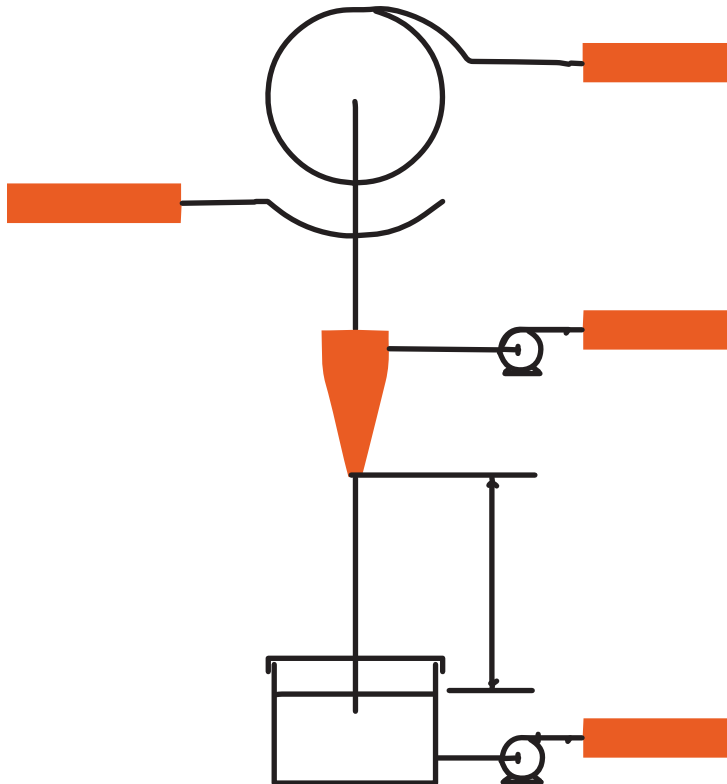


Pablo Ernesto Soler

OPERACIONES UNITARIAS I

Diseño de equipos e instalaciones para procesos químicos industriales



**Diseño de equipos
e instalaciones para procesos
químicos industriales**

Diseño de equipos e instalaciones para procesos químicos industriales

Pablo Ernesto Soler

Editorial de la Universidad Nacional de Jujuy
2019

Prohibida la reproducción total o parcial del material contenido en esta publicación por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, sin permiso expreso del Editor.

Soler, Pablo Ernesto

Diseño de equipos e instalaciones para procesos químicos industriales : resumen bibliográfico : caja de herramientas / Pablo Ernesto Soler. - 1a edición para el alumno - San Salvador de Jujuy : Editorial de la Universidad Nacional de Jujuy - EDIUNJU, 2019. 141 p. ; 24 x 18 cm. - (Libros de cátedra)

ISBN 978-950-721-543-8

1. Ingeniería de Procesos. I. Título.
CDD 661



Diseño de tapa e interior: Edgardo Gutiérrez
Corrección y cuidado de edición: Silvina Campo

© 2019 Pablo Ernesto Soler
© 2019 Editorial de la Universidad Nacional de Jujuy
Avda. Bolivia 1685 - CP 4600
San Salvador de Jujuy - Pcia. de Jujuy - Argentina
Tel. (0388) 4221511- e-mail: ediunju@gmail.com

2019 1ra Edición

Queda hecho el depósito que previene la Ley 11.723
Impreso en Argentina - Printed in Argentina

AGRADECIMIENTO

A todas las personas que directa e indirectamente me han permitido realizar este libro y, en particular, a los alumnos de la Facultad de Ingeniería que sin querer me han motivado para su escritura.

Pablo Ernesto Soler

ÍNDICE

| | |
|---|-----|
| PRÓLOGO | 11 |
| INTRODUCCIÓN | 13 |
| Propuesta metodológica para la resolución de problemas | |
| CAPÍTULO 1 | 17 |
| ¡Ahora sí!... ¡AL ABORDAJE! | |
| CAPÍTULO 2 | 37 |
| Diseño de sistemas para el transporte de fluidos | |
| CAPÍTULO 3 | 51 |
| Diseño de equipos para la separación de fases: Tamices y elutriadores | |
| CAPÍTULO 4 | 71 |
| Diseño de equipos que emplean lechos porosos fijos y fluidizados | |
| CAPÍTULO 5 | 81 |
| Diseño de equipos para la separación de fases: filtros | |
| CAPÍTULO 6 | 91 |
| Diseño de intercambiadores de doble tubo | |
| CAPÍTULO 7 | 117 |
| Diseño de intercambiadores de coraza y tubos | |

| | |
|--------------------|-----|
| CAPÍTULO 8 | 141 |
| Dejando huellas... | |
| BIBLIOGRAFÍA | 145 |

PRÓLOGO

Una forma de llegar a los alumnos

El diseño de los equipos y el control de los procesos químicos son tareas propias de los ingenieros químicos y, como tal, deberán brindar soluciones a esos requerimientos. De allí que, conocer los aspectos conceptuales y disponer de las habilidades para el cálculo es la clave. Es básicamente una “caja de herramientas” que contiene ecuaciones, gráficas, tablas, etc., que se realizó para ser empleada como “guía de clases” por los alumnos que cursan la asignatura Operaciones Unitarias I en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Jujuy. De hecho que durante las clases se desarrollan estos temas con la amplitud necesaria y suficiente para que los contenidos programáticos sean entendidos y aplicados durante el curso de la asignatura. Disponer de este libro ha sido comprobadamente positivo y facilitador tanto para los alumnos, como para los docentes, durante el cursado de la asignatura y desde el punto de vista del proceso de enseñanza-aprendizaje.

INTRODUCCIÓN

Propuesta metodológica para la resolución de problemas

Perfil y alcances del título de ingeniero químico

El *perfil del egresado* de una carrera de ingeniería química de cualquier universidad argentina menciona más de diez aspectos formativos, entre actitudinales y disciplinares, que hacen la diferencia con cualquier otra rama de la ingeniería. Por ejemplo, en los *alcances del título* otorgado por la Universidad Nacional de Jujuy, se menciona en el inciso (1) que

el Ingeniero Químico resulta competente para desempeñarse en el estudio, factibilidad, proyecto, dirección, construcción, instalación, inspección, operación y mantenimiento (excepto de obras civiles e industriales) de: Industrias que involucren procesos químicos, físico-químicos, de bioingeniería y sus instalaciones complementarias; Instalaciones donde intervengan operaciones unitarias y/o procesos unitarios; Instalaciones destinadas a evitar la contaminación ambiental por efluentes de todo tipo originados por la industria y/o sus servicios; Equipos, maquinarias, aparatos e instrumentos para las industrias indicadas en los incisos anteriores.

Aprendizaje basado en problemas (ABP)

Esta metodología, si bien está poco usada todavía en la docencia universitaria, brinda grandes beneficios a la hora de evaluar los resultados finales del proceso de enseñanza-aprendizaje. Los estudiantes piensan y actúan en base al diseño de un proyecto, elaborado según un plan con estrategias definidas, y para dar una solución a un interrogante, lo que va más allá de tan solo cumplir con objetivos curriculares. Permite también aprender en la diversidad al trabajar en grupos. Estimula el crecimiento emocional, intelectual y personal mediante experiencias directas con personas de diferentes contextos. Los estudiantes aprenden diversas técnicas para la solución de problemas al estar en contacto con personas que tienen distintos puntos de vista. Aprenden a aprender el uno del otro y también aprenden la forma de ayudar a sus compañeros para que aprendan.

Aprenden a evaluar el trabajo de sus pares. Aprenden a dar retroalimentación constructiva tanto para ellos mismos como para sus compañeros. El proceso de *elaborar un proyecto* permite y alienta a los estudiantes a experimentar, realizar aprendizaje basado en descubrimientos, aprender de sus errores y enfrentar y superar retos difíciles e inesperados. La Fig.0.1, muestra los pasos a seguir cuando se quiera emplear la metodología ABP para llevar adelante un proceso áulico de enseñanza-aprendizaje.

- 1) *¿De qué se trata?*
- 2) *¿Cuáles serán las causas y las posibles soluciones?*
- 3) *¿Qué conocemos?*
- 4) *¿Qué des-conocemos?*
- 5) *¿Cómo lo hacemos?*
- 6) *¿Cuál es el problema?*
- 7) *¿Cómo obtenemos la información?*
- 8) *¿En qué punto estamos?*
- 9) *¿Cuáles son los resultados obtenidos?*
- 10) *¿Cómo lo presentamos?*

Fig.0.1. Metodología ABP

1) ¿De qué se trata?:

Leer y analizar el escenario del problema. Comprensión del enunciado y de lo que se pide. Reformular el problema, de tal forma que se compruebe la comprensión del mismo y del escenario en que se desarrolla.

Discusión del problema dentro del grupo. Es necesario que todos los miembros comprendan el problema.

2) ¿Cuáles serán las causas y las posibles soluciones?:

Realizar una lluvia de ideas, con las teorías o las hipótesis sobre las causas del problema, o ideas de cómo resolverlo. Preparar una lista con todas ellas y aceptarlas o rechazarlas según avance el problema.

3) ¿Qué conocemos?:

Hacer una lista de aquello que se conoce acerca del problema o de la situación. El equipo debe recurrir a los conocimientos de los que dispone, detalles del problema que conoce y que podrá utilizar para su resolución.

4) ¿Qué des-conocemos?:

Hacer una lista de aquello que se desconoce, de lo que se debe saber para resolver el problema. Existen diversos tipos de preguntas que pueden ser adecuadas, algunas pueden relacionarse con conceptos o principios que deben estudiarse para resolver la situación. Todos los componentes del grupo deben ser conscientes de aquello que no saben y que necesitarán para resolver el problema.

