiduo As Double
  Dim CpAire As Double
  Dim Te As Double
  Dim Ts As Double
  Dim TAux As Double
  Dim Entalpia As Integer
  Dim RoAgua As Double
  Dim R As Double
  Dim SumAux As Double

  ' Inicialización de las Variables
  Ca1 = Ca0
  incremento = 0.05
  sumatorio = 0
  Xa = 0
  Te = Te0

  If Comp = "Fenol" Then
    A = 21.87761624
    Entalpia = 2440
    Ea = 39200
  ElseIf Comp = "Biocut" Then
    A = 3207
    Entalpia = 5960
    Ea = 62200
  End If
  RoAgua = 1
  R = 8.314
```

```

'Calculo del Volumen

While Xa < XaFinal
'calculo Cai
Ca1 = Math.Round(Ca0 * (1 - Xa), 0)
Fresiduo = Ca1 * Fa0 / RoAgua
Faire = Math.Round(Fresiduo * FuncionCompuesto(Comp), 9)
K = Math.Round(A * Math.Exp((0 - Ea) / (R * Te)), 9)
VelocidadReaccion1 = Math.Round(K * Ca1, 9)
CpResiduo = Math.Round(AjusteAgua(Te), 9)
CpAire = Math.Round(AjusteAire(Te), 9)

If Xa >= 0.1 Then
Media = Math.Round((1 / VelocidadReaccion1 + 1 /
VelocidadReaccion2) / 2, 9)
sumatorio = Math.Round(sumatorio + incremento * Media,
9)

SumAux = sumatorio
End If

'Incremento Xa
If Xa < 0.8 Then
incremento = 0.05
Else
incremento = 0.01
End If

Ts = Math.Round(Te - (((0 - Entalpia) * Fresiduo *
incremento) / ((Fa0 * CpResiduo) + (Faire * CpAire)))), 9)
Te = Ts
TAux = Te
Xa = Math.Round(Xa + incremento, 2)

'calculo cai+1
Ca2 = Math.Round(Ca0 * (1 - Xa), 0)
Fresiduo = Ca2 * Fa0 / RoAgua
Faire = Math.Round(Fresiduo * FuncionCompuesto(Comp), 9)
K = Math.Round(A * Math.Exp((0 - Ea) / (R * Te)), 9)
VelocidadReaccion2 = Math.Round(K * Ca2, 9)
CpResiduo = Math.Round(AjusteAgua(Te), 9)
CpAire = Math.Round(AjusteAire(Te), 9)

'Incremento Xa
If Xa < 0.8 Then
incremento = 0.05
Else
incremento = 0.01
End If

Ts = Math.Round(Te - (((0 - Entalpia) * Fresiduo *
incremento) / ((Fa0 * CpResiduo) + (Faire * CpAire)))), 9)
Te = Ts
Media = Math.Round((1 / VelocidadReaccion1 + 1 /
VelocidadReaccion2) / 2, 9)
sumatorio = Math.Round(sumatorio + incremento * Media, 9)
Xa = Math.Round(Xa + incremento, 2)

End While
Volumen = sumatorio * Fa0 * 1000000 / 3600

'valores devueltos

```

```
        vol = Volumen
        TFinal = TAux

    End Sub

    Public Function FuncionCompuesto(ByVal compuesto As String) As Double
        Dim aux As Double
        Dim Exc As Double

        exc = CDb1(frmPrincipal.cboExceso.Text)
        If compuesto = "Fenol" Then
            aux = 1 / 94 * 7 * 32 * 100 / 21 * Exc
        ElseIf compuesto = "Biocut" Then
            aux = Exc
        Else
            aux = 0
        End If
        FuncionCompuesto = Math.Round(aux, 9)
    End Function

    Public Function AjusteAgua(ByVal Temp As Double) As Double
        Dim aux As Double

        aux = 0.00000000000212216687963354 * Math.Pow(Temp, 6)
        aux = aux - 0.0000000102339795951759 * Math.Pow(Temp, 5)
        aux = aux + 0.0000205397216201822 * Math.Pow(Temp, 4)
        aux = aux - 0.0219609077525297 * Math.Pow(Temp, 3)
        aux = aux + 13.1931930822798 * Math.Pow(Temp, 2)
        aux = aux - 4222.68604322594 * Temp
        aux = aux + 562580.56335989

        AjusteAgua = Math.Round(aux, 9)

    End Function

    Public Function AjusteAire(ByVal Temp As Double) As Double
        Dim aux As Double

        aux = 4.26073228E-17 * Math.Pow(Temp, 6)
        aux = aux - 0.00000000000017030698435831 * Math.Pow(Temp, 5)
        aux = aux + 0.000000000282852643977507 * Math.Pow(Temp, 4)
        aux = aux - 0.000000251308383822454 * Math.Pow(Temp, 3)
        aux = aux + 0.00012719697826253 * Math.Pow(Temp, 2)
        aux = aux - 0.0351287286866558 * Temp
        aux = aux + 5.28858572925601

        AjusteAire = Math.Round(aux, 9)

    End Function
```

```
Public Function AjusteDensidad(ByVal Temp As Double) As Double
```

```
Dim aux As Double

aux = 0.0000000000401861043009691 * Math.Pow(Temp, 6)
aux = aux - 0.000000191460298230779 * Math.Pow(Temp, 5)
aux = aux + 0.000379477792953638 * Math.Pow(Temp, 4)
aux = aux - 0.400509369528836 * Math.Pow(Temp, 3)
aux = aux + 237.404317474267 * Math.Pow(Temp, 2)
aux = aux - 74938.0352523147 * Temp
aux = aux + 9841604.42590838

AjusteDensidad = Math.Round(aux, 9)
```

End Function

```
Public Sub CambiadorCalor(ByVal D0interno As Double, ByVal
Dlinterno As Double, ByVal d0externo As Double, ByVal T1 As Double,
ByVal T2 As Double, ByVal T3 As Double, ByRef T4 As Double, ByVal WCal
As Double, ByVal Espesor As Double, ByVal Wfrio As Double, ByVal CpCal
As Double, ByVal CpFrio As Double, ByVal Compuesto As String, ByVal
Material As String, ByVal Tramo As Integer, ByRef Area As Double,
ByRef Q As Double, ByRef U As Double, ByRef L As Double)
Dim S0 As Double
Dim S1 As Double
Dim Deq As Double
Dim Tprom1 As Double
Dim Tprom2 As Double
Dim TempLog As Double
Dim RoCal As Double
Dim RoFrio As Double
Dim KFluidoFrio As Double
Dim KFluidoCal As Double
Dim KMaterialCal As Double
Dim KMaterialFrio As Double
Dim MuCal As Double
Dim MuFrio As Double
Dim PI As Double
Dim CpF As Double
Dim CpC As Double
Dim QvCal As Double
Dim QvFrio As Double
Dim Vcal As Double
Dim Vfrio As Double
Dim PrCal As Double
Dim PrFrio As Double
Dim ReCal As Double
Dim ReFrio As Double
Dim hce As Double
Dim hci As Double
Dim term1 As Double
Dim term2 As Double
Dim term3 As Double
Dim DiamLog As Double
Dim I As Integer
```

```
PI = Math.Round(Math.PI, 14)
```



```
CpF = CpFrio
CpC = CpCal
Tprom1 = (T1 + T2) / 2
Tprom2 = (T3 + T4) / 2

If (Material = "Acero") And (Compuesto = "Fenol") Then
    KMaterialCal = Math.Round(0.0000000188413338536886 *
Math.Pow(Tprom1, 3) - 0.0000400416287238198 * Math.Pow(Tprom1, 2) +
0.0415938163999887 * Tprom1 + 3.62312995966895, 2)
    KMaterialFrio = Math.Round(0.0000000188413338536886 *
Math.Pow(Tprom2, 3) - 0.0000400416287238198 * Math.Pow(Tprom2, 2) +
0.0415938163999887 * Tprom2 + 3.62312995966895, 2)

ElseIf (Material = "Inconel") And (Compuesto = "Fenol") Then
    KMaterialCal = Math.Round(0.0201706441855506 * Tprom1 +
9.396817484868, 2)
    KMaterialFrio = Math.Round(0.0201706441855506 * Tprom2 +
9.396817484868, 2)

ElseIf (Material = "Acero") And (Compuesto = "Biocut") Then
    KMaterialCal = Math.Round(0.0000000188413338536886 *
Math.Pow(Tprom1, 3) - 0.0000400416287238198 * Math.Pow(Tprom1, 2) +
0.0415938163999887 * Tprom1 + 3.62312995966895, 2)
    KMaterialFrio = Math.Round(0.0000000188413338536886 *
Math.Pow(Tprom2, 3) - 0.0000400416287238198 * Math.Pow(Tprom2, 2) +
0.0415938163999887 * Tprom2 + 3.62312995966895, 2)

ElseIf (Material = "Inconel") And (Compuesto = "Biocut") Then
    KMaterialCal = Math.Round(0.0201706441855506 * Tprom1 +
9.396817484868, 2)
    KMaterialFrio = Math.Round(0.0201706441855506 * Tprom2 +
9.396817484868, 2)
End If

S0 = Math.Round(PI * (D0interno * D0interno) / 4, 9)
S1 = Math.Round(PI * (d0externo * d0externo / 4 - D0interno *
D0interno / 4), 9)
Deq = Math.Round(d0externo - D0interno, 9)
I = 0

While I < 50

    Q = WCal * CpC * (T1 - T2) * 1000 / 3600
    CpF = Math.Round(0.000000000000198085451641141 *
Math.Pow(Tprom2, 6) - 0.000000000533248862155329 * Math.Pow(Tprom2, 5)
+ 0.000000591910393431401 * Math.Pow(Tprom2, 4) - 0.00034657017843829
* Math.Pow(Tprom2, 3) + 0.112852107079162 * Math.Pow(Tprom2, 2) -
19.3724878230126 * Tprom2 + 1373.5738983946, 2)
    T4 = T3 + Q / (Wfrio * CpF) * 3600 / 1000
    Tprom2 = (T3 + T4) / 2