5) ¿Cómo lo hacemos?:

Hacer una lista de aquello que necesita hacerse para resolver el problema. Planear las estrategias de investigación. Es aconsejable elaborar una lista con las acciones que deben realizarse y realizar el reparto de las tareas entre los miembros del grupo, que luego se informarán en un libro diario.

6) ¿Cuál es el problema?:

Explicar claramente lo que el equipo desea resolver, producir, responder, probar o demostrar. Definir adecuada y concretamente el problema que se va a resolver y en el que se va a centrar la investigación.

7) ¿Cómo obtenemos la información?:

Proceder a localizar, recopilar, organizar, analizar e interpretar la información de diversas fuentes. Periodo de trabajo y estudio individual de forma que cada miembro del equipo lleve a cabo la tarea asignada. Obtener la información necesaria, estudiarla y comprenderla, pedir ayuda si es necesario, etc.

8) ¿En qué punto estamos?:

Realizar una puesta en común donde se presentan todos los hallazgos realizados para poder llegar a elaborar conjuntamente la solución al problema y presentar los resultados. Tras esta puesta en común habrán de tomarse decisiones en equipo y resolver el problema.

9) ¿Cuáles son los resultados obtenidos?:

Elaborar un documento final en el que se recoja el trabajo realizado y la solución del problema. En este documento no puede faltar la descripción del problema, la organización de la investigación y del grupo (indicando el desarrollo de los pasos del ABP), las fuentes de información utilizadas, la resolución del problema y el resultado final.

10) ¿Cómo lo presentamos?:

Realizar la presentación de los resultados y las conclusiones de forma escrita y oral. Esta segunda modalidad puede ser individual y/o grupal. Si es escrita deberá cumplir con las reglas del arte para la presentación de informes técnicos.

CAPÍTULO 1

¡Ahora sí!... ¡AL ABORDAJE!

El desafío será según como lo afrontamos
Richard Bach

El ingeniero químico es una persona capaz de transformar moléculas y generar así productos que son de utilidad para la humanidad, en un proceso físico-químico diseñado pensando en los herederos del mañana. Diseñar significa imaginar algo antes de hacerlo materialmente, es una visión del futuro que se emplea en la ingeniería, en la arquitectura, en las comunicaciones y otras actividades creativas. De allí que, la ingeniería química es una combinación de arte y ciencia. Por un lado, es el arte de imaginar algo que puede ser un proceso físico-químico, una instalación industrial, un equipo y, con ello, su forma, sus dimensiones, su funcionamiento, su instalación, etc. Por otro lado, es la ciencia que, con sus contenidos disciplinares, permite dimensionar ese proceso físico-químico y los equipos que lo componen para obtener los productos en la cantidad y con la calidad esperados. Los cambios que se producen en los materiales se detectan mediante la medición directa o indirecta de variables operativas que muestran finalmente las condiciones bajo las cuales se realiza ese proceso de cambio. La lectura, registro, interpretación y control de estas variables también son tareas de los ingenieros químicos, ya que permiten visualizar el comportamiento de esos equipos y del proceso en general. Finalmente, el diseño en ingeniería química pasa por algo tan simple como definir las dimensiones físicas de un equipo, por ejemplo: la longitud, la altura, el diámetro, la superficie, el volumen, etcétera, en función de las condiciones operativas del proceso donde será instalado.

Los problemas en el mundo existen mientras no se encuentre una solución para ellos, y la ingeniería química no queda al margen de este paradigma, sino que, por el contrario, es la especialidad de la ingeniería responsable de generar las mayores transformaciones de la naturaleza en un intento de mejorar la calidad de vida de las personas. Esto no es del todo posible, ya que cualquier actividad donde se realice una transformación de materiales, seguramente arrojará resultados positivos y también resultados negativos. De allí, la necesidad de analizar el conjunto de posibles

soluciones a los problemas, en favor de obtener los mejores resultados y siempre en convivencia con el medio ambiente.

En los procesos químicos se transforman materias primas para obtener productos finales y estos conllevan el movimiento de una gran cantidad de materiales que, a su vez, se encuentran en distintos estados (sólidos, líquidos o gaseosos) y que tienen propiedades físicas y químicas particulares. Tanto el estado como las propiedades de los materiales pueden ir cambiando paulatinamente conforme pasan por cada uno de los equipos que componen el proceso industrial. Estos equipos están vinculados entre sí formando líneas de producción que se diseñan según cuáles sean las materias primas, los productos finales y otros insumos industriales. Los insumos industriales son elementos que acompañan el proceso, pero no son el objeto principal del mismo; por ejemplo, en la industria del papel, se emplean decolorantes de fibra, encolantes, abrillantadores, etc.

En la línea de producción de un proceso industrial, se emplean equipos que tienen mayor o menor nivel de calidad, según cuál sea su precio final. “Lo barato sale caro” dice el refrán, pero no todas las industrias están en condiciones de optar por la opción tecnológica de mayor costo y esto hay que tenerlo claro a la hora de resolver problemas. De modo tal que, el ingeniero químico tiene la obligación de proponer opciones tecnológicas que seguramente representarán menores o mayores resultados económicos para la industria. Asimismo, la reparación de los equipos industriales y/o la adquisición de equipos nuevos, siempre será motivo de un análisis profundo, sobre todo en países sin desarrollo tecnológico y donde la importación de máquinas y repuestos está condicionada a los vaivenes de la propia economía. De allí que, el ingeniero químico debe tener siempre presente la posibilidad de aprovechar materiales y equipos existentes en una planta industrial frente a la compra de algo nuevo.

Por otro lado, para llevar adelante la transformación de materiales que se realiza en una industria de procesos, el ingeniero químico dispone de una gran cantidad de variables o parámetros que identifican a cada una de las corrientes que integran el proceso industrial. La administración de estas variables es fundamental, ya que le permiten avanzar en los cambios que espera obtener tanto en la cantidad como en la calidad de los productos obtenidos.

El diseño y operación de plantas industriales de procesos químicos implica realizar evaluaciones y tomar decisiones relacionadas con aspectos tecnológicos, económico-financieros, etc. Para esto, el ingeniero químico deberá conocer en profundidad el conjunto de las variables implicadas en cada uno de estos aspectos, así como las variables externas que pueden inferir sobre los resultados de un proyecto.

Análisis, evaluación y toma de decisiones en el estudio de proyectos de ingeniería

La cadena de decisiones

Es una metodología que permite segmentar el proceso para la evaluación y la toma de decisiones al momento de realizar un proyecto, es un esquema práctico realizado por etapas, donde se busca simplificar el uso de las variables y de las posibles soluciones. De hecho, que no es el objeto de esta publicación la discusión de esta metodología, sino que se menciona para entender el alcance de los contenidos en esta obra.

La cadena de decisiones es una secuencia de acciones donde cada eslabón aporta una solución parcial y específica al problema, y que, a su vez, brinda los insumos necesarios para avanzar en el análisis de otro aspecto de la solución en el eslabón siguiente. Pueden existir ciclos internos en cada eslabón como también ciclos externos entre eslabones diferentes, para la adecuación y/o verificación de la propuesta a otras condiciones definidas para la situación problema. En el esquema siguiente se muestra la cadena de decisiones que será de utilidad para la evaluación y la toma de decisiones en el estudio de proyectos de ingeniería.

En la Fig. 1.1, se observa el camino a seguir para realizar el análisis, la evaluación y la toma de decisiones en el estudio de proyectos de ingeniería. Si bien, no es el único camino, pero, es de utilidad para resolver problemas sin ser un especialista en el tema.

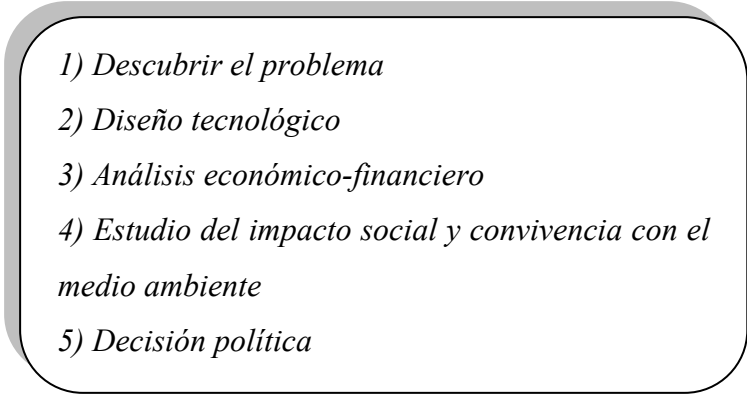
- 
- 1) *Descubrir el problema*
 - 2) *Diseño tecnológico*
 - 3) *Análisis económico-financiero*
 - 4) *Estudio del impacto social y convivencia con el medio ambiente*
 - 5) *Decisión política*

Fig. 1.1. Cadena de decisiones para un proyecto tecnológico.

1) Descubrir el problema

El diseño en ingeniería química tiene por objeto desarrollar las tecnologías necesarias para dar solución a los problemas que se presentan en los procesos químicos industriales. De allí que, lo primero que tenemos que hacer es identificar y definir el problema, que, dicho sea de paso, en la industria de procesos químicos no siempre es una tarea fácil. Las máquinas andan bien o se quejan, pero nunca hablan. Los productos obtenidos son los primeros en indicar los defectos del proceso industrial y, a partir de este análisis, se obtienen los primeros indicios sobre el origen del problema. Luego, son de gran utilidad las conversaciones que se puedan mantener con el personal que está relacionado con el proceso, como, por ejemplo: operarios, ingenieros de mantenimiento, ingenieros de producción, etc.