    I = I + 1

End While
```

```
If Tramo = 3 Then
```

```

TempLog = ((T2 - T4) - (T1 - T3)) / Math.Log((T2 - T4) /
(T1 - T3))
RoCal = Math.Round(-0.0000000000133931733477653 *
Math.Pow(Tprom1, 6) + 0.0000000369844031300495 * Math.Pow(Tprom1, 5) -
0.0000420626741913888 * Math.Pow(Tprom1, 4) + 0.0252064170766029 *
Math.Pow(Tprom1, 3) - 8.3930461744187 * Math.Pow(Tprom1, 2) +
1471.66884631996 * Tprom1 - 105102.493643485, 2)
RoFrio = Math.Round(-0.0000000000133931733477653 *
Math.Pow(Tprom2, 6) + 0.0000000369844031300495 * Math.Pow(Tprom2, 5) -
0.0000420626741913888 * Math.Pow(Tprom2, 4) + 0.0252064170766029 *
Math.Pow(Tprom2, 3) - 8.3930461744187 * Math.Pow(Tprom2, 2) +
1471.66884631996 * Tprom2 - 105102.493643485, 2)
KFluidoFrio = Math.Round(-0.00000000000000059438216588968
* Math.Pow(Tprom2, 6) + 0.00000000000178029732338898 *
Math.Pow(Tprom2, 5) - 0.00000000223078094103586 * Math.Pow(Tprom2, 4)
+ 0.00000149049358713203 * Math.Pow(Tprom2, 3) - 0.000562659675927417
* Math.Pow(Tprom2, 2) + 0.114514044790936 * Tprom2 - 9.16084260782536,
2)
KFluidoCal = Math.Round(-0.00000000000000059438216588968 *
Math.Pow(Tprom1, 6) + 0.00000000000178029732338898 * Math.Pow(Tprom1,
5) - 0.00000000223078094103586 * Math.Pow(Tprom1, 4) +
0.00000149049358713203 * Math.Pow(Tprom1, 3) - 0.000562659675927417 *
Math.Pow(Tprom1, 2) + 0.114514044790936 * Tprom1 - 9.16084260782536,
2)
MuCal = 5.335858058518E-19 * Math.Pow(Tprom1, 6) -
0.000000000000000214546969617692 * Math.Pow(Tprom1, 5) +
0.00000000000354033319008666 * Math.Pow(Tprom1, 4) -
0.00000000306584992096756 * Math.Pow(Tprom1, 3) +
0.00000146929697287399 * Math.Pow(Tprom1, 2) - 0.000370164551775677 *
Tprom1 + 0.0385587102187432
MuFrio = 5.335858058518E-19 * Math.Pow(Tprom2, 6) -
0.000000000000000214546969617692 * Math.Pow(Tprom2, 5) +
0.00000000000354033319008666 * Math.Pow(Tprom2, 4) -
0.00000000306584992096756 * Math.Pow(Tprom2, 3) +
0.00000146929697287399 * Math.Pow(Tprom2, 2) - 0.000370164551775677 *
Tprom2 + 0.0385587102187432
CpF = Math.Round(0.00000000000198085451641141 *
Math.Pow(Tprom2, 6) - 0.000000000533248862155329 * Math.Pow(Tprom2, 5)
+ 0.000000591910393431401 * Math.Pow(Tprom2, 4) - 0.00034657017843829
* Math.Pow(Tprom2, 3) + 0.112852107079162 * Math.Pow(Tprom2, 2) -
19.3724878230126 * Tprom2 + 1373.5738983946, 2)
CpC = Math.Round(0.00000000000198085451641141 *
Math.Pow(Tprom1, 6) - 0.000000000533248862155329 * Math.Pow(Tprom1, 5)
+ 0.000000591910393431401 * Math.Pow(Tprom1, 4) - 0.00034657017843829
* Math.Pow(Tprom1, 3) + 0.112852107079162 * Math.Pow(Tprom1, 2) -
19.3724878230126 * Tprom1 + 1373.5738983946, 2)
QvCal = WCal / RoCal
QvFrio = Wfrio / RoFrio
Vcal = QvCal / S0 * 1 / 3600
Vfrio = QvFrio / S1 * 1 / 3600
PrCal = MuCal * CpC / KFluidoCal * 1000
PrFrio = MuFrio * CpF / KFluidoFrio * 1000
ReFrio = Vfrio * RoFrio * Deq / MuFrio
ReCal = Vcal * RoCal * D0interno / MuCal
hce = 0.0225 * KMaterialFrio / Deq * Math.Pow(ReFrio, 0.8)
* Math.Pow(PrFrio, 0.4)
hci = 0.024 * KMaterialCal / D0interno * Math.Pow(ReCal,
0.8) * Math.Pow(PrCal, 0.3)
DiamLog = (Dlinterno - D0interno) / Math.Log(Dlinterno /
D0interno)

```

```

term1 = 1 / hce
term2 = Espesor * Dlinterno / (KMaterialCal * DiamLog)
term3 = D0interno / (hci * Dlinterno)
U = 1 / (term1 + term2 + term3)
Area = Q / (U * TempLog)
L = Area / (PI * D0interno)

ElseIf Tramo = 2 Then
    TempLog = ((T2 - T4) - (T1 - T3)) / Math.Log((T2 - T4) /
(T1 - T3))
    RoCal = Math.Round(-0.0000000000133931733477653 *
Math.Pow(Tprom1, 6) + 0.0000000369844031300495 * Math.Pow(Tprom1, 5) -
0.0000420626741913888 * Math.Pow(Tprom1, 4) + 0.0252064170766029 *
Math.Pow(Tprom1, 3) - 8.3930461744187 * Math.Pow(Tprom1, 2) +
1471.66884631996 * Tprom1 - 105102.493643485, 2)
    RoFrio = Math.Round(-0.0000000000133931733477653 *
Math.Pow(Tprom2, 6) + 0.0000000369844031300495 * Math.Pow(Tprom2, 5) -
0.0000420626741913888 * Math.Pow(Tprom2, 4) + 0.0252064170766029 *
Math.Pow(Tprom2, 3) - 8.3930461744187 * Math.Pow(Tprom2, 2) +
1471.66884631996 * Tprom2 - 105102.493643485, 2)
    KFluidoFrio = Math.Round(-0.00000000000000059438216588968
* Math.Pow(Tprom2, 6) + 0.00000000000178029732338898 *
Math.Pow(Tprom2, 5) - 0.00000000223078094103586 * Math.Pow(Tprom2, 4)
+ 0.00000149049358713203 * Math.Pow(Tprom2, 3) - 0.000562659675927417
* Math.Pow(Tprom2, 2) + 0.114514044790936 * Tprom2 - 9.16084260782536,
2)
    KFluidoCal = Math.Round(-0.00000000000000059438216588968 *
Math.Pow(Tprom1, 6) + 0.00000000000178029732338898 * Math.Pow(Tprom1,
5) - 0.00000000223078094103586 * Math.Pow(Tprom1, 4) +
0.00000149049358713203 * Math.Pow(Tprom1, 3) - 0.000562659675927417 *
Math.Pow(Tprom1, 2) + 0.114514044790936 * Tprom1 - 9.16084260782536,
2)
    MuCal = 5.335858058518E-19 * Math.Pow(Tprom1, 6) -
0.000000000000000214546969617692 * Math.Pow(Tprom1, 5) +
0.00000000000354033319008666 * Math.Pow(Tprom1, 4) -
0.00000000306584992096756 * Math.Pow(Tprom1, 3) +
0.00000146929697287399 * Math.Pow(Tprom1, 2) - 0.000370164551775677 *
Tprom1 + 0.0385587102187432
    MuFrio = 5.335858058518E-19 * Math.Pow(Tprom2, 6) -
0.000000000000000214546969617692 * Math.Pow(Tprom2, 5) +
0.00000000000354033319008666 * Math.Pow(Tprom2, 4) -
0.00000000306584992096756 * Math.Pow(Tprom2, 3) +
0.00000146929697287399 * Math.Pow(Tprom2, 2) - 0.000370164551775677 *
Tprom2 + 0.0385587102187432
    CpF = Math.Round(0.000000000000198085451641141 *
Math.Pow(Tprom2, 6) - 0.000000000533248862155329 * Math.Pow(Tprom2, 5)
+ 0.000000591910393431401 * Math.Pow(Tprom2, 4) - 0.00034657017843829
* Math.Pow(Tprom2, 3) + 0.112852107079162 * Math.Pow(Tprom2, 2) -
19.3724878230126 * Tprom2 + 1373.5738983946, 2)
    CpC = Math.Round(0.000000000000198085451641141 *
Math.Pow(Tprom1, 6) - 0.000000000533248862155329 * Math.Pow(Tprom1, 5)
+ 0.000000591910393431401 * Math.Pow(Tprom1, 4) - 0.00034657017843829
* Math.Pow(Tprom1, 3) + 0.112852107079162 * Math.Pow(Tprom1, 2) -
19.3724878230126 * Tprom1 + 1373.5738983946, 2)

QvCal = WCal / RoCal
QvFrio = Wfrio / RoFrio

```

```

Vcal = QvCal / S0 * 1 / 3600
Vfrio = QvFrio / S1 * 1 / 3600
PrCal = MuCal * CpC / KFluidoCal * 1000
PrFrio = MuFrio * CpF / KFluidoFrio * 1000
ReFrio = Vfrio * RoFrio * Deq / MuFrio
ReCal = Vcal * RoCal * D0interno / MuCal
hce = 0.0225 * KMaterialFrio / Deq * Math.Pow(ReFrio, 0.8)
* Math.Pow(PrFrio, 0.4)
hci = 0.024 * KMaterialCal / D0interno * Math.Pow(ReCal,
0.8) * Math.Pow(PrCal, 0.3)
DiamLog = (Dlinterno - D0interno) / Math.Log(Dlinterno /
D0interno)

term1 = 1 / hce
term2 = Espesor * Dlinterno / (KMaterialCal * DiamLog)
term3 = D0interno / (hci * Dlinterno)
U = 1 / (term1 + term2 + term3)
Area = Q / (U * TempLog)
L = Area / (PI * D0interno)

ElseIf Tramo = 1 Then
TempLog = Math.Round(((T2 - T4) - (T1 - T3)) /
Math.Log((T2 - T4) / (T1 - T3)), 2)
RoCal = Math.Round(0.000000000401861043009691 *
Math.Pow(Tprom1, 6) - 0.000000191460298230779 * Math.Pow(Tprom1, 5) +
0.000379477792953638 * Math.Pow(Tprom1, 4) - 0.400509369528836 *
Math.Pow(Tprom1, 3) + 237.404317474267 * Math.Pow(Tprom1, 2) -
74938.0352523147 * Tprom1 + 9841604.42590838, 1)
RoFrio = Math.Round(-0.000000000133931733477653 *
Math.Pow(Tprom2, 6) + 0.0000000369844031300495 * Math.Pow(Tprom2, 5) -
0.0000420626741913888 * Math.Pow(Tprom2, 4) + 0.0252064170766029 *
Math.Pow(Tprom2, 3) - 8.3930461744187 * Math.Pow(Tprom2, 2) +
1471.66884631996 * Tprom2 - 105102.493643485, 1)
KFluidoFrio = Math.Round(-0.00000000000000059438216588968
* Math.Pow(Tprom2, 6) + 0.0000000000178029732338898 *
Math.Pow(Tprom2, 5) - 0.0000000223078094103586 * Math.Pow(Tprom2, 4)
+ 0.00000149049358713203 * Math.Pow(Tprom2, 3) - 0.000562659675927417
* Math.Pow(Tprom2, 2) + 0.114514044790936 * Tprom2 - 9.16084260782536,
2)
KFluidoCal = Math.Round(0.00000000000121476736940579 *
Math.Pow(Tprom1, 6) - 0.00000000576592392563284 * Math.Pow(Tprom1, 5)
+ 0.00000113834212165749 * Math.Pow(Tprom1, 4) - 0.00119649962009207 *
Math.Pow(Tprom1, 3) + 0.706173799020872 * Math.Pow(Tprom1, 2) -
221.895102292884 * Tprom1 + 29001.2157203792, 2)
MuCal = 5.335858058518E-19 * Math.Pow(Tprom1, 6) -
0.00000000000000214546969617692 * Math.Pow(Tprom1, 5) +
0.00000000000354033319008666 * Math.Pow(Tprom1, 4) -
0.00000000306584992096756 * Math.Pow(Tprom1, 3) +
0.00000146929697287399 * Math.Pow(Tprom1, 2) - 0.000370164551775677 *
Tprom1 + 0.0385587102187432
MuFrio = 5.335858058518E-19 * Math.Pow(Tprom2, 6) -
0.00000000000000214546969617692 * Math.Pow(Tprom2, 5) +
0.00000000000354033319008666 * Math.Pow(Tprom2, 4) -
0.00000000306584992096756 * Math.Pow(Tprom2, 3) +
0.00000146929697287399 * Math.Pow(Tprom2, 2) - 0.000370164551775677 *
Tprom2 + 0.0385587102187432
CpF = Math.Round(0.00000000000198085451641141 *
Math.Pow(Tprom2, 6) - 0.00000000533248862155329 * Math.Pow(Tprom2, 5)
+ 0.000000591910393431401 * Math.Pow(Tprom2, 4) - 0.00034657017843829
* Math.Pow(Tprom2, 3) + 0.112852107079162 * Math.Pow(Tprom2, 2) -
19.3724878230126 * Tprom2 + 1373.5738983946, 2)

```

```
CpC = Math.Round(0.0000000000212216687963354 *
Math.Pow(Tprom1, 6) - 0.000000102339795951759 * Math.Pow(Tprom1, 5) +
0.0000205397216201822 * Math.Pow(Tprom1, 4) - 0.0219609077525297 *
Math.Pow(Tprom1, 3) + 13.1931930822798 * Math.Pow(Tprom1, 2) -
4222.68604322594 * Tprom1 + 562580.56335989, 2)
QvCal = WCal / RoCal
QvFrio = Wfrio / RoFrio
Vcal = QvCal / S0 * 1 / 3600
Vfrio = QvFrio / S1 * 1 / 3600
PrCal = MuCal * CpC / KFluidoCal * 1000
PrFrio = MuFrio * CpF / KFluidoFrio * 1000
ReFrio = Vfrio * RoFrio * Deq / MuFrio
ReCal = Vcal * RoCal * D0interno / MuCal
hce = 0.0225 * KMaterialFrio / Deq * Math.Pow(ReFrio, 0.8)
* Math.Pow(PrFrio, 0.4)
hci = 0.024 * KMaterialCal / D0interno * Math.Pow(ReCal,
0.8) * Math.Pow(PrCal, 0.3)
DiamLog = (Dlinterno - D0interno) / Math.Log(Dlinterno /
D0interno)
term1 = 1 / hce
term2 = Espesor * Dlinterno / (KMaterialCal * DiamLog)
term3 = D0interno / (hci * Dlinterno)
U = 1 / (term1 + term2 + term3)
Area = Q / (U * TempLog)
L = Area / (PI * D0interno)

End If

End Sub

'Optimización de Rosenbrock para minimizar, pasamos el número de
variables, los términos de nuestra función, los valores de las
coordenadas del punto base y la longitud inicial del movimiento
Public Function Rosenbrock(ByVal N As Integer, ByVal Term() As
Double, ByVal S0 As Double, ByVal E0 As Double, ByRef X() As Double,
ByRef Y As Double, ByVal Y0 As Double) As Double
Dim X0(N) As Double
Dim Y1 As Double
Dim E(N) As Double
Dim F(N) As Double
Dim P(N) As Double
Dim S(N) As Double
Dim X1(N) As Double
Dim A(N, N) As Double
Dim D(N, N) As Double
Dim M(N, N) As Double
Dim R(N) As Double
Dim S1 As Double
Dim ConstA As Double
Dim ConstB As Double
Dim ConstS As Double

Dim Etapa As Integer
Dim I As Integer
Dim J As Integer
Dim K As Integer
Dim L As Integer
Dim aux As Boolean
```

```
Dim aux2 As Boolean
Dim textoetapas As String

ConstA = 3
ConstB = -0.5
textoetapas = frmPrincipal.txtEtapas.Text

For J = 1 To N
    For I = 1 To N
        M(J, I) = 0.0
    Next I
    M(J, J) = 1
    X0(J) = X(J)
Next J

'punto base inicial
Y0 = Term(1) + Term(2) * X(2) + Term(3) * X(1)
textoetapas = "Datos Iniciales" & vbCrLf & "Q(m3/h) = " & X(1)
& " D(m) = " & X(2) & vbCrLf
For Etapa = 1 To 50
    textoetapas = textoetapas & "Etapa: " & Etapa & vbCrLf
    For I = 1 To N
        S(I) = S0
        E(I) = 0
        F(I) = 0
        P(I) = 0
    Next I

    'comienzo del ciclo
    Do
        For J = 1 To N

            For I = 1 To N
                X1(I) = X0(I) + S(J) * M(J, I)
                X(I) = X1(I)
            Next I
            Y = Term(1) + Term(2) * X(2) + Term(3) * X(1)
            Y1 = Math.Round(Y, 7)

            If Y1 <= Y0 Then
                E(J) = E(J) + 1
                P(J) = P(J) + S(J)
                S(J) = ConstA * S(J)
                For I = 1 To N
                    X0(I) = X1(I)
                Next I
                Y0 = Y1
            Else
                F(J) = F(J) + 1
                S(J) = ConstB * S(J)
            End If
        Next J
    Do

Next J
```

```
'Prueba de Precisión
aux = False
For J = 1 To N
    If Math.Abs(S(J) / S0) <= E0 Then
        aux = True
    End If
Next J
```

```

Next J

If aux Then
    For J = 1 To N
        X(J) = X0(J)
    Next J
    Y = Math.Round(Y0, 7)
    textoetapas = textoetapas & "Q(m3/h): " & X(1) &
vbCrLf
    textoetapas = textoetapas & "D(m): " & X(2) &
vbCrLf
    textoetapas = textoetapas & "Y(€/m3): " & Y &
vbCrLf

    frmPrincipal.txtEtapas.Text = textoetapas
    Rosenbrock = Y

Else
    aux2 = False
    For J = 1 To N
        If F(J) = 0 Or E(J) = 0 Then
            aux2 = True
        End If
    Next J
End If
Exit Function

Loop While aux2

'determinacion nuevas direcciones
For I = 1 To N
    A(N, I) = P(N) * M(N, I)
    For J = N - 1 To 1 Step -1
        A(J, I) = A(J + 1, I) + P(J) * M(J, I)
    Next J
Next I
For J = 1 To N
    For I = 1 To N
        S1 = A(J, I)
        If J <> 1 Then
            For K = J - 1 To 1 Step -1
                ConstS = 0
                For L = 1 To N
                    ConstS = ConstS + A(J, L) * M(K, L)
                Next L
                S1 = S1 - ConstS * M(K, I)
            Next K
        End If
        D(J, I) = S1
    Next I
    ConstS = 0
    For I = 1 To N
        ConstS = ConstS + Math.Pow(D(J, I), 2)
    Next I
    R(J) = Math.Sqrt(ConstS)
    For I = 1 To N
        M(J, I) = D(J, I) / R(J)
    Next I
Next J
textoetapas = textoetapas & "Q(m3/h): " & X(1) & vbCrLf
textoetapas = textoetapas & "D(m): " & X(2) & vbCrLf

```

```
        textoetapas = textoetapas & "Y(€/m3): " & Y & vbCrLf
    Next Etapa
    Y = Math.Round(Y, 7)
    textoetapas = textoetapas & "Q(m3/h): " & X(1) & vbCrLf
    textoetapas = textoetapas & "D(m): " & X(2) & vbCrLf
    textoetapas = textoetapas & "Y(€/m3): " & Y & vbCrLf
    frmPrincipal.txtEtapas.Text = textoetapas
    Rosenbrock = Y

    End Function

End Module

Public Sub New()

    ' Llamada necesaria para el Diseñador de Windows Forms.
    InitializeComponent()

    ' Agregue cualquier inicialización después de la llamada a
    InitializeComponent().

    End Sub

    Private Sub cmdCalcular_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal
e As System.EventArgs) Handles cmdCalcular.Click
        Dim vol As Double
        Dim FraccionMasica As Double
        Dim THR As Double
        Dim Velocidad As Double
        Dim TFinal As Double
        Dim T1 As Double
        Dim T2 As Double
        Dim T3 As Double
        Dim T4 As Double
        Dim CpCal As Double
        Dim CpFrio As Double
        Dim Tprom1 As Double
        Dim Tprom2 As Double
        Dim d0interno As Double
        Dim dlinterno As Double
        Dim d0externo As Double
        Dim Espesor As Double
        Dim WCal As Double
        Dim Wfrio As Double
        Dim Material As String
        Dim Area1 As Double
        Dim Area2 As Double
        Dim Area3 As Double
        Dim Q1 As Double
        Dim Q2 As Double
        Dim Q3 As Double
        Dim U1 As Double
        Dim U2 As Double
        Dim U3 As Double
        Dim L1 As Double
        Dim L2 As Double
        Dim L3 As Double
        Dim Faire As Double
```



```
Dim XaFinal As Double
Dim LongitudReactor As Double

If ComprobarEntrada() Then
    FaInicial = CDb1(Me.txtCaudal.Text)
    CaInicial = CDb1(Me.txtConcentracion.Text)
    DIInicial = CDb1(Me.cboexterno.Text)
    TIInicial = CDb1(Me.txtTemperatura.Text)
    XaFinal = CDb1(Me.cboConversion.Text)

    If Me.optFenol.Checked Then
        Compuesto = "Fenol"
    Else
        Compuesto = "Biocut"
    End If
    If Me.optAcero.Checked Then
        Material = "Acero"
    Else
        Material = "Inconel"
    End If

    Faire = 0.0
    TFinal = 0.0
    vol = 0.0

    If Compuesto = "Fenol" Then
        FraccionMasica = CaInicial / 10000
        If FraccionMasica > 150000 Then
            MsgBox("La Fracción Másica De Fenol No Puede Ser Mayor De 150.000 mg/l")
        Else
            VolumenReactor(FaInicial, CaInicial, Compuesto, Ea, TIInicial, TFinal, vol, Faire, XaFinal)
            ro = (AjusteDensidad(TFinal) + AjusteDensidad(TIInicial)) / 2
            Velocidad = 4 * FaInicial / (ro * Math.PI * Math.Pow(DIInicial, 2)) * (1 / 3600)
            THR = vol * CaInicial / FaInicial * 0.000001 * 3600
            LongitudReactor = 4 * (vol / 1000) / (Math.PI * Math.Pow(DIInicial, 2))
        End If
    Else
        FraccionMasica = CaInicial / 10000 * (1 / 2.264)

        If FraccionMasica > 350 Then
            MsgBox("La Fracción Másica De Biocut No Puede Ser Mayor De 350 mg/l")
        Else
            VolumenReactor(FaInicial, CaInicial, Compuesto, Ea, TIInicial, TFinal, vol, Faire, XaFinal)
            ro = (AjusteDensidad(TFinal) + AjusteDensidad(TIInicial)) / 2
            Velocidad = 4 * FaInicial / (ro * Math.PI * Math.Pow(DIInicial, 2)) * (1 / 3600)
            THR = vol * CaInicial / FaInicial * 0.000001 * 3600
        End If
    End If
End If
```

```
LongitudReactor = 4 * (vol / 1000) / (Math.PI *
Math.Pow(DInicial, 2))
End If
End If

Espesor = CDb1(Me.cboexterno.Text) -
CDb1(Me.txtinterno.Text)