La consulta bibliográfica de las publicaciones más recientes sobre el tema puede dar alguna orientación, como también la entrevista con especialistas en la materia, como ser, el mismo fabricante de los equipos, personas de otras plantas industriales con procesos similares, etc. Asimismo, el método de prueba y error también puede ser de utilidad para ir descartando variables o posibilidades que no sean relevantes. Desde ya que este método implica horas máquina de la planta industrial que pueden ser improductivas.

Muchas veces se confunde causa con efecto en la definición de un problema, dando lugar a diagnósticos equivocados y, con ello, a resultados también equivocados o poco alentadores. La observación es clave para la detección de los problemas en los procesos industriales, para saber identificarlos y reconocer su origen, que puede ser el factor humano, los equipos, los materiales, o bien, una combinación de ellos.

Las máquinas sufren un desgaste por el uso que es inevitable y tienen su propio idioma para mostrar su estado y funcionamiento. Los operarios encargados de las máquinas normalmente conocen este idioma y son expertos para identificar sus problemas, tal como lo hace un médico con su paciente, y también para reconocer cuándo la causa del problema está en la calidad de los materiales que circulan por la línea de producción.

La calidad de las materias primas que ingresan a un proceso industrial normalmente no es constante, por lo cual se debe adecuar el proceso a esta realidad, ajustando las condiciones operativas dentro de los límites establecidos por el diseño del mismo.

El personal encargado de operación las máquinas es, de entre todos, el recurso más valioso que tiene un proceso industrial. La administración de los recursos humanos es un capítulo aparte y digno de ser tenido en cuenta a la hora de realizar proyectos de cualquier tipo, ya que para desempeñarse en cualquier función relacionada con el proceso industrial seguramente serán necesarios algunos requisitos especiales en las personas que deban ocupar ese puesto de trabajo. Asimismo, la empresa como organización social deberá cumplir con algunas pautas de convivencia social dirigida especialmente a sus empleados como también a la sociedad en su conjunto.

Un problema no es un problema hasta que se lo identifica como tal, ya que a veces las cosas funcionan bien y como se dice en la jerga mundana “todo tranqui, todo en orden”. También se dice que, “si no hay problemas hay que buscarlos” y es allí donde aparece la mayor de las virtudes del ingeniero químico, es la tendencia natural y espontánea a pensar que todo se puede hacer mejor, el proceso y los productos obtenidos.

Así se generan los proyectos que pueden tener efectos sobre el aumento de la calidad de los productos finales, el aumento de la producción

o de productividad del proceso industrial, o bien, terminará por ser una reducción de los costos operativos, o de los costos de los insumos, etcétera. Otras veces, los problemas son imprevistos ya que surgen como resultado del mantenimiento deficiente de las máquinas, de la incapacidad de las mismas para mantener un pretendido ritmo de producción, de la mala operación de las máquinas, de la mala gestión de los procesos de producción, etcétera. En estos casos, se realizan tareas de reparación rápida de los equipos y para lo cual el ingeniero químico deberá conducir las acciones buscando reducir los efectos derivados de estas paradas no programadas.

2) Diseño tecnológico

El diseño tecnológico no es otra cosa que encontrar las posibles soluciones tecnológicas al problema. Una vez identificado el problema, el ingeniero químico tendrá que poner en marcha todas sus capacidades y habilidades para brindar el conjunto de las posibles soluciones tecnológicas al problema. Deberá diseñar el proceso, los equipos y las instalaciones auxiliares que correspondan. La creatividad tanto como la innovación son elementos de vital importancia en esta etapa del proyecto. Para el desarrollo de la creatividad y la capacidad de innovación será necesario superar barreras que pueden ser emocionales, perceptivas, culturales, etcétera; saber adaptarse a los cambios, ser perceptivo, observador y tener capacidad de síntesis para tamizar y redondear los múltiples detalles que se presentan en cada escenario.

3) Análisis económico-financiero

En esta etapa se espera obtener los resultados que permitan tomar una decisión sobre la conveniencia de optar por alguna de las opciones estudiadas, pensando en la oportunidad económica y financiera que ofrece cada una de las propuestas de solución tecnológica realizadas.

4) Estudio del impacto social y convivencia con el medio ambiente

Permite tomar decisiones con relación a la conveniencia de optar por alguna de las propuestas de solución tecnológica para el problema planteado

teniendo presente los beneficios y los daños que pueden llegar a ocasionar en el ámbito social.

5) Decisión política

Es el análisis final que se debe realizar con cada una de las propuestas de solución tecnológica obtenidas, para evaluar cuál será su impacto en el ambiente político bajo su influencia.

Cada uno de estos pasos implica una toma de decisiones, ya sea para avanzar con la implementación del proyecto, o bien para dejar sin efecto las propuestas de solución, dando lugar tal vez a otras propuestas.

Finalmente, en este manual, solo se abordará la parte de la cadena de decisiones que corresponde al *diseño tecnológico*, vale decir que el resto se puede abordar desde otras bibliografías.

El Diseño Tecnológico y el Informe Tecnológico

Siendo la búsqueda de soluciones a distintos problemas tecnológicos, uno de los aspectos más importantes en la vida profesional del ingeniero químico, en este libro, se la abordará mediante el empleo de una metodología que, sin ser la única, resulta de gran utilidad a la hora de diseñar equipos e instalaciones de procesos químicos industriales. El *Diseño Tecnológico*, si bien es el objeto de estudio, no existe si luego no se presenta con un *Informe Tecnológico* editado y publicado según las normas del arte que correspondan, teniendo en cuenta los aspectos relacionados con los contenidos, la estructura y el formato del texto. En la elaboración del Informe Tecnológico, se deberá referenciar todos elementos extraídos de las bibliografías existentes o bien de las consultas realizadas a especialistas, enlaces, vínculos externos, etc.; el detalle de las herramientas empleadas para el cálculo tales como ecuaciones, tablas, gráficos, nomogramas, etc.; que deberán ser también referenciadas a la bibliografía que corresponda. La técnica para esta referenciación o citado bibliográfico está definida por las normas del arte y que para nuestro caso emplearemos las *Normas APA*. En

la Fig. 1.2., se presenta un modelo de contenidos y estructura para la elaboración de Informes Tecnológicos y que será adoptado por este libro.

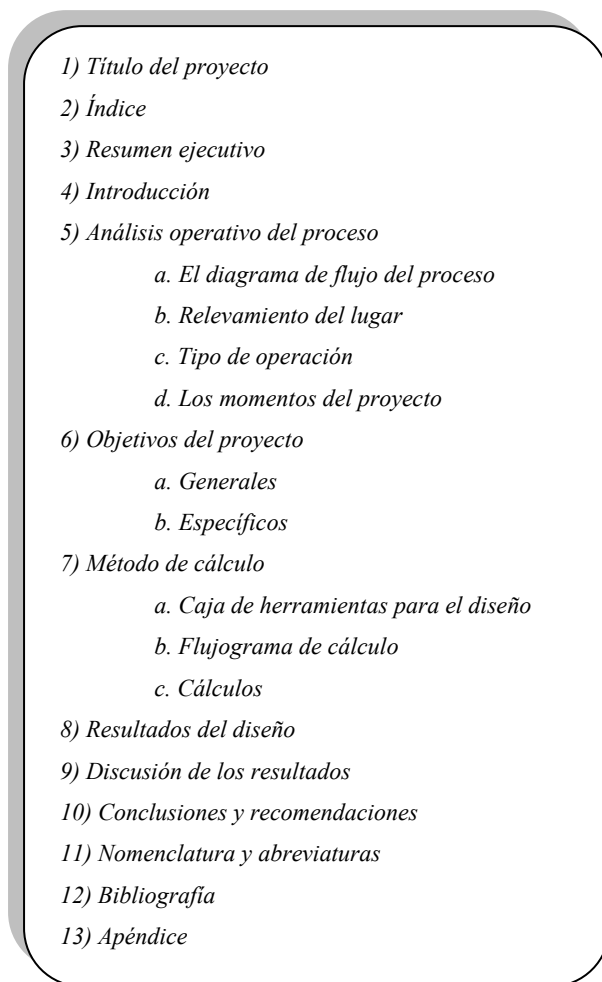
- 
- 1) *Título del proyecto*
 - 2) *Índice*
 - 3) *Resumen ejecutivo*
 - 4) *Introducción*
 - 5) *Análisis operativo del proceso*
 - a. *El diagrama de flujo del proceso*
 - b. *Relevamiento del lugar*
 - c. *Tipo de operación*
 - d. *Los momentos del proyecto*
 - 6) *Objetivos del proyecto*
 - a. *Generales*
 - b. *Específicos*
 - 7) *Método de cálculo*
 - a. *Caja de herramientas para el diseño*
 - b. *Flujograma de cálculo*
 - c. *Cálculos*
 - 8) *Resultados del diseño*
 - 9) *Discusión de los resultados*
 - 10) *Conclusiones y recomendaciones*
 - 11) *Nomenclatura y abreviaturas*
 - 12) *Bibliografía*
 - 13) *Apéndice*

Fig. 1.2. Contenidos y estructura de un Informe Tecnológico.

Como dato adicional, esta metodología también es aplicable para preparar una disertación o una conferencia, para la defensa de un proyecto y, por supuesto, para rendir un examen en cualquier asignatura universitaria.