'cambiador de calor tramo 3
T4 = 445
T1 = 601
T2 = 473
T3 = 298
Tprom1 = (T1 + T2) / 2
Tprom2 = (T3 + T4) / 2
CpFrio = Math.Round(0.000000000000198085451641141 *
Math.Pow(Tprom2, 6) - 0.00000000533248862155329 * Math.Pow(Tprom2, 5)
+ 0.000000591910393431401 * Math.Pow(Tprom2, 4) - 0.00034657017843829
* Math.Pow(Tprom2, 3) + 0.112852107079162 * Math.Pow(Tprom2, 2) -
19.3724878230126 * Tprom2 + 1373.5738983946, 2)
CpCal = Math.Round(0.000000000000198085451641141 *
Math.Pow(Tprom1, 6) - 0.00000000533248862155329 * Math.Pow(Tprom1, 5)
+ 0.000000591910393431401 * Math.Pow(Tprom1, 4) - 0.00034657017843829
* Math.Pow(Tprom1, 3) + 0.112852107079162 * Math.Pow(Tprom1, 2) -
19.3724878230126 * Tprom1 + 1373.5738983946, 2)
Area3 = 0.0
Q3 = 0.0
U3 = 0.0
L3 = 0.0
WCal = FaInicial
Wfrio = WCal
d0interno = CDb1(Me.txtinterno.Text)
dlinterno = CDb1(Me.cboexterno.Text)
d0externo = CDb1(Me.txtinterno2.Text)

CambiadorCalor(d0interno, dlinterno, d0externo, T1, T2,
T3, T4, WCal, Espesor, Wfrio, CpCal, CpFrio, Compuesto, Material, 3,
Area3, Q3, U3, L3)
```

```
'cambiador de calor tramo 2
T3 = T4
T4 = 535
T1 = 676
T2 = 601
Tprom1 = (T1 + T2) / 2
```

```

Tprom2 = (T3 + T4) / 2
CpFrio = Math.Round(0.000000000000198085451641141 *
Math.Pow(Tprom2, 6) - 0.00000000533248862155329 * Math.Pow(Tprom2, 5)
+ 0.000000591910393431401 * Math.Pow(Tprom2, 4) - 0.00034657017843829
* Math.Pow(Tprom2, 3) + 0.112852107079162 * Math.Pow(Tprom2, 2) -
19.3724878230126 * Tprom2 + 1373.5738983946, 2)
CpCal = Math.Round(0.000000000000198085451641141 *
Math.Pow(Tprom1, 6) - 0.00000000533248862155329 * Math.Pow(Tprom1, 5)
+ 0.000000591910393431401 * Math.Pow(Tprom1, 4) - 0.00034657017843829
* Math.Pow(Tprom1, 3) + 0.112852107079162 * Math.Pow(Tprom1, 2) -
19.3724878230126 * Tprom1 + 1373.5738983946, 2)
Area2 = 0.0
Q2 = 0.0
U2 = 0.0
L2 = 0.0
WCal = FaInicial
Wfrio = WCal
d0interno = CDb1(Me.txtinterno.Text)
dlinterno = CDb1(Me.cboexterno.Text)
d0externo = CDb1(Me.txtinterno2.Text)

CambiadorCalor(d0interno, dlinterno, d0externo, T1, T2,
T3, T4, WCal, Espesor, Wfrio, CpCal, CpFrio, Compuesto, Material, 2,
Area2, Q2, U2, L2)

'cambiador de calor tramo 1
T3 = T4
T4 = 673
T1 = TFinal
T2 = 676
Tprom1 = (T1 + T2) / 2
Tprom2 = (T3 + T4) / 2
CpFrio = Math.Round(0.000000000000198085451641141 *
Math.Pow(Tprom2, 6) - 0.00000000533248862155329 * Math.Pow(Tprom2, 5)
+ 0.000000591910393431401 * Math.Pow(Tprom2, 4) - 0.00034657017843829
* Math.Pow(Tprom2, 3) + 0.112852107079162 * Math.Pow(Tprom2, 2) -
19.3724878230126 * Tprom2 + 1373.5738983946, 2)
CpCal = Math.Round(0.000000000000212216687963354 *
Math.Pow(Tprom1, 6) - 0.0000000102339795951759 * Math.Pow(Tprom1, 5) +
0.0000205397216201822 * Math.Pow(Tprom1, 4) - 0.0219609077525297 *
Math.Pow(Tprom1, 3) + 13.1931930822798 * Math.Pow(Tprom1, 2) -
4222.68604322594 * Tprom1 + 562580.56335989, 2)
Areal = 0.0
Q1 = 0.0
U1 = 0.0
L1 = 0.0
WCal = FaInicial
Wfrio = WCal
d0interno = CDb1(Me.txtinterno.Text)
dlinterno = CDb1(Me.cboexterno.Text)
d0externo = CDb1(Me.txtinterno2.Text)

CambiadorCalor(d0interno, dlinterno, d0externo, T1, T2,
T3, T4, WCal, Espesor, Wfrio, CpCal, CpFrio, Compuesto, Material, 1,
Areal, Q1, U1, L1)

'resultados
Me.txtaire.Text = CStr(Math.Round(Faire / 10000, 2))
Me.txtentradacc.Text = CStr(Math.Round(TFinal - 273, 2))

```

```
Me.txtsalidacc.Text = "200"  
Me.txtVelocidad.Text = CStr(Math.Round(Velocidad, 5))  
Me.txtsalidarefrigerante.Text = CStr(Math.Round(T4 - 273,  
2))  
Me.txtarea.Text = CStr(Math.Round(Area1 + Area2 + Area3,  
2))  
Me.txtvolumen.Text = CStr(Math.Round(vol, 2))  
Me.txtcalor.Text = CStr(Math.Round((Q1 + Q2 + Q3) / 1000,  
2))  
Me.txtU.Text = CStr(Math.Round(U1 + U2 + U3, 2))  
Me.txtlogaritmica.Text = CStr(Math.Round((Q1 + Q2 + Q3) /  
(U1 + U2 + U3) * (Area1 + Area2 + Area3), 2))  
Me.txtthr.Text = CStr(Math.Round(THR, 2))  
Me.txtLongitud.Text = CStr(Math.Round((L1 + L2 + L3), 2))  
Me.txtTemperaturasalidareactor.Text =  
CStr(Math.Round(TFinal - 273, 2))  
Me.txtlongitudreactor.Text =  
CStr(Math.Round(LongitudReactor, 3))  
End If  
  
End Sub  
  
Private Sub cboexterno_LostFocus(ByVal sender As Object, ByVal e  
As System.EventArgs) Handles cboexterno.LostFocus  
If Me.cboexterno.Text <> "" Then  
Call Me.SeleccionValorDiametroTuboInterno()  
End If  
  
End Sub  
  
Private Sub cboexterno_SelectedValueChanged(ByVal sender As  
Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles  
cboexterno.SelectedValueChanged  
Call Me.SeleccionValorDiametroTuboInterno()  
End Sub  
  
Private Sub cboexterno2_LostFocus(ByVal sender As Object, ByVal e  
As System.EventArgs) Handles cboexterno2.LostFocus  
If Me.cboexterno2.Text <> "" Then  
Call Me.SeleccionValorDiametroTuboExterno()  
End If  
End Sub  
  
Private Sub cboexterno2_SelectedValueChanged(ByVal sender As  
Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles  
cboexterno2.SelectedValueChanged  
Call Me.SeleccionValorDiametroTuboExterno()  
End Sub
```

```
Sub SeleccionValorDiametroTuboInterno()  
Dim aux As Double  
Dim interior As Double  
  
aux = CDb1(Me.cboexterno.Text)  
Select Case aux
```

```
Case 0.0137
    interior = 0.01068
Case 0.0171
    interior = 0.0139
Case 0.0213
    interior = 0.01757
Case 0.0267
    interior = 0.02279
Case 0.0334
    interior = 0.02885
Case 0.0422
    interior = 0.03735
Case 0.0483
    interior = 0.04322
Case 0.0603
    interior = 0.05476
Case 0.073
    interior = 0.06599
Case 0.0889
    interior = 0.08128
Case 0.1143
    interior = 0.10574
Case 0.1413
    interior = 0.13177
Case 0.1683
    interior = 0.15733
Case 0.2191
    interior = 0.2064
Case Else
    interior = 0
    MsgBox("El Valor Seleccionado debe pertenecer a la
lista")
End Select

If interior = 0 Then
    Me.txtinterno.Text = ""
    Me.cboexterno.Text = ""
Else
    Me.txtinterno.Text = CStr(interior)
End If

End Sub
```

```
Sub SeleccionValorDiametroTuboExterno()
    Dim aux As Double
    Dim interior As Double

    aux = CDb1(Me.cboexterno2.Text)
    Select Case aux
```

```
Case 0.0137
    interior = 0.01068
Case 0.0171
    interior = 0.0139
Case 0.0213
    interior = 0.01757
Case 0.0267
    interior = 0.02279
Case 0.0334
    interior = 0.02885
Case 0.0422
    interior = 0.03735
Case 0.0483
    interior = 0.04322
Case 0.0603
    interior = 0.05476
Case 0.073
    interior = 0.06599
Case 0.0889
    interior = 0.08128
Case 0.1143
    interior = 0.10574
Case 0.1413
    interior = 0.13177
Case 0.1683
    interior = 0.15733
Case 0.2191
    interior = 0.2064
Case Else
    interior = 0
    MsgBox("El Valor Seleccionado debe pertenecer a la
lista")
End Select

If interior = 0 Then
    Me.txtinterno2.Text = ""
    Me.cboexterno2.Text = ""
Else
    Me.txtinterno2.Text = CStr(interior)
End If

End Sub
```

```
Function ComprobarEntrada() As Boolean
    Dim FaltanDatos As Boolean
    Dim Mensaje As String

    FaltanDatos = False
    Mensaje = ""
```

```
        If (Me.txtinterno.Text = "") Then
            Mensaje = Mensaje & "No Se Ha Introducido Valor De
Diametro Del Tubo Interno" & vbCrLf
            FaltanDatos = True
        End If
        If (Me.txtinterno2.Text = "") Then
            Mensaje = Mensaje & "No Se Ha Introducido Valor De
Diametro Del Tubo Externo" & vbCrLf
            FaltanDatos = True
        End If
        If (Me.txtConcentracion.Text = "") Then
            Mensaje = Mensaje & "No Se Ha Introducido Valor De
Concentración" & vbCrLf
            FaltanDatos = True
        End If
        If (Me.txtCaudal.Text = "") Then
            Mensaje = Mensaje & "No Se Ha Introducido Valor De Caudal"
& vbCrLf
            FaltanDatos = True
        End If
        If (Me.cboConversion.Text = "") Then
            Mensaje = Mensaje & "No Se Ha Introducido Valor De
Conversión" & vbCrLf
            FaltanDatos = True
        End If
        If (Me.cboExceso.Text = "") Then
            Mensaje = Mensaje & "No Se Ha Introducido Valor De Exceso
de Aire" & vbCrLf
            FaltanDatos = True
        End If

        If Not FaltanDatos Then
            If CDb1(Me.txtinterno.Text) < CDb1(Me.txtinterno2.Text)
Then
                ComprobarEntrada = True
            Else
                MsgBox("El Diámetro Interno Debe Ser Menor Que El
Diámetro Externo")
                ComprobarEntrada = False
            End If
        Else
            MsgBox(Mensaje)
            ComprobarEntrada = False
        End If

    End Function
```

```
Function ComprobarEntradaOptimizacion() As Boolean
    Dim FaltanDatos As Boolean
    Dim Mensaje As String

    FaltanDatos = False
    Mensaje = ""
```

```
        If (Me.txtinterno.Text = "") Then
            Mensaje = Mensaje & "No Se Ha Introducido Valor De
Diametro Del Tubo Interno" & vbCrLf
            FaltanDatos = True
        End If
        If (Me.txtCaudal.Text = "") Then
            Mensaje = Mensaje & "No Se Ha Introducido Valor De Caudal"
& vbCrLf
            FaltanDatos = True
        End If

        If FaltanDatos Then MsgBox(Mensaje)
        ComprobarEntradaOptimizacion = Not FaltanDatos

    End Function

    Private Sub cmdOptimo_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e
As System.EventArgs) Handles cmdOptimo.Click
        Dim Res As Double
        Dim FaltanDatos As Boolean
        Dim N As Integer
        Dim Term(3) As Double
        Dim S0 As Double
        Dim E0 As Double
        Dim X(2) As Double
        Dim Y As Double
        Dim Y0 As Double
        Dim material As String

        FaltanDatos = False
        If ComprobarEntradaOptimizacion() Then

            N = 2
            S0 = 0.1
            E0 = 0.5
            X(1) = Cdbl(Me.txtCaudal.Text) / 1000
            X(2) = Cdbl(Me.txtinterno.Text)
            Y = 0.0

            If Me.optAcero.Checked And Me.optFenol.Checked Then
                Term(1) = 18872100.0
                Term(2) = 1864600.0
                Term(3) = -57837900.0
                material = "acero"
                Compuesto = "fenol"
            ElseIf Me.optInconel.Checked And Me.optFenol.Checked Then
                Term(1) = 18767800.0
                Term(2) = 8350940.0
                Term(3) = -57959300.0
                material = "inconel"
                Compuesto = "fenol"
            ElseIf Me.optAcero.Checked And Me.optBiocut.Checked Then
                Term(1) = 20996100.0
                Term(2) = 27683200.0
                Term(3) = -70128100.0
                material = "acero"
                Compuesto = "biocut"
            ElseIf Me.optInconel.Checked And Me.optBiocut.Checked Then
                Term(1) = 28489800.0
```



```
        Term(2) = 122118000.0
        Term(3) = -113245000.0
        material = "inconel"
        Compuesto = "biocut"
    End If

    Y0 = Term(1) + Term(2) * X(2) + Term(3) * X(1)

    Res = Rosenbrock(N, Term, S0, E0, X, Y, Y0)
    Me.txtEconomicoInicial1.Text = CStr(Math.Round(Y0, 2))
    Me.txtOptimo.Text = CStr(Math.Round(Res, 2))