Permite adquirir habilidades para leer libros, sintetizar conceptos, administrar el uso de las herramientas, definir criterios operativos, brindar soluciones que van más allá del problema en particular; favorece, además, el trabajo en equipos interdisciplinarios, alienta la discusión y el planteo de propuestas nuevas, facilita la organización de la presentación.

1) Título del proyecto: ¿qué intentamos hacer?

Se debe emplear el menor número posible de palabras y lograr que las mismas describan, adecuadamente, el contenido del trabajo. No debe ser, ni demasiado corto ni demasiado largo. Debe ser significativa y despertar interés. Se deben elegir cuidadosamente las palabras y las formas de asociarlas. No es una oración, estas palabras deben funcionar más bien como una etiqueta. Por lo tanto carece de sujeto, verbo y complemento, y los términos deben limitarse a las palabras claves que subrayan el contenido significativo del trabajo. Se deben evitar las palabras superfluas (Ej.: a propósito de, estudio de, investigaciones sobre, observaciones acerca de), las abreviaturas, los términos generales e imprecisos.

2) Índice: ¿cuáles son los títulos del informe?

Este ítem se debe tener presente solo al momento de elaborar el informe tecnológico del trabajo realizado. Indica la ubicación de cada tema, tablas, gráficos, etc. en todo el informe.

3) Resumen ejecutivo: ¿de qué se trata?

Como el ítem anterior forma parte solo del informe tecnológico y es la parte más importante siendo a veces la única parte que se lee. Es una versión en miniatura, concisa del trabajo, que incluye un sumario de la información vertida en cada sección y en el mismo orden. Es informativo, no descriptivo. Se debe presentar el tema; explicar qué y cómo se ha hecho, los resultados obtenidos y las conclusiones finales. No debe contener ninguna información ni conclusión que no figure en el trabajo. Se debe redactar empleando un vocabulario familiar, evitando siglas y abreviaturas. No se incluyen citas bibliográficas, figuras, cuadros, etc. No debe superar las 300 palabras.

4) Introducción: ¿cuál es el problema y cuáles serán sus posibles soluciones?

Es aquí donde se deberá definir el problema que se busca solucionar exponiendo con claridad la naturaleza y el alcance del mismo. Se deberá explicar además cuál es el estado actual de los conocimientos y experiencias sobre el mismo, basado en una revisión bibliográfica exhaustiva y en el intercambio realizado con personas de la misma planta industrial, de otras empresas similares, de los fabricantes de equipos industriales, de especialistas o consultores, etc. El problema deberá ser presentado de una forma clara, concisa y ordenada. En este momento, se deberán señalar las posibles limitaciones y los inconvenientes a las distintas propuestas de solución encontradas y/o sugeridas. Todas las ideas expresadas en la introducción deben ser respaldadas haciendo mención al origen de la misma, sea una persona física o bien, una referencia bibliográfica.

5) Análisis operativo del proceso: ¿dónde estamos parados?

Dado que, difícilmente se puedan obtener buenos resultados en un diseño si no se parte de un buen diagnóstico, los temas, en este libro, fueron desarrollados haciendo hincapié en el *análisis operativo* o *diagnóstico operativo* que se debe hacer previo al diseño del equipo o del proceso industrial, para garantizar que su funcionamiento sea el esperado. Es el punto de partida para encontrar las distintas soluciones al problema planteado, en función de las posibilidades operativas o de funcionamiento definidas para el equipo o el proceso industrial.

En esta fase diagnóstica del diseño, se debe analizar y entender cuáles son los aspectos del entorno que están relacionados con el problema y las consideraciones que se deben realizar para avanzar sobre el estudio de las propuestas de solución, como ser: identificación de las corrientes de materiales; la ubicación de los equipos e instalaciones existentes en la planta industrial; el espacio disponible para la instalación de los equipos nuevos y para la circulación de los operarios; el espacio que demandarán los materiales empleados antes, durante y después de realizado el proyecto; el tipo de operación que se realizará; etc. Es el momento de realizar las consultas bibliográficas que sean necesarias, así como la indagatoria a otras personas y especialistas que pueden llegar a estar involucradas en el

proyecto, con la idea de contar con otros datos o información que sea de interés para avanzar en el diseño de los equipos y el proceso.

a. El diagrama de flujo del proceso: ¿los equipos y las corrientes?

Una foto dice más que mil palabras y no es para menos, cuando se aprende a interpretar el diagrama de flujo tal como se emplea para graficar un proceso industrial. Los diagramas de flujo de materiales pueden ser del tipo: cualitativos, cuantitativos, combinados, etcétera, pero básicamente deben mostrar en forma esquemática el conjunto de los equipos y la circulación de las corrientes de los materiales a través del proceso industrial.

i. Los equipos necesarios para el proceso:

Un proceso químico industrial se diseña con el objeto de transformar moléculas para obtener productos que sean necesarios para la sociedad. Esta transformación, dependiendo de su complejidad, no es posible hacerla en un solo equipo sino que, por el contrario, se necesitan varios equipos, los cuales, también, pueden ser distintos entre sí. En los equipos se cambian y/o ajustan las condiciones operativas de las corrientes de los materiales para lograr las condiciones necesarias ya sea para transformar los materiales de las corrientes que ingresan o bien, para obtener las corrientes en otras condiciones según lo solicitado por el proceso siguiente. Esto significa que puede haber cambios químicos o solamente físicos en los materiales. En este manual, solo abordaremos los cambios físicos que se pueden producir en las corrientes de materiales.

ii. Las corrientes de materiales:

Representan el recorrido que hacen los materiales por el proceso industrial y a través de los equipos. Existe una corriente principal relacionada con el camino que debe seguir la materia prima hasta la obtención de los productos terminados, es la corriente controlante del proceso. Las otras corrientes son secundarias y pueden participar o no de los productos finales; representan la circulación de otros materiales a través del proceso. Por ejemplo, las corrientes de servicios a la producción como el agua, el vapor, el aire, etc.; las corrientes de insumos como colorantes,

aditivos, reactivos, etc. y otras corrientes que tendrán cada una sus equipos e instalaciones especiales. En algunos casos, se insertan otras informaciones que son de utilidad para el diseño, como por ejemplo los dispositivos para realizar las lecturas de las variables de la operación (la temperatura, la presión, el caudal, la concentración, etc.). También existen diagramas de flujo de energía (Sankey) donde se identifica la distribución de la energía conforme a los consumos que tiene cada sector, proceso, equipo, etc. de la planta industrial y que permiten hacer evaluaciones económicas de su rendimiento energético.

Cada corriente de materiales tiene sus características propias en cualquier punto del recorrido por el proceso industrial, de acuerdo al estado y a las condiciones en que se encuentra el material. Así, una materia prima desde que entra al proceso industrial va sufriendo modificaciones que pueden ser tanto moleculares como de su estado físico, las que se consiguen bajo condiciones operativas especiales. Lo mismo ocurre con las corrientes secundarias.

Las corrientes de materiales se definen según las siguientes características: 1) el estado físico del material que puede ser sólido, líquido o gaseoso; 2) las propiedades físico-químicas de los materiales como la presión, la temperatura, el volumen, la concentración, la viscosidad, la pureza, los sólidos en suspensión, el pH, etcétera; 3) la cantidad de material transportado por la corriente, o sea el caudal volumétrico o másico, molar, etcétera, y 4) si las variables definidas son constantes con el tiempo que sería para un sistema estacionario.

iii. Instalaciones auxiliares:

En un proceso químico industrial se integra un conjunto de otras disciplinas tecnológicas como, por ejemplo, las obras civiles que se deberán realizar para el acceso, el montaje y el mantenimiento de los equipos; las obras eléctricas de redes y tableros de energía para hacer funcionar los motores de los equipos; las instalaciones auxiliares de vapor, agua, aire, lubricación, etcétera, que puedan ser requeridas para la operación y el control del proceso. Asimismo, puede ser necesario disponer de sistemas de transporte y elevación para algunos equipos o partes de ellos, que, a su vez, pueden ser transitorios o definitivos.

Es posible que en esta instancia del proyecto no se conozcan, en profundidad, algunos de los componentes mencionados y, aun así, es un punto de partida de gran utilidad para realizar los primeros cálculos. El resto de las variables desconocidas se irá descifrando en la medida que se avance con el diseño del proceso. También se pueden definir opciones diferentes del proceso y, también, pueden ser tecnológicamente viables. Los diagramas de flujo de materiales se pueden realizar con cualquier programa informático que sea específico para ingeniería y empleando la computadora personal. En este manual se emplea *Visio de Microsoft* para realizar el diagrama de flujo de materiales.

b. Relevamiento del lugar: ¿qué espacio tenemos?

Es importante conocer previamente las posibilidades que ofrece el espacio físico de la planta industrial para la instalación, la operación y el mantenimiento de los equipos que forman parte del proceso. En este sentido se debe disponer de una planografía adecuada para el diseño, la construcción, el montaje, la operación y el mantenimiento de los equipos, teniendo presente los desplazamientos en altura y distancia requeridos en cada una de estas actividades.

c. Tipo de operación: ¿cómo será el funcionamiento del proceso tecnológico?

Forma parte de la definición de las condiciones operativas del equipo y del proceso. Se puede encontrar un gran número de situaciones con distinto grado de complejidad. Desde el extremo más complejo que puede ser: una operación continua del equipo y sincronizada con el proceso, donde, a su vez, la capacidad de producción y la calidad de los productos pueden ser también variables con el tiempo, en forma de picos, o bien gradual sin una frecuencia definida. El otro extremo sería: una operación discontinua del equipo con una frecuencia diaria definida, asincrónica con el proceso, con capacidad y calidad de productos constantes en el tiempo.