    End If

    End Sub

End Class
```

Pliego General de Condiciones

ÍNDICE:

1. CONDICIONES DE TIPO GENERAL
 - 1.1 OBJETO DE ESTE PLIEGO
 - 1.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA OBRA
 - 1.3 CONDICIONES GENERALES DE ÍNDOLE LEGAL
 - 1.4 DE LOS MATERIALES Y SUS APARATOS, SU PROCEDENCIA
 - 1.5 PLAZO DE COMIENZO Y DE EJECUCIÓN
 - 1.6 SANCIONES POR RETRASO DE LAS OBRAS
 - 1.7 OBRAS DE REFORMA Y MEJORA
 - 1.8 TRABAJOS DEFECTUOSOS
 - 1.9 VICIOS OCULTOS
 - 1.10 RECEPCIÓN PROVISIONAL DE LAS OBRAS
 - 1.11 MEDICIÓN DEFINITIVA DE LOS TRABAJOS
 - 1.12 PLAZO DE GARANTÍA
 - 1.13 CONSERVACIÓN DE LAS OBRAS RECIBIDAS
PROVISIONALMENTE
 - 1.14 RECEPCIÓN DEFINITIVA
 - 1.15 DIRECCIÓN DE OBRA
 - 1.16 OBLIGACIONES DE LA CONTRATA
 - 1.17 RESPONSABILIDADES DE LA CONTRATA
 - 1.18 OBRAS OCULTAS
 - 1.19 SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO
2. CONDICIONES TÉCNICAS QUE HAN DE CUMPLIR LOS MATERIALES.
3. CONDICIONES TÉCNICAS QUE HA DE CUMPLIR LA EJECUCIÓN
4. ESPECIFICACIONES SOBRE EL CONTROL DE CALIDAD

5. MEDICIÓN, VALORACIÓN Y ABONO DE LAS UNIDADES DE OBRA

- 5.1. Tuberías en general
- 5.2. Aislantes
- 5.3. Pavimentos asfálticos
- 5.4. Pinturas y Barnices

6. VALORACIÓN Y ABONO DE LAS OBRAS

- 6.1. Alcance de los precios
- 6.2. Relaciones valoradas
- 6.3. Obra que tiene derecho a percibir el constructor
- 6.4. Pagos de la Obra

Pliego Particular de Condiciones

1. REACTOR

2. CONDUCCIONES

3. AISLAMIENTO

4. BOMBA Y COMPRESOR

5. CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO

6. VÁLVULAS Y BRIDAS

PLIEGO GENERAL DE CONDICIONES

1. CONDICIONES DE TIPO GENERAL

1.1 OBJETO DE ESTE PLIEGO

El objeto de este Pliego es la enumeración de tipo general técnico de Control y de Ejecución a las que se han de ajustar las diversas unidades de obra, para ejecución del Proyecto.

Este Pliego se complementa con las especificaciones técnicas incluidas en cada anexo de cálculo correspondiente a la estructura e instalaciones generales de la planta.

1.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA OBRA

Véase Memoria Descriptiva

1.3 CONDICIONES GENERALES DE ÍNDOLE LEGAL

A continuación se recogen las características y condiciones que reunirá la obra y materiales principales en ella empleados

Las obras a que se refiere el presente proyecto son de nueva planta en su integridad, no existiendo parte alguna de aprovechamiento de edificaciones anteriores ni en lo referente a unidades de obra ni a ninguno de los materiales que han de entrar a formar parte de la misma. Así pues serán automáticamente rechazados aquellos elementos que hayan tenido anterior uso. Del mismo modo, si en las excavaciones o movimientos de tierras apareciese algún elemento o fábrica de anteriores edificaciones no serán aprovechadas, siendo demolidas en lo necesario para establecer las unidades de obra indicadas en los Planos, salvo que sean de carácter histórico, artístico o monumental o que puedan considerarse dentro de la Legislación vigente, en el supuesto de hallazgo de tesoros.

Una vez adjudicadas las obras, el constructor instalará en el terreno una caseta de obra. En ésta habrá al menos dos departamentos independientes, destinados a la oficina y botiquín. El primero deberá tener, al menos, un tablero donde puedan extenderse los planos y el segundo estará provisto de todos los elementos precisos para una primera cura de urgencia.

El pago de impuestos o arbitrios en general, municipales o de otro origen, sobre valladas, alumbrado, etc. cuyo abono deba hacerse durante el tiempo de ejecución de las obras y por conceptos inherentes a los propios trabajos que se realizan correrán a cargo del Contratista.

Los documentos de este proyecto, en su conjunto, con los particulares que pudieran establecerse y las prescripciones señaladas en el Pliego de Condiciones Técnico de la Dirección General de Arquitectura, en Madrid – 1948 y actualizado por la Dirección General de Arquitectura, Economía y Técnica de la Construcción en Madrid – 1960, así como las Normas Tecnológicas que serán de obligado cumplimiento en su total contenido, cuanto no se oponga a las anteriores, constituyen un contrato que determina y regula las obligaciones y derechos de ambas partes contratantes, las cuales se comprometen a dirimir las divergencias que pudieran surgir hasta su total cumplimiento, por amigables componedores, preferentemente por el Ingeniero Director, a quien se considerará como única persona técnica para las dudas e interpretaciones del presente Pliego, o en su defecto, el Ingeniero designado por la Delegación del Colegio Oficial de Ingenieros de la zona y en último extremo a los tribunales competentes, a cuyo fuero se someten ambas partes.

El Contrato se formalizará como documento privado o público a petición de cualquiera de las partes y con arreglo a las disposiciones vigentes. En el Contrato se reflejará las particularidades que convengan ambas partes, completando o modificando lo señalado en el presente Pliego de Condiciones, que quedará incorporado al Contrato como documento integrante del mismo.

1.4 DE LOS MATERIALES Y SUS APARATOS, SU PROCEDENCIA

El Contratista tiene libertad de proveerse de los materiales y aparatos de toda clase en los puntos que le parezca conveniente, siempre que reúnan las condiciones exigidas en el contrato, que estén perfectamente preparados para el objeto a que se apliquen, y sean empleados en obra conforme a las reglas del arte, a lo preceptuado en el Pliego de Condiciones y a lo ordenado por el Ingeniero Director.

Se exceptúa el caso en que los pliegos de condiciones particulares dispongan un origen preciso y determinado, en cuyo caso este requisito será de indispensable cumplimiento salvo orden por escrito en contrario del Ingeniero Director.

Como norma general el Contratista estará obligado a presentar el Certificado de Garantía o Documento de Idoneidad Técnica de los diferentes materiales destinados a la ejecución de la obra.

Todos los materiales y, en general, todas las unidades de obra que intervengan en la construcción del presente proyecto, habrán de reunir las condiciones exigidas por el Pliego de Condiciones varias de la Edificación, compuesto por el Centro Experimental de Arquitectura, y demás Normativa vigente que serán interpretadas en cualquier caso por el Ingeniero Director de la Obra, por lo que el Ingeniero podrá rechazar material o unidad de obra que no reúna las condiciones exigidas sin que el Contratista pueda hacer reclamación alguna.

1.5 PLAZO DE COMIENZO Y EJECUCIÓN

El adjudicatario deberá dar comienzo a las obras dentro de los quince días siguientes a la fecha de adjudicación definitiva a su favor, dando cuenta de oficio a la Dirección Técnica quien acusará recibo, del día que se propone inaugurar los trabajos.

Las obras deberán quedar total y absolutamente terminadas en el plazo que se fije en la adjudicación a contar desde igual fecha que en el caso anterior. No se

considerará motivo de demora de las obras la posible falta de mano de obra o dificultades en la entrega de los materiales.

1.6 SANCIONES POR RETRASO DE LAS OBRAS

Si el Constructor, excluyendo los casos de fuerza mayor, no tuviese perfectamente concluidas las obras y en disposición de inmediata utilización o puesta en servicio, dentro del plazo previsto en el artículo correspondiente, la propiedad oyendo el parecer de la Dirección Técnica, podrá reducir de las liquidaciones, fianzas o emolumentos de todas clases que tuviese en su poder las cantidades establecidas según las cláusulas del contrato privado entre Propiedad y Contrata.

1.7 OBRAS DE REFORMA Y MEJORA

Si por decisión de la Dirección Técnica se introdujesen mejoras, presupuestos adicionales o reformas, el Constructor queda obligado a ejecutarlas, con la baja correspondiente conseguida en el acto de la adjudicación, siempre que el aumento no sea superior al 10% del presupuesto de la obra.

1.8 TRABAJOS DEFECTUOSOS

El Contratista, como es natural, debe emplear los materiales que cumplan las condiciones generales exigidas en el Pliego de Condiciones Generales y Particulares, y realizará todo los trabajos contratados de acuerdo con lo especificado en dicho documento, y en los demás que se recogen en este Pliego.

Por ello, y hasta que tenga lugar la recepción definitiva de la instalación, el Contratista es el único responsable de la ejecución de los trabajos que ha contratado y de las faltas y defectos que en estos puedan existir, por su mala ejecución o por la deficiente calidad de los materiales empleados o aparatos colocados, sin que pueda servir de excusa, ni le otorgue derecho alguno, la circunstancia de que por el Ingeniero Director o sus auxiliares, no se le haya llamado la atención sobre el particular, ni tampoco el hecho de que le hayan sido valoradas las certificaciones parciales de obra,

que siempre se supone que se extienden y abonan a buena cuenta. Así mismo será de su responsabilidad la correcta conservación de las diferentes partes de la obra, una vez ejecutadas, hasta su entrega.

Como consecuencia de lo anteriormente expresado, cuando el Ingeniero Director o su representante en la obra adviertan vicios o defectos en los trabajos efectuados, o que los materiales empleados no reúnan las condiciones preceptuadas, ya sea en el curso de ejecución de los trabajos o finalizados éstos y antes de verificarse la recepción definitiva, podrá disponer que las partes defectuosas sean demolidas y reconstruidas de acuerdo con lo preceptuado y todo ello a expensas de la Contrata.

En el supuesto de que la reparación de la obra, de acuerdo con el proyecto, o su demolición, no fuese técnicamente posible, se actuará sobre la devolución económica de las unidades en cuestión, en cuantía proporcionada a la importancia de los defectos y en relación al grado de acabado que se pretende para la obra.

En caso de reiteración en la ejecución de unidades defectuosas, o cuando éstas sean de gran importancia, la Propiedad podrá optar, previo asesoramiento de la Dirección Facultativa, por la rescisión de contrato sin perjuicio de las penalizaciones que pudiera imponer a la Contrata en concepto de indemnización.

1.9 VICIOS OCULTOS

Si el Ingeniero Director tuviese fundadas razones para creer en la existencia de vicios ocultos de construcción en las obras ejecutadas, ordenará efectuar en cualquier tiempo y antes de la recepción definitiva, las demoliciones que crea necesarias para reconocer los trabajos que crea defectuosos.

Los gastos de demolición y reconstrucción que se ocasionan, serán de cuenta del Contratista, siempre que los vicios existan realmente; en caso contrario, correrán a cargo del Propietario.

1.10 RECEPCIÓN PROVISIONAL DE LAS OBRAS

Una vez terminada la totalidad de las obras, se procederá a la recepción provisional, para la cual será necesaria asistencia de un representante de la Propiedad, de los Ingenieros Directores de las obras y del Contratista o su representante. Del resultado de la recepción se extenderá un acta por triplicado, firmada por los tres asistentes legales antes indicados.

Si las obras se encuentran en buen estado y han sido ejecutadas con arreglo a las condiciones establecidas, se darán por recibidas provisionalmente, comenzando a correr en dicha fecha el plazo de garantía de un año.

Cuando las obras no se hallen en estado de ser recibidas, se hará constar en el acta y se especificarán en la misma los defectos observados, así como las instrucciones al Contratista que la Dirección Técnica considere necesarias para remediar los efectos observados, fijándose un plazo para subsanarlo, expirado el cual se efectuará un nuevo reconocimiento en idénticas condiciones, a fin de proceder de nuevo a la recepción provisional de la obra.

Si el Contratista no hubiese cumplido, se considerará rescindida la Contrata con pérdidas de fianza, a no ser que se estime conveniente se le conceda un nuevo e improrrogable.

Será condición indispensable para proceder a la recepción provisional la entrega por parte de la Contrata a la Dirección Facultativa de la totalidad de los planos de obra generales y de las instalaciones realmente ejecutadas, así como sus permisos de uso correspondientes.

1.11 MEDICIÓN DEFINITIVA DE LOS TRABAJOS

Recibidas provisionalmente las obras, se procederá inmediatamente por la Dirección de la obra a su medición general y definitiva, con precisa asistencia del Contratista o un representante suyo nombrado por él de oficio.

1.12 PLAZO DE GARANTÍA

El plazo de garantía de las obras terminadas será de UN AÑO, transcurrido el cual se efectuará la recepción definitiva de las mismas, que de resolverse favorablemente, relevará al Constructor de toda responsabilidad de conservación, reforma o reparación.

Caso de hallarse anomalías u obras defectuosas, la Dirección Técnica concederá un plazo prudencial para que sean subsanadas y si a la expiración del mismo resultase que aun el Constructor no hubiese cumplido su compromiso, se rescindirá el contrato, con pérdida de la fianza, ejecutando la Propiedad las reformas necesarias con cargo a la citada fianza.

1.13 CONSERVACIÓN DE LAS OBRAS RECIBIDAS PROVISIONALMENTE

Los gastos de conservación durante el plazo de garantía, comprendido entre la recepción parcial y la definitiva correrán a cargo del Contratista. En caso de duda será juez imparcial, la Dirección Técnica de la Obra, sin que contra su resolución quepa ulterior recurso.

1.14 RECEPCIÓN DEFINITIVA

Finalizado el plazo de garantía se procederá a la recepción definitiva, con las mismas formalidades de la provisional. Si se encontraran las obras en perfecto estado de uso y conservación, se darán por recibidas definitivamente y quedará el Contratista relevado de toda responsabilidad administrativa quedando subsistente la responsabilidad civil según establece la Ley.

En caso contrario se procederá de idéntica forma que la preceptuada para la recepción provisional, sin que el Contratista tenga derecho a percepción de cantidad alguna en concepto de ampliación del plazo de garantía y siendo obligación suya hacerse cargo de los gastos de conservación hasta que la obra haya sido recibida definitivamente.

1.15 DIRECCIÓN DE OBRA

Conjuntamente con la interpretación técnica del proyecto, que corresponde a la Dirección Facultativa, es misión suya la dirección y vigilancia de los trabajos que en las obras se realicen, y ello con autoridad técnica legal completa sobre las personas y cosas situadas en la obra y en relación con los trabajos que para la ejecución de las obras, e instalaciones anejas, se lleven a cabo, si considera que adoptar esta resolución es útil y necesaria para la buena marcha de las obras.

El Contratista no podrá recibir otras órdenes relativas a la ejecución de la obra, que las que provengan del Director de Obra o de las personas por él delegadas.

1.16 OBLIGACIONES DE LA CONTRATA

Toda la obra se ejecutará con estricta sujeción al proyecto que sirve de base a la Contrata, a este Pliego de Condiciones y a las órdenes e instrucciones que se dicten por el Ingeniero Director o ayudantes delegados. El orden de los trabajos será fijado por ellos, señalándose los plazos prudenciales para la buena marcha de las obras.

El Contratista habilitará por su cuenta los caminos, vías de acceso, etc.... así como una caseta en la obra donde figuren, en las debidas condiciones, los documentos esenciales del proyecto para poder ser examinados en cualquier momento. Igualmente permanecerá en la obra bajo custodia del Contratista un “Libro de Ordenes”, para cuando lo juzgue conveniente la Dirección dictar las que hayan de extenderse, y firmarse el “enterado” de las mismas por el Jefe de Obra. El hecho de que en dicho libro no figuren redactadas las ordenes que preceptivamente tiene la obligación de cumplir el Contratista, de acuerdo con lo establecido en el “Pliego de Condiciones” de la Edificación, no supone eximente ni atenuante alguno para las responsabilidades que sean inherentes al Contratista.

Por la Contrata se facilitará todos los medios auxiliares que se precisen, y los locales para almacenes adecuados, pudiendo adquirir los materiales dentro de las condiciones exigidas en el lugar y sitio que tenga por conveniente, pero reservándose el

propietario, siempre por sí o por intermedio de sus técnicos, el derecho de comprobar que el contratista ha cumplido sus compromisos referentes al pago de jornales y materiales invertidos en la obra, e igualmente, lo relativo a las cargas en material social, especialmente al aprobar las liquidaciones o recepciones de obras.

La Dirección Técnica y con cualquier parte de la obra ejecutada que no esté de acuerdo con el presente Pliego de Condiciones o con las instrucciones dadas durante su marcha, podrá ordenar su inmediata demolición o su sustitución hasta quedar, a su juicio, en las debidas condiciones, o alternativamente, aceptar la obra con la depreciación que estime oportuna, en su valoración.

Igualmente se obliga a la Contrata a demoler aquellas partes en que se aprecie la existencia de vicios ocultos, aunque se hubieran recibido provisionalmente.

Son obligaciones generales del Contratista las siguientes:

- Verificar las operaciones de replanteo y nivelación, previa entrega de las referencias por la Dirección de la Obra.
- Firmar las actas de replanteo y recepciones.
- Presenciar las operaciones de mediación y liquidaciones, haciendo las observaciones que estime justas, sin perjuicio del derecho que le asiste para examinar y comprobar dicha liquidación.
- Ejecutar cuanto sea necesario para la buena construcción y aspecto de las obras, aunque no esté expresamente estipulado en este pliego.

El Contratista no podrá subcontratar la obra principal total o parcialmente, sin autorización escrita de la Dirección, no reconociéndose otra personalidad que la del Contratista o su apoderado.

El Contratista se obliga, asimismo, a tomar a su cargo cuanto personal necesario a juicio de la Dirección Facultativa.

El Contratista no podrá, sin previo aviso, y sin consentimiento de la Propiedad y Dirección Facultativa, ceder ni traspasar sus derechos y obligaciones a otra persona o entidad.

1.17 RESPONSABILIDADES DE LA CONTRATA

Son de exclusiva responsabilidad del Contratista, además de las expresadas, las de:

- Todos los accidentes que por inexperiencia o descuido sucedan a los operarios, tanto en la construcción como los andamios, debiendo atenerse a lo dispuesto en la legislación vigente sobre accidentes de trabajo y demás preceptos, relacionados con la construcción, régimen laboral, seguros, subsidiarios, etc.
- El cumplimiento de las Ordenanzas y Disposiciones Municipales en vigor. Y en general será responsable de la correcta ejecución de las obras que haya contratado, sin derecho a indemnización por el mayor precio que pudieran costarle los materiales o por erradas maniobras que cometiera, siendo de su cuenta y riesgo los perjuicios que pudieran ocasionarse.

1.18 OBRAS OCULTAS

De todos los trabajos y unidades de obra que hayan de quedar ocultos a la terminación del edificio, se levantarán los planos precisos e indispensables para que queden perfectamente definidos; estos documentos se extenderán por triplicado, entregándose uno al Propietario, otro al Ingeniero Director y el tercero al Contratista, firmados todo ellos por estos dos últimos. Dichos planos, que deberán ir suficientemente acotados, se considerarán documentos indispensables para efectuar las mediciones.

1.19 SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO

El Contratista estará obligado a redactar un proyecto completo de Seguridad e Higiene específico para la presente obra, conformado y que cumplan las disposiciones vigentes, no eximiéndole el incumplimiento o los defectos del mismo de las responsabilidades de todo género que se deriven.

Durante las tramitaciones previas y durante la preparación, la ejecución y remate de los trabajos que estén bajo esta Dirección Facultativa, serán cumplidas y respetadas al máximo todas las disposiciones vigentes y especialmente las que se refieren a la Seguridad e Higiene en el Trabajo, en la Industria de la construcción, lo mismo en lo relacionado a los intervinientes en el tajo como las personas ajenas a la obra.

En caso de accidentes ocurridos a los operarios, en el transcurso de ejecución de los trabajos de la obra, el Contratista se atenderá a lo dispuesto a este respecto en la legislación vigente, siendo en todo caso, único responsable de su incumplimiento y sin que por ningún concepto pueda quedar afectada la Propiedad ni la Dirección Facultativa, por responsabilidad en cualquier aspecto.

El Contratista será responsable de todos los accidentes que por inexperiencia o descuido sobrevinieran, tanto en la propia obra como en las edificaciones contiguas. Será por tanto de su cuenta el abono de las indemnizaciones a quien corresponda y, de todos los daños y perjuicios que puedan causarse en los trabajos de ejecución de la obra, cuando a ello hubiera lugar.

2. CONDICIONES TÉCNICAS QUE HAN DE CUMPLIR LOS MATERIALES

Los materiales deberán cumplir las condiciones que sobre ellos se especifiquen en los distintos documentos que componen el Proyecto.

Tendrán preferencia en cuanto a su aceptabilidad, aquellos materiales que estén en posesión de Documento de Idoneidad Técnica, que avalen sus cualidades, emitido por Organismos Técnicos reconocidos.

Por parte del Contratista debe existir obligación de comunicar a los suministradores las cualidades que se exigen para los distintos materiales aconsejándose que, previamente al empleo de los mismos, sea solicitado informe sobre ellos a la Dirección Facultativa y al Organismo encargado del Control de Calidad.

El Contratista será responsable del empleo de materiales que cumplan con las condiciones exigidas. Siendo estas condiciones independientes, con respecto al nivel de control de calidad para aceptación de los mismos que se establece en el apartado de Especificaciones de Control de Calidad. Aquellos materiales que no cumplan con las condiciones exigidas deberán ser sustituidos, sea cual fuese la fase en que se encuentre la ejecución de la obra, corriendo el Constructor con todos los gastos que ello ocasionase. En el supuesto de que por circunstancias diversas tal sustitución resultase inconveniente, a juicio de la Dirección Facultativa, se actuará sobre la devaluación económica del material en cuestión, con el criterio que marque la Dirección Facultativa y sin que el Constructor pueda plantear reclamación alguna.

3. CONDICIONES TÉCNICAS QUE HA DE CUMPLIR LA EJECUCIÓN

El proceso constructivo de las distintas unidades que conforman el proyecto se ajustará a las especificaciones de la Normativa vigente aplicándose con preferencia las siguientes:

- Normas MV
- Normas Tecnológicas NTE
- EH-88/91
- EF-88
- RL-88
- Normas Tecnológicas de Calidad en Viviendas Sociales, Orden 24-11-76
- Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carretera y Puentes (MOP) PG-3

Por parte del Contratista deberá ponerse especial cuidado en la vigilancia y control de la correcta ejecución de las distintas unidades del Proyecto, con el fin de que la calidad se atenga a las especificaciones que sobre ellas se prevenga en las distintas Normas que sirven de apoyo y guía del proceso Constructivo. La aceptación o no de las partes ejecutadas será independiente de que éstas hayan sido o no certificadas, puesto que en todo caso las certificaciones deben ser consideradas como “a buena cuenta”.

4. ESPECIFICACIONES SOBRE EL CONTROL DE CALIDAD

Por parte de la Propiedad, y con la aprobación de la Dirección Facultativa, se encargará a un Laboratorio de Control de Calidad, con homologación reconocida, la ejecución del Control de Calidad de aceptación. Independientemente el Constructor deberá llevar a su cargo y bajo su responsabilidad el Control de Calidad de producción.

El Constructor deberá facilitar, a su cargo, al Laboratorio de Control designado por la Propiedad, las muestras de los distintos materiales necesarios, para la realización de los ensayos que se relacionan, así como aquellos otros que estimase oportuno ordenar la Dirección Facultativa. Con el fin de que la realización de los ensayos no suponga obstáculo alguno en la buena marcha de la obra, las distintas muestras de materiales se entregarán con antelación suficiente, y que como mínimo será de 15 días más el propio tiempo de realización del ensayo.

Por lo que respecta a los controles de ejecución sobre unidades de obra, bien en período constructivo, bien terminadas, el Constructor facilitará al Laboratorio de Control todos los medios auxiliares y mano de obra no cualificada que precise para la realización de los distintos ensayos y pruebas.

El incumplimiento de cualquiera de las condiciones fijadas para los materiales conducirá al rechazo de los mismos en la situación en que se encuentren, ya sea en almacén, bien acoplado en la obra, o colocado; siendo de cuenta del Constructor los gastos que ocasionase su sustitución. En este caso, el Constructor tendrá derecho a realizar, a su cargo, un contra ensayo, que designará el Director de Obra y de acuerdo con las instrucciones que al efecto se dicten por el mismo. En base a los resultados de

este contra ensayo, la Dirección Facultativa podrá autorizar el empleo del material en cuestión, no pudiendo el Constructor plantear reclamación alguna como consecuencia de los resultados obtenidos del ensayo origen.

Ante un supuesto caso de incumplimiento de las especificaciones, y en el que por circunstancias de diversa índole, no fuese recomendable la sustitución del material, y se juzgase como de posible utilización por parte de la Dirección Facultativa, previo el consentimiento de la Propiedad, el Director de Obra podrá actuar sobre la devaluación del precio del material, a su criterio, debiendo el Constructor aceptar dicha devaluación, si la considera más aceptable que proceder a su sustitución. La Dirección Facultativa decidirá si es viable la sustitución del material en función de los condicionamientos de plazo marcados por la Propiedad.

5. MEDICIÓN, VALORACIÓN Y ABONO DE LAS UNIDADES DE OBRA

Se indica a continuación el criterio adoptado para la realización de las mediciones de las distintas unidades de obra, así como la valoración de las mismas.

El Constructor deberá aportar el estudio de sus precios unitarios a los criterios de medición que aquí se expresan, entendiéndose que las cantidades ofertadas se corresponden totalmente a ellas.

En caso de indefinición de alguna unidad de obra, el Constructor deberá acompañar a su oferta las aclaraciones precisas que permitan valorar el alcance de la cobertura del precio asignado, entendiéndose en otro caso que la cantidad ofertada es para la unidad de obra correspondiente totalmente terminada, y de acuerdo con las especificaciones.

Si por omisión apareciese alguna unidad cuya forma de medición y abono no hubiese quedado especificada, o en los casos de aparición de precios contradictorios, deberá recurrirse al Pliego de Condiciones de Carácter General, debiéndose aceptar en todo caso por el Constructor, en forma inapelable, la propuesta redactada a tal efecto por el Director de Obra.

A continuación se especifican los criterios de medición y valoración de las diferentes unidades de obra.

5.1. TUBERÍAS

Se medirán y abonarán por metro lineal (ml) realmente ejecutados sobre unidad de obra (Ud) totalmente terminada, sin incremento alguno por empalmes o enchufes, piezas especiales, etc.... que quedará incluido en el metro lineal especificado.

El precio comprende los materiales, mano de obra, medios auxiliares, excavación de tierra, rellenos, etc. necesarios para dejar completamente terminada la unidad. Incluye asimismo, la base de asiento según las especificaciones del proyecto u órdenes de la Dirección de Obra, realización de corchetes de ladrillo, fijaciones, etc.

5.2 AISLANTES E IMPERMEABILIZANTES

Se medirán y abonarán en m² de superficie tratada o revestida. El precio incluye todos los materiales, mano de obra, medios auxiliares y operaciones precisas para dejar totalmente terminada la unidad.