En una operación continua y sincrónica con el proceso, la instalación y el mantenimiento se realizarán durante las paradas programadas del proceso, ya que funcionan las 24 horas del día y todos los días del año.

Durante la marcha se hacen solamente mantenimientos mínimos como ser: lubricación y limpieza. En esta operación, se dispone a veces de equipos en paralelo y también depósitos de materiales sobredimensionados, para hacer frente a las emergencias. También requiere realizar controles de cantidad y calidad de productos muy ajustados, ya que cualquier fluctuación que no sea corregida en el momento impactará en los productos obtenidos.

La operación discontinua y asincrónica del equipo implica un menor compromiso con el proceso, pero la atención pasa por las operaciones de puesta en marcha y parada de equipos, donde se debe respetar la secuencia de las maniobras establecidas para evitar accidentes personales y daños mecánicos. Por otro lado, se debe disponer de los recipientes adecuados para mantener la disponibilidad de los productos y realizar las operaciones de limpieza y mantenimiento correctas, para evitar trancazos y daños mecánicos.

En un intento de establecer las condiciones para realizar la operación del equipo en el proceso, se indican algunos puntos a tener presente como, por ejemplo, la puesta en marcha, la marcha normal y la parada de los equipos, en los cuales es importante la secuencia para la carga y el vaciado del proceso, tanto como la ubicación de las purgas y las cañerías para el desagote y la recuperación de materiales. También se debe tener en cuenta si el proceso es continuo o discontinuo con relación al tiempo (turno, día o temporada), con relación al ciclo de la operación de los equipos (carga, operación, descarga y espera); si la capacidad de producción es constante o variable con el tiempo y en qué forma (pico o gradual); si la calidad de productos es constante o variable con el tiempo y en qué forma (pico o gradual); y si todo el proceso funciona sincronizado y en qué forma (permanente, transitoria o nunca) con otros equipos o procesos.

d. Los momentos del proyecto: ¿qué se hace primero?

Ya se dijo que para el diseño de una planta industrial se deben tener en cuenta los equipos y las instalaciones auxiliares para el funcionamiento de esos equipos, lo que implica realizar las actividades de diseño, construcción y montaje, para la operación y luego el mantenimiento de los equipos. Desde el diseño hasta la operación en marcha normal se presentan tres momentos que son el *antes*, *durante* y *después*. El diseño, la

construcción, la adquisición de los equipos principales y accesorios y demás elementos que componen la instalación, hasta la puesta en marcha, forman parte del *antes*. En este momento es importante tener presente que pueden haber estructuras, obras civiles, etc., que son accesorias y transitorias, empleadas solo para el montaje de ciertos equipos y luego se desmontan. Lo mismo ocurre con instalaciones existentes que deben removerse para el ingreso de algún equipo y que luego se deben reinstalar.

El montaje de los equipos es el *durante*, ya que se caracteriza por una serie de actividades muy bien organizadas y coordinadas previamente. Recepción de materiales, construcción de los sistemas de transporte, construcción de las obras civiles y eléctricas para el montaje de los equipos y los elementos accesorios son algunas de ellas. Cuando es una modificación dentro de un proceso que está en marcha, una parte de estas actividades se realizará externamente en una etapa de preparación de todos los elementos necesarios, quedando para una parada programada las partes faltantes.

El *después* incluye la puesta en marcha de los equipos y el mantenimiento posterior. La puesta en marcha se realiza según una secuencia prediseñada, realizando el ajuste de las distintas variables del proceso hasta alcanzar el ritmo de capacidad normal. Es el momento de las sorpresas, que justamente se pueden evitar realizando previamente un trabajo profesional garantizado durante el diseño de los equipos y del proceso. El mantenimiento de los equipos y las instalaciones puede ser predictivo, preventivo o correctivo. En el caso de ser predictivo, existen metodologías para determinar cuál puede ser la vida útil de los equipos operando bajo ciertas condiciones operativas y que son características para los distintos tipos de industrias. De esa forma antes de que ocurra un evento se realiza el mantenimiento del equipo. En caso preventivo, el mantenimiento se realiza cumplida cierta cantidad de horas de marcha, más allá de que pueda presentar fallas. Cuando es correctivo, el mantenimiento se realiza una vez que el equipo dijo basta.

De hecho que, en el análisis operativo, será necesario contar con los conocimientos y experticia de otras personas especializadas (ingenieros y operarios) que luego también participarán en el diseño, el montaje y la puesta en marcha del proyecto.

6) Objetivos del proyecto: ¿qué queremos lograr?

Es el momento de estimar cuáles pueden ser las soluciones que se quieren proponer al problema o necesidad planteada. Deben expresarse en términos de resultados a alcanzar. Redactarlos usando términos de acción que sugieren resultados concretos (Ej.: alcanzar, determinar, evaluar, etc.). Definirlos como una guía para la acción a realizar en el trabajo, es decir que se hará en el trabajo. En la medida de lo posible deben ser cuantificables, cuali o cuantitativamente. El número de objetivos debe ser reducido pero significativo en términos de resultados, definirlos de acuerdo con los recursos y las capacidades técnicas disponibles. Pueden ser generales o específicos según el alcance y la profundidad de los mismos. De una manera muy simple se puede enunciar que, los objetivos generales tienen que ver con el resultado más relevante del proyecto, en cambio los objetivos específicos definen los resultados parciales a obtener dentro de los objetivos generales.

7) Método de cálculo: ¿qué camino vamos a seguir?

Se presenta el desarrollo completo del cálculo para el diseño tecnológico, comenzando por un relevamiento de las herramientas a emplear y siguiendo por el procedimiento que se empleará para obtener los resultados numéricos esperados.

a. Caja de herramientas para el diseño: ¿con qué contamos?

En este lugar se concentra el conjunto o inventario de herramientas conceptuales y de apoyo que va a emplear el ingeniero químico para el diseño de los equipos y del proceso industrial. Las herramientas conceptuales son los aspectos disciplinares que dan el sustento teórico al trabajo de diseño, y que se traducen en simples ecuaciones o correlaciones, donde las distintas variables participan en un juego de importancia relativa. Las herramientas de apoyo son el conjunto de gráficos, tablas, catálogos y otros elementos producidos por investigadores y fabricantes de equipos para facilitar el trabajo de diseño y selección de equipos. Se debe tener presente que las herramientas conceptuales fueron deducidas bajo ciertas condiciones operativas del proceso, fuera de lo cual no son válidas y será un error emplearlas sin hacerle las correcciones que sean necesarias. Cada una de las

herramientas se debe identificar con un número para ser empleadas en el flujograma que se indica en el punto siguiente. Se debe consignar también, con las herramientas, el origen de la información y adjuntar la bibliografía que corresponda.

b. Flujograma de cálculo: ¿cuál será el camino a seguir?

En el punto correspondiente al análisis operativo del proceso, se comentó la importancia que tiene el diagrama de flujo de materiales donde se identifican los equipos y las corrientes de un proceso industrial para su diseño. De la misma forma, un flujograma o diagrama de bloques será de utilidad para visualizar el camino a seguir en el desarrollo de los cálculos hasta alcanzar los resultados previstos. Se identifican por un lado las variables de interés y, por otro lado, las herramientas empleadas para realizar los cálculos. Se pueden realizar con cualquier programa informático que sea específico para ingeniería y empleando la computadora personal. En este manual, se emplea *Visio de Microsoft* para realizar estos diagramas.

c. Cálculos: ¿a trabajar entonces?

Implica asignar los valores que correspondan a las variables y realizar los cálculos para obtener los resultados del diseño conforme a lo planteado en los puntos anteriores. Se pueden realizar con cualquier programa informático de cálculo que sea específico para ingeniería y empleando la computadora personal. En este manual se emplea como herramienta informática el *Math-Cad de PTC*.

8) Resultados del diseño: ¿qué debo informar?

Una vez obtenidos los resultados, es el momento para responder a las preguntas: ¿Qué debo informar? ¿Cuáles son los datos y resultados más significativos, desde el punto de vista de la toma de decisiones? Se deberá realizar una lista con las variables o los parámetros más importantes obtenidos empleando criterios de selección para evitar sobreabundancia de valores informados. La selección debe ser conforme a los objetivos propuestos y, de ser necesario, se debe emplear cuadros comparativos de las distintas situaciones analizadas.

9) Discusión de los resultados: ¿qué pasa si...?

Superada la etapa del cálculo, llega el momento de pensar como ingeniero y de activar todos los conocimientos y las experiencias adquiridas en la vida de estudiante y profesional, a partir de un profundo análisis de los resultados obtenidos, para determinar cuál de las opciones tecnológicas analizadas es la más recomendable y, también, estimar lo que puede ocurrir si cambian las condiciones operativas del proceso, o las características de la instalación, etc. para evaluar el impacto sobre el diseño realizado. Se debe responder tantas veces como sea necesario a la pregunta ¿Qué pasa si...? cambia el caudal, la concentración, la temperatura, la presión, la altura, la distancia a un sistema de referencia, el tamaño de los recipientes, etc.

Es una forma de poner a prueba el equipo y/o el proceso diseñado conforme a otras situaciones operativas diferentes a la propuesta inicial, pero que pueden presentarse o no en el futuro. Es el momento para debatir con los pares y/o especialistas de las áreas de producción y mantenimiento sobre los posibles beneficios o no de hacer otras propuestas. Se deben revisar los cálculos, de ser necesario, con las nuevas propuestas y/o sugerencias.