No se abonarán los solapes que deberán contabilizarse dentro del precio asignado.

5.3 PAVIMENTO ASFALTICO

Se medirá y abonará en m² de superficie realmente ejecutada y medida en proyección horizontal. El precio incluye los materiales, mano de obra, medios auxiliares y operaciones necesarias para dejar totalmente terminada la unidad, de acuerdo con las especificaciones del proyecto, es decir, tanto la capa de imprimación como la realización del pavimento, incluso sus juntas.

5.4 PINTURAS Y BARNICES

Se medirá y abonará por m² de superficie real pintada, efectuándose la medición de acuerdo con las formas siguientes:

- Pintura sobre muros, tabiques y techos: se medirá descontándose huecos. Las molduras se medirán por su superficie desarrollada.
- Pintura sobre tuberías: se medirá por ml con la salvedad antes apuntada.

En los precios unitarios respectivos está incluido el coste de los materiales, mano de obra, operaciones y medios auxiliares que sean precisos para obtener una perfecta terminación; incluso la preparación de superficies, limpieza, lijado, plastecido, etc.... previos a la aplicación de la pintura.

6. VALORACIÓN Y ABONOS DE LAS OBRAS

6.1 ALCANCE DE LOS PRECIOS

El precio de cada unidad de obra suministrada por el Contratista que afecta a obra civil y/o instalación, equipo, máquina, etc. abarca:

Todos los gastos de extracción, aprovisionamiento, transporte, montaje, pruebas en vacío y carga, muestras, ensayos, control de calidad, acabado de materiales, equipos y obras necesarios, así como las ayudas de albañilería, electricidad, fontanería y de cualquier otra índole que sean precisas.

Todos los gastos a que dé lugar el personal que directa o indirectamente intervengan en su ejecución y todos los gastos relativos a medios auxiliares, ayudas, seguros, gastos generales, gravámenes fiscales o de otra clase, indemnizaciones o abonos por cualquier concepto; entendiéndose que la unidad de obra quedará total y perfectamente terminada y con la calidad que se exige en el proyecto y que, en todo caso, tiene el carácter de mínima.

No se podrá reclamar, adicionalmente a una unidad de obra, otras en concepto de elementos o trabajos previos y/o complementarios, a menos que tales figuren medidas en el presupuesto.

6.2 RELACIONES VALORADAS

Por la Dirección Técnica de la Obra se formarán mensualmente las relaciones valoradas de los trabajos ejecutados, contados preferentemente “al origen”. Descontando de la relación de cada mes el total de los meses anteriores, se obtendrá el volumen mensual de la Obra Ejecutada.

El Constructor podrá presenciar la toma de datos para extender dichas relaciones valoradas disponiendo de un plazo de seis días naturales para formular las reclamaciones oportunas; transcurridos los cuales sin objeción ninguna se le reputará total y absolutamente conforme con ellas.

Para el cómputo de este plazo se tomará como fecha la de la medición valorada correspondiente.

Estas relaciones valoradas, por lo que a la Propiedad y Dirección Facultativa se refiere, sólo tendrán carácter provisional, no entrañando aceptación definitiva ni aprobación absoluta.

6.3 OBRA QUE TIENE DERECHO A PERCIBIR EL CONSTRUCTOR

El Constructor tiene derecho a percibir el importe a Precio de Presupuesto o Contradictorios, en su caso, de todas las unidades que realmente ejecute; sean inferiores, iguales o superiores a las consignadas en el Proyecto, salvo pacto en contrario, siempre que respondan a éste o lo hayan sido expresamente ordenadas por escrito por la Dirección Técnica, según ha quedado establecido en el artículo correspondiente.

6.4 PAGO DE LAS OBRAS

El pago de las obras se verificará por la Propiedad contra la certificación aprobada, expedida por la Dirección Facultativa de ellas.

Los pagos dimanantes de liquidaciones tendrán el carácter de anticipos “a buena cuenta”, es decir, que son absolutamente independientes de la liquidación final y definitiva de las obras quedando pues sujetas a rectificación, verificación o anulación si procedieran.

En ningún caso salvo el de rescisión, cuando así convenga a la Propiedad, serán a tener en cuenta, a efectos de liquidación, los materiales acopiados a pie de obra ni cualesquiera otros elementos auxiliares que en ella estén interviniendo.

Serán de cuenta del Constructor cuantos gastos de todo orden se originen a la Administración, a la Dirección Técnica o a sus Delegados para la toma de datos y redacción de las mediciones u operaciones necesarias para abonar total o parcialmente las obras.

Terminadas las obras se procederá a hacer liquidación general que constará de las mediciones y valoraciones de todas las unidades que constituyen la totalidad de la obra.

El presente Pliego General, consta de 19 páginas, es suscrito en prueba de conformidad por la Propiedad y el Contratista en cuadruplicado ejemplar, uno para cada una de las partes, el tercero para el Ingeniero Director y el cuarto para el expediente del Proyecto depositado en el Colegio Oficial de Ingenieros que corresponda, el cual conviene que dará fé de su contenido en caso de dudas o discrepancias.

PLIEGO DE CONDICIONES PARTICULARES

REACTOR

Conducción de diámetro variable, según simulación realizada, según norma ANSI B36.1. Tolerancia máxima de fabricación: 12,5%. Material: Acero Inoxidable Tipo SA312 Grado TP316L ó Inconel 625 según norma ANSI B31.1

Los ensayos, controles e inspecciones especificados por dichas normas serán realizados por el proveedor, entregándose a la dirección una copia de los resultados de los mismos.

CONDUCCIONES

Las conducciones empleadas en la instalación dependerán del estudio exhaustivo de la correspondiente simulación siguiendo norma ANSI B36.1. Tolerancia máxima de fabricación: 12,5%. Material: Acero Inoxidable Tipo SA312 Grado TP316L ó Inconel 625 según norma ANSI B31.1

Los ensayos, controles e inspecciones especificados por dichas normas serán realizados por el proveedor, entregándose a la dirección una copia de los resultados de los mismos.

AISLAMIENTO

Recubrimiento protector: El recubrimiento protector a aplicar será mediante coquillas y placas de Silicato cálcico. Deberá cumplir con los requisitos exigidos en la norma BS-2958.

Malla de alambre, alambre y fleje para enrollar. La malla de alambre será de acero galvanizado de 25 mm x 1 mm. El alambre para enrollar será de no menos de 1 mm de espesor en acero suave galvanizado. Los flejes en acero galvanizado serán de 20 mm x 0,5 mm.

BOMBA Y COMPRESORES

Deben cumplir todos los requisitos técnicos recogidos en el capítulo “*Memoria Descriptiva*”, los cuales han sido suministrados por el fabricante bajo su responsabilidad.

CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO

Todos los materiales deberán mantenerse en condiciones de almacenamiento limpias y protegidas. No deben colocarse pesos encima de los materiales aislantes.

Todos los puntos que no hayan sido tratados de forma específica como fabricación, ensamble, soldadura, instalación, examen, inspección y prueba, sin excluir otros, deberán cumplir los requisitos de la Norma ASME B31.3, así como cuantas disposiciones legales entren en vigencia en el periodo entre la conclusión del presente proyecto y el comienzo de las obras de ejecución.

VÁLVULAS Y BRIDAS

Tanto bridas como válvulas serán fabricadas según el material seleccionado para la construcción de toda la instalación, véase Acero Inoxidable Tipo SA312 Grado TP316L ó Inconel 625 según norma ANSI B31.1

Glosario

A continuación se presenta un glosario con toda la nomenclatura principal empleada en el presente proyecto. Pueden encontrarse pequeñas variaciones de éstas.

- V = Volumen del reactor.
- F_{a_0} = Caudal másico de componente a la entrada del reactor (expresado como DQO).
- $(-r_a)$ = Velocidad de reacción.
- F_a = Caudal másico de componente a la salida del reactor.
- X_a = Grado de conversión alcanzada en la reacción
- F_{O_2} = Caudal másico de oxígeno.
- n = coeficiente de exceso de oxígeno
- F_{aire} = Caudal másico de aire.
- T_s = Temperatura de salida del reactor para caso adiabático.
- T_e = Temperatura de entrada en el reactor.
- $(-\Delta H_r)$ = Variación de entalpía de reacción.
- τ = Tiempo espacial.
- Q_0 = Caudal volumétrico total.
- $(-r_a)$ = Velocidad de reacción.
- $k(T)$ = Constante cinética dependiente de la temperatura.
- $[C_a]$ = concentración.
- A_0 = Factor de Frecuencia.
- E_a = Energía de activación de la reacción.
- R = Constante de los gases ideales.
- T = Temperatura de la reacción.
- Q : Flujo de calor intercambiado en el sistema.
- U : Coeficiente Global de Transferencia de Calor
- A : Área de intercambio de calor
- ΔT_{ml} : Incremento de temperatura media logarítmica
- T_1 : Temperatura fluido caliente entrada intercambiador

- T_4 : Temperatura frío salida intercambiador
- T_2 : Temperatura fluido caliente salida intercambiador
- T_3 : Temperatura frío entrada intercambiador
- W_{cal} : Caudal másico circulante de fluido caliente
- $W_{frío}$: Caudal circulante de fluido frío
- U : coeficiente global de transferencia de calor.
- D_e : Diámetro externo del tubo interior.
- D_i : Diámetro interior del tubo interior.
- K : conductividad térmica del material del intercambiador.
- h_{ci} : coeficiente individual de transferencia de calor en el tubo interior.
- h_{ce} : coeficiente individual de transferencia de calor en el tubo exterior.
- ϵ : espesor de pared del tubo interior.
- D_{ml} : Diámetro medio logarítmico.
- Q_{v1} : caudal volumétrico de fluido caliente
- S_1 : sección del tubo interior
- vel_1 : velocidad del fluido caliente
- d_0 : diámetro exterior del tubo interior
- h_{ci} : coeficiente de transferencia de calor en el tubo interior
- K : conductividad térmica del material
- Q_{v2} : caudal volumétrico de fluido frío
- S_2 : sección de la corona circular formada por los dos tubos
- vel_2 : velocidad del fluido frío
- d_0 : diámetro exterior del tubo interior
- d_1 : diámetro interior del tubo exterior
- h_{ce} : coeficiente de transferencia de calor en el tubo exterior
- ρ : densidad
- μ : viscosidad
- k : conductividad térmica
- d_{eq} : diámetro equivalente de la corona circular
- r_h : Radio hidráulico.
- P : Perímetro mojado.

- F_0 : caudal másico total inicial
- t_m : espesor mínimo de pared
- P_d : presión interna de diseño
- D_0 : diámetro externo del tubo
- SE: esfuerzo máximo admisible del material
- E: Factor de calidad
- A: sobre-espesor por corrosión
- y : coeficiente de redistribución de esfuerzos perimetrales
- M: tolerancia de fabricación
- Coste: es el coste del equipo en el año seleccionado como base (Coste base) y el que se quiere calcular (Coste actual)
- $I_{M\&S}$: índices de Marshall y Swift referentes a la unidad de la que se quiere conocer el precio
- I_F : inmovilizado para el sistema completo
- I_E : Inmovilizado para los elementos principales
- f_i : factores multiplicadores para la estimación de costes de tuberías, instrumentación, etc.
- f_i : factor multiplicador para la estimación de gastos indirectos como honorarios de ingeniería, contingencias, etc.

Bibliografía

- *American Society of Mechanical Engineers* (2001): “**ASME B31.1, Power Piping**”, ASME, New York.
- *American Society of Mechanical Engineers* (2001): “**ASME B36.10M, Pipes**”, ASME, New York.
- *Ceballos Sierra, Francisco J.* (2005): “**Visual Basic .NET: Lenguaje y aplicaciones**”, Ra-ma, Madrid.
- *Curry Hydrocarbons Inc.* <http://ca.geocities.com/fhcurry@rogers.com>
- *García-Portilla, J.A., Diez, F.V.; Coca, J.* (1989) “**Métodos Alternativos para el Tratamiento de Efluentes Fenólicos Industriales**”. *Ingeniería Química*, 238, 151-158.
- *High Temp Metals:*
<http://www.hightempmetals.com/techdata/hitempInconel625data.php>
- *Kent, Jeffrey A.* (2006): “**Visual Basic 2005 desmythified**”, [e-libro] McGraw-Hill New York.
- *Levenspiel, Octave* (1990): “**Ingeniería de las Reacciones Químicas**” Reverté, Barcelona.
- *Martínez Andréu, A.; Muñoz, R.; Burguet, M.C.* (1985): “**Programas Basic para la optimización de funciones**”, *Ingeniería Química* pp. 181-185.
- *Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales:* www.mtas.es/insht/ntp/ntp317.htm
- *Mills, Anthony F.* (1995): “**Transferencia de Calor**”, Irwin México.
- *National Institute of Standards And Technology:*
<http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>
- *Peters Max S.; Timmerhaus, Klaus D.* (1991): “**Plant Design and Economics for Chemical Engineers**”, McGraw-Hill, London, New York.
- *Portela Miguélez, Juan R.* (2000): “**Depuración de residuos de taladrinas mediante los procesos de oxidación húmeda y oxidación supercrítica**”, Servicio de Publicaciones de la UCA, Cádiz.

- *Perry, Robert H.* (2001): **“Manual del Ingeniero Químico”**, McGraw-Hill, Madrid.
- *R.D. 1634/2006*: **“Tarificación Eléctrica”**
- *Roldán Henares, Manuel J.* (2000): **“Planta de oxidación en agua supercrítica de residuos acuosos de fenol”**
- *Rosenbrock, H. H.* (1960): **“An automatic method for finding the greatest or least value of a function”**, The Computer Journal pp 175-184.
- *Rudd, F. Dale* (1976): **“Estrategia en la ingeniería de procesos”**, Alhambra, Madrid.
- *Sánchez Oneto, Jezabel* (2005): **“Estudio y modelización de un proceso para la eliminación de los residuos de las industrias de mecanizado mediante oxidación en agua sub y supercrítica”**. Servicio de Publicaciones de la UCA, Cádiz.
- *Santamaría, Jesús M.* (1999): **“Ingeniería de Reactores”**. Síntesis, Madrid.
- *Shaw, R.W.; Brill, T.B.; Clifford A.A.; Echert, C.A.; Frank, E.U.* (1991): **“Supercritical Water: A medium for chemistry”**. Chemical and Engineering News 23 pág 26-39.
- *Silla, Harry* (2003): **“Chemical Process Engineering. Design and Economics.”** Marcel Dekker, New York.
- *Uematsu, M.; Frank, E.U.* (1980): **“Static dielectric constant of water and steam”**. J. Phys. Chem Ref. Data, 9 (4), 129.
- *Vine, Michael A.* (2001): **“Visual Basic programming for the absolute beginner”**. [e-libro] Primatech, Roseville California.