10) Conclusiones y recomendaciones: ¿se han cumplido los objetivos propuestos?

Significa redondear la propuesta de solución tecnológica, mencionando en forma resumida qué resultados se obtuvieron, más las sugerencias y/o las recomendaciones que se puedan realizar, con el objeto de aportar más claridad a la hora de tomar decisiones sobre la conveniencia de optar por alguna de las opciones analizadas. Sobre estas opciones, se presentan los cuadros comparativos.

11) Nomenclatura y abreviaturas: ¿qué tengo que aclarar?

Se debe presentar la lista explicativa de los símbolos empleados a lo largo del trabajo para definir variables y/o situaciones especiales. Generalmente, las variables se identifican con el mismo símbolo más allá de las unidades empleadas. Las abreviaturas se emplean para ahorrar tiempo y/o espacio y acaban con punto.

12) Bibliografía: ¿de dónde saqué la información?

Las fuentes originales consultadas para la realización del trabajo deben ser identificadas y presentadas según el orden de aparición en el texto y conforme a las normas APA (American Psychological Association).

13) Apéndice: ¿tengo que hacer algunas aclaraciones?

Se informa todo lo que puede resultar de utilidad para ampliar, clarificar y justificar la información vertida en el informe tecnológico, como ser: métodos de cálculo, resultados experimentales, deducciones matemáticas, cálculos adicionales, cuadros, figuras, ejemplos, etc.

Finalmente, el diseño en ingeniería química es un trabajo interdisciplinario donde el intercambio de opiniones es de vital importancia. Deben participar todos los actores que, de una manera directa o indirecta, están relacionados con la construcción, el montaje, la puesta en marcha, el funcionamiento y el mantenimiento de los equipos y las instalaciones del proceso industrial. Aun así, siempre hay un camino para recorrer en el diseño de procesos industriales, que es exclusivo del ingeniero químico y para eso es este manual, un bastón para caminar por los senderos de la vida profesional... ¡Entonces!... ¡¡¡Al abordaje!!!

CAPÍTULO 2

Diseño de sistemas para el transporte de fluidos

Aplicaciones industriales: Sistemas de transporte de fluidos líquidos y gaseosos.

Dimensionado de los tanques:

$$R_t = \frac{H_l}{D_t}$$

$$D_t = \sqrt[3]{\frac{4Q\theta_r}{\pi R_t}}$$

$$H_t = R_t D_t + H_r \quad (1)$$

Diámetro y espesor de las cañerías:

$$Q = \bar{v}_1 A_1 = \bar{v}_2 A_2$$

$$Q = \bar{v} A = \bar{v} \frac{\pi D^2}{4} \quad (2)$$

$$D_c = \sqrt{\frac{4Q_{op}}{\pi v_d}} \quad (3)$$

$$D_{eq} = 4R_h = 4 \frac{S_p}{P_m}$$

$$Cédula \cong 1000 \frac{P}{\sigma} = \frac{P}{1,2} \quad (4)$$

Velocidad media vs. Velocidad máxima del fluido:

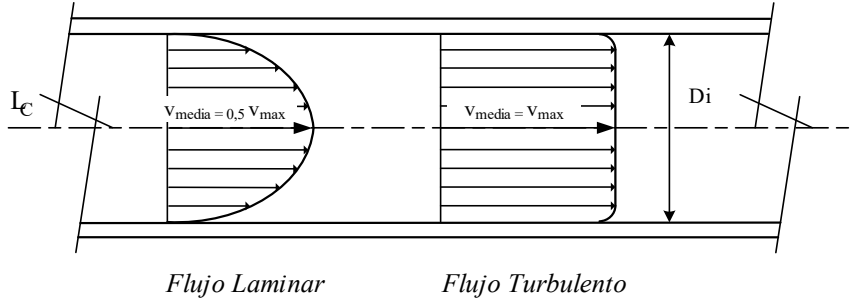


Fig. 2.1. Perfil de velocidad para un fluido circulando por conductos circulares.

Tipo de flujo (Número de Reynolds):

$$R_e = \frac{D_{eq} \bar{v} \rho}{\mu} = \frac{D_{eq} G}{\mu} \begin{cases} < 2000 \\ 2000 - 4000 \\ > 4000 \end{cases} \begin{array}{l} \textit{Flujo laminar} \\ \textit{Flujo de transición} \\ \textit{Flujo turbulento} \end{array}$$

Masa Velocidad:

$$G = \frac{W}{a} = \bar{v} \rho$$

Pérdida de carga por fricción:

$$W_f = f \frac{\bar{v}^2}{2g_c} \sum \frac{L}{D} \quad (5)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left\{ \frac{1}{3.7065} \left(\frac{\varepsilon}{D} \right) - \frac{5.0452}{R_e} \log \left[\frac{1}{2.8257} \left(\frac{\varepsilon}{D} \right)^{1.1098} + \frac{5.8506}{R_e^{0.8981}} \right] \right\} \quad (FT)$$

Balance de energía para un sistema de transporte de fluidos:

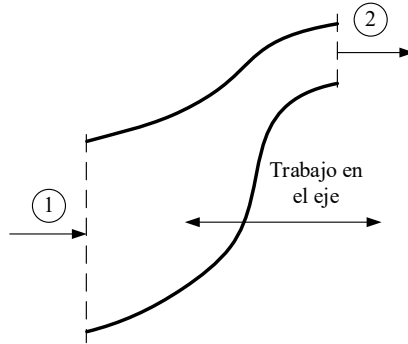


Fig. 2.2. Esquema de un sistema para el transporte de fluidos.

Balance de energía para el transporte de fluidos compresibles:

$$W = W_1 = W_2$$

$$W = G_1 A_1 = G_2 A_2$$

$$\int_{P_1}^{P_2} V dP + \int_{z_1}^{z_2} \frac{g}{g_c} dz + \int_{v_1}^{v_2} \frac{G^2 V dV}{\alpha g_c} + \int_{L_1}^{L_2} \frac{f G^2 V^2}{2 g_c D} dL = W$$

Balance de energía para el transporte de fluidos incompresibles:

$$\Delta P + \Delta Z + \Delta \bar{v}^2 + W_f = W$$

$$\frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta Z g}{g_c} + \frac{\Delta \bar{v}^2}{2\alpha g_c} + W_f = W \quad (6)$$

$$\frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{(Z_2 - Z_1)g}{g_c} + \frac{\bar{v}_2^2 - \bar{v}_1^2}{2\alpha g_c} + f \frac{\bar{v}^2}{2g_c} \sum \frac{L}{D} = W$$

Potencia teórica de la bomba o ventilador:

$$W' = WQ\rho \quad (7)$$

Sistemas gravimétricos para el transporte de fluidos

Balance de energía para un sistema gravimétrico:

$$\frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{(Z_2 - Z_1)g}{g_c} + \frac{\bar{v}_2^2 - \bar{v}_1^2}{2\alpha g_c} + f \frac{\bar{v}^2}{2g_c} \sum \frac{L}{D} = 0$$

Balance de energía para el sistema de la Fig. 2.3:

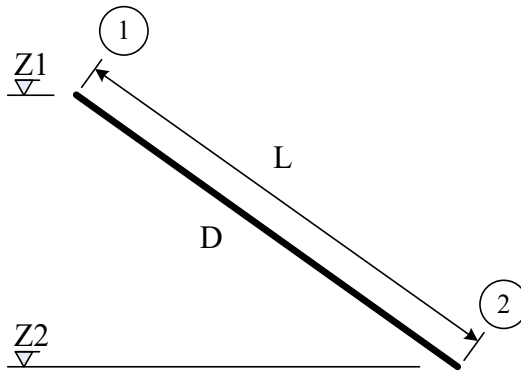


Fig. 2.3. Sistema de transporte gravimétrico autobalanceado.

$$\frac{Z_1 g}{g_c} = \frac{Z_2 g}{g_c} + \frac{P_2 - P_1}{\rho} + f \frac{\bar{v}^2}{2g_c} \sum \frac{L}{D} \quad (8)$$

Flujograma de cálculo para el sistema la Fig.2.3:

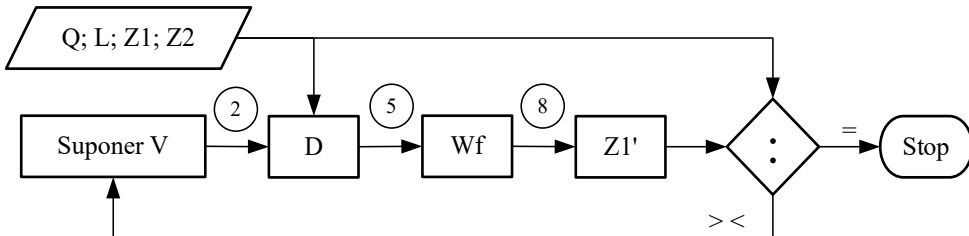


Fig. 2.4. Flujograma de cálculo para el diámetro de cañería de la Fig. 2.3.

Balance de energía para el sistema de la Fig. 2.5:

$$\frac{Z_1 g}{g_c} = \frac{Z_2 g}{g_c} + \frac{\bar{v}_2^2}{2\alpha g_c} + f \frac{\bar{v}_2^2}{2g_c} \sum \frac{L}{D} \quad (9)$$

$$\sum \frac{L}{D} = \left(\frac{L}{D}\right)_{\text{Contracción brusca}} + \left(\frac{L}{D}\right)_{\text{Long. recta}} + \left(\frac{L}{D}\right)_{\text{Válvula globo}}$$

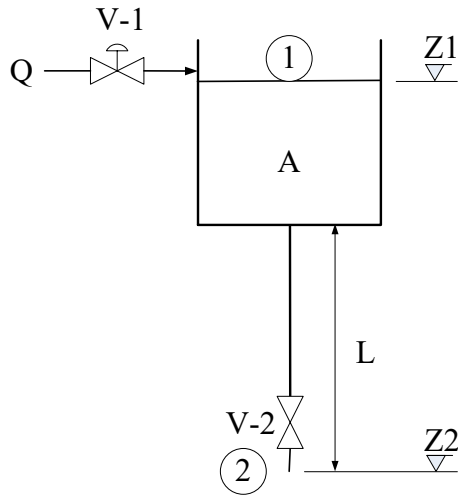


Fig. 2.5. Tanque domiciliario para el abastecimiento de agua.

Flujograma de cálculo para el sistema de la Fig. 2.5:

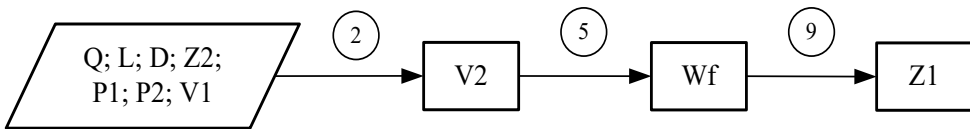


Fig. 2.6. Flujograma para el cálculo de la altura de un tanque domiciliario.

Balance de energía para el sistema de la Fig. 2.7:

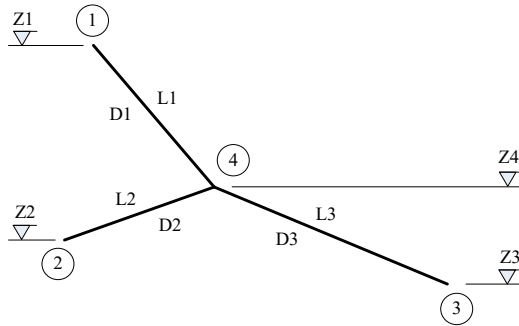


Fig. 2.7. Sistema gravimétrico autobalanceado con cañerías ramificadas.

$$Q_1 = Q_2 + Q_3$$

$$(1 - 4)\Delta P_1 + \Delta Z_1 + W_{f1} = 0 \quad \rightarrow \quad P_4 = P_1 - \Delta Z_1 - W_{f1} \quad (10)$$

$$(4 - 2)\Delta P_2 + \Delta Z_2 + W_{f2} = 0 \quad \rightarrow \quad P_4 = P_2 + \Delta Z_2 + W_{f2} \quad (11)$$

$$(4 - 3)\Delta P_3 + \Delta Z_3 + W_{f3} = 0 \quad \rightarrow \quad P_4 = P_3 + \Delta Z_3 + W_{f3} \quad (12)$$

Flujograma de cálculo para el sistema de la Fig. 2.7:

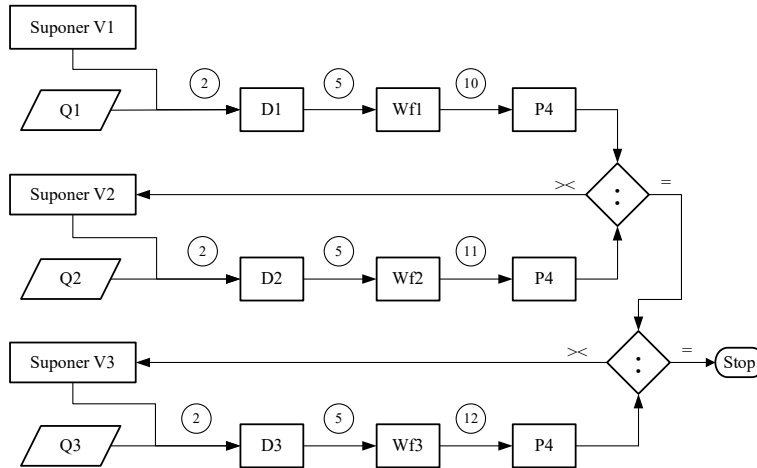


Fig. 2.8. Flujograma de cálculo para el diámetro de las cañerías (Fig. 2.7)

Espesor de la cañería:

$$P_2 = P_1 + \frac{Z_1 g \rho}{g_c} \quad (13)$$

Flujograma de cálculo del espesor de la cañería:

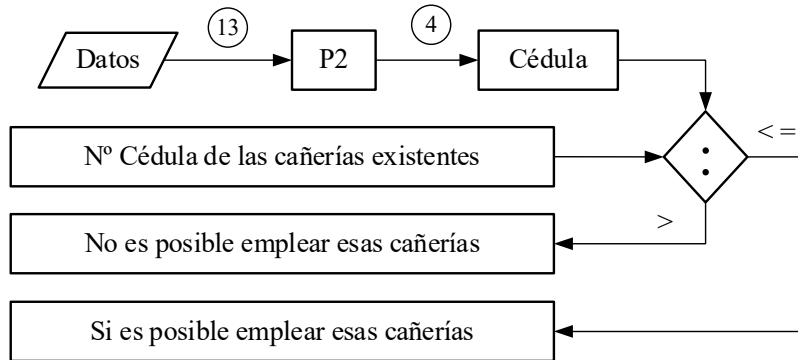


Fig. 2.9. Flujograma para la selección del espesor de cañerías.

Sistemas forzados para el transporte de fluidos incompresibles

La instalación para el transporte forzado de fluidos:

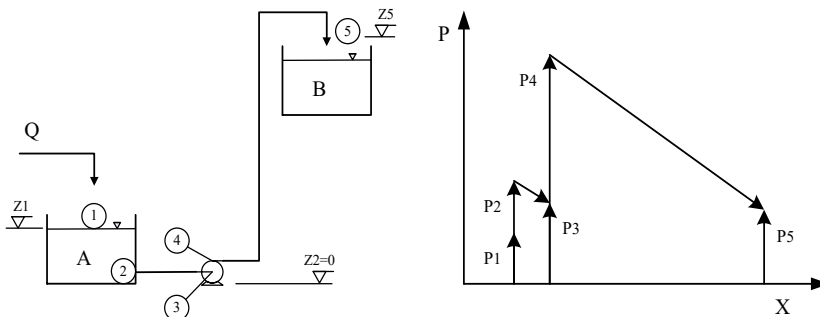


Fig. 2.10. Perfil de presión para un sistema de transporte forzado.

Sistema de transporte forzado con bomba centrífuga:

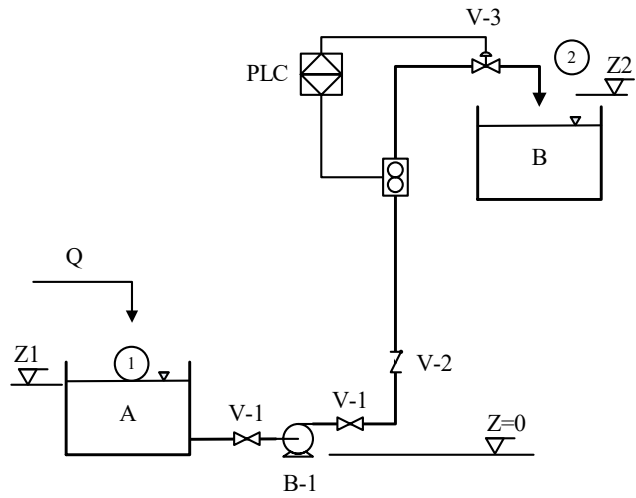


Fig. 2.11. Sistema forzado con bomba centrífuga para el transporte de fluidos.

Sistema de transporte forzado con bomba rotativa:

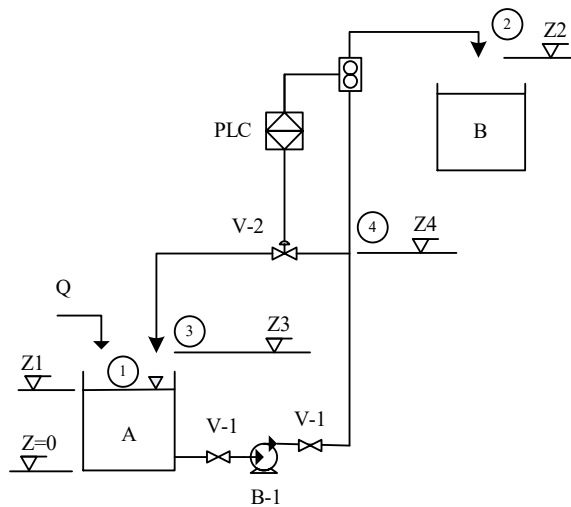


Fig. 2.12. Sistema forzado con bomba rotativa para el transporte de fluidos.

Balace de energía para el transporte forzado de la Fig. 2.11:

$$\frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta Z g}{g_c} + \frac{\Delta \bar{v}^2}{2\alpha g_c} + W_f = W$$

$$D_c = \sqrt{\frac{4Q_{op}}{\pi v_d}}$$

$$W_f = f \frac{v_d^2}{2g_c} \sum \frac{L}{D}$$

$$\begin{aligned} \sum \frac{L}{D} = & \left(\frac{L}{D}\right)_{\text{Contracción brusca}} + \left(\frac{L}{D}\right)_{\text{Long. recta}} + 2\left(\frac{L}{D}\right)_{\text{Válvula exclusiva}} \\ & + 3\left(\frac{L}{D}\right)_{\text{Codo } 90^\circ} + \left(\frac{L}{D}\right)_{\text{Válvula retención}} + \left(\frac{L}{D}\right)_{\text{Válvula globo}} \end{aligned}$$

$$\frac{(Z_2 - Z_1)g}{g_c} + \frac{\bar{v}_2^2}{2\alpha g_c} + W_f = W$$

Balace de energía para la Fig. 2.11 empleando la bomba para el desagote del sistema:

$$\frac{Z_2 g}{g_c} + \frac{\bar{v}_2^2}{2\alpha g_c} + W_f = W \quad (14)$$

Curva operativa para un sistema de transporte de fluidos:

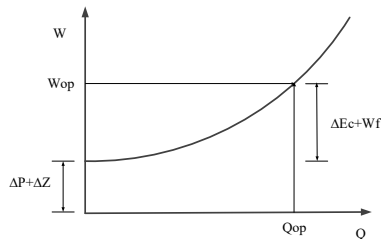


Fig. 2.13. Curva operativa del sistema forzado para el transporte de fluidos.

Los equipos para la operación:

| Bombas | | |
|-------------------------|------------------------|--------------------------|
| Flujo continuo | Centrífugas | Simple y múltiple efecto |
| | | Doble aspiración |
| Desplazamiento positivo | Alternativas | Diafragma |
| | | Pistón simple y múltiple |
| | Rotativas | Tornillo sin fin |
| | | Engranajes |
| | | Paletas |
| | | Lobulares |
| Ventiladores | | |
| Flujo continuo | Axiales | Simple efecto |
| | Radiales o centrífugos | Simple efecto |
| Compresores | | |
| Flujo continuo | Axiales | Simple y múltiple efecto |
| | Radiales o centrífugos | Simple y múltiple efecto |
| Desplazamiento positivo | Alternativos | Pistón simple y múltiple |

Fig. 2.14. Clasificación de bombas, ventiladores y compresores.

Selección de bombas centrífugas: Curvas características vs. Curva operativa del sistema.

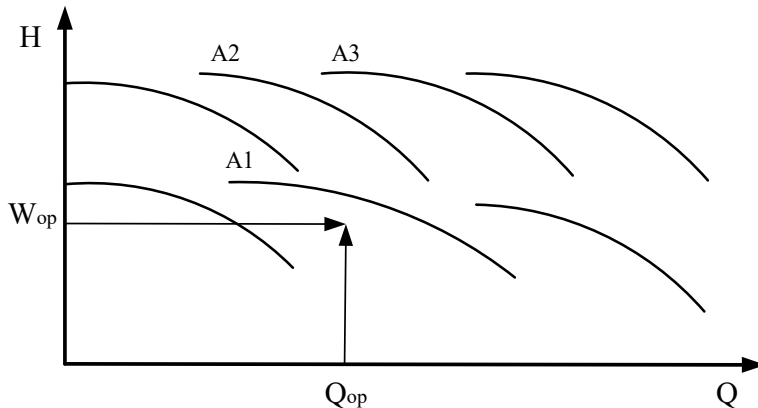


Fig. 2.15. Curvas características para distintos modelos de bombas centrífugas.

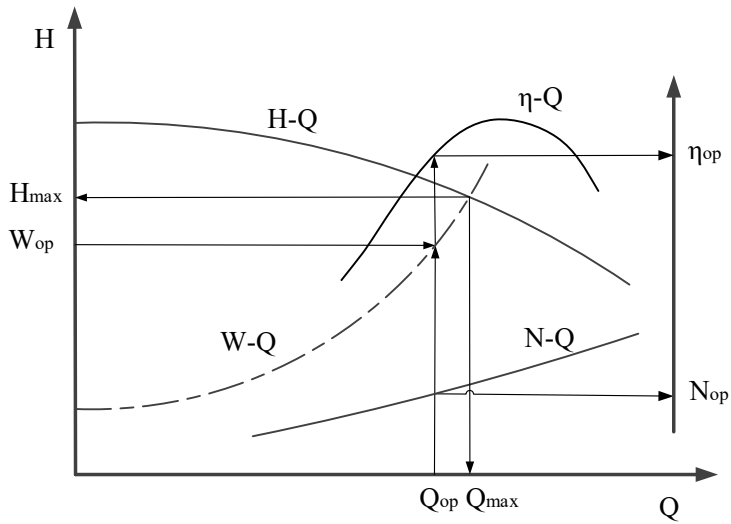


Fig. 2.16. Curvas características de una bomba centrífuga y curva operativa del sistema.

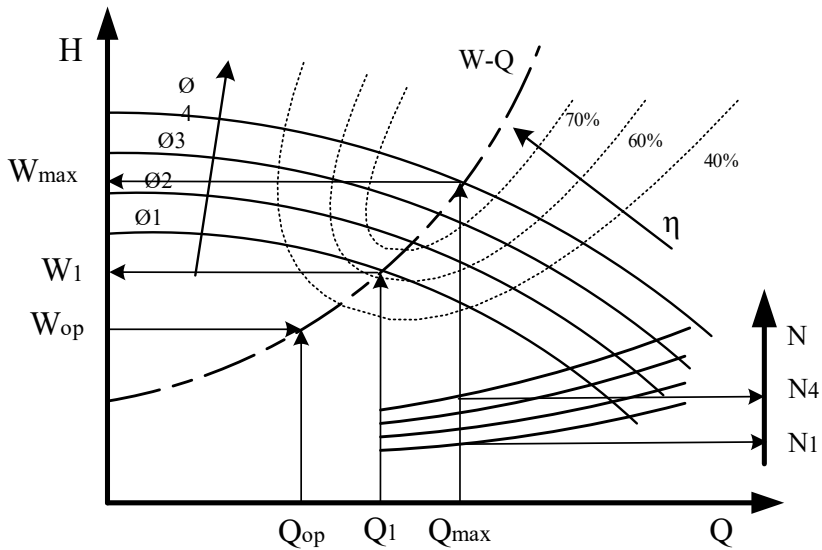


Fig. 2.17. Curvas características de una bomba centrífuga con impulsores intercambiables y curva operativa del sistema.

Conexión de bombas centrífugas en serie:

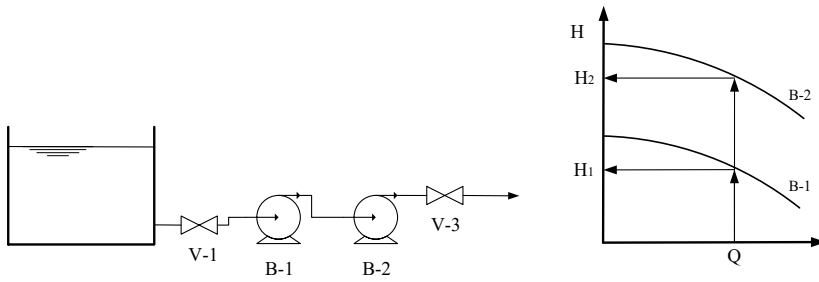


Fig. 2.18. Bombas centrífugas en serie.

Conexión de bombas centrífugas en paralelo:

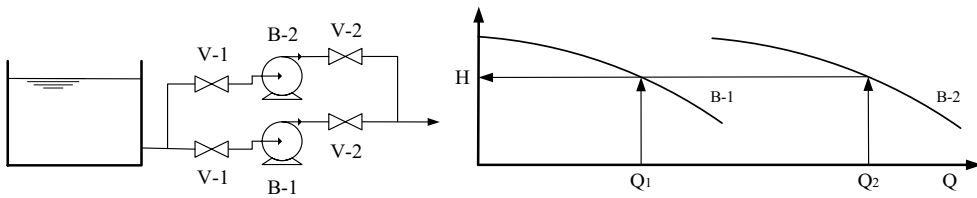


Fig. 2.19. Bombas centrífugas en paralelo.

Verificación del espesor de la cañería:

$$\text{Cédula} = H_{max}/1,2 \quad (15)$$

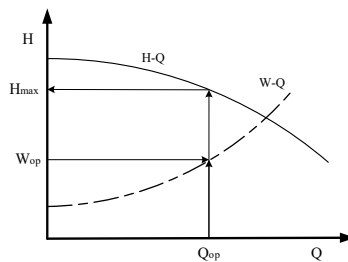


Fig. 2.20. Altura máxima de la bomba y curva operativa.

Balace de energía para el tramo de aspiración (Fig. 2.12) (Cavitación):

$$NPSH_c = \frac{P_2}{\rho} + \frac{\bar{v}_2^2}{2\alpha g_c} - \frac{P_v}{\rho}$$

$$W_{f1} = f_1 \frac{\bar{v}_1^2}{2g_c} \sum \left(\frac{L}{D}\right)_1 \quad (16)$$

$$NPSH_c = \frac{P_1}{\rho} + \frac{Z_1 g}{g_c} + \frac{\bar{v}_1^2}{2\alpha g_c} - \left[\frac{Z_2 g}{g_c} + W_{f1} + \frac{P_v}{\rho} \right] \quad (17)$$

$$NPSH_c \geq NPSH_r$$

Proporcionalidades de las bombas centrifugas.

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\sqrt[2]{H_1}}{\sqrt[2]{H_2}} = \frac{\sqrt[3]{N_1}}{\sqrt[3]{N_2}}$$

Flujograma de cálculo para el sistema de la Fig.2.11:

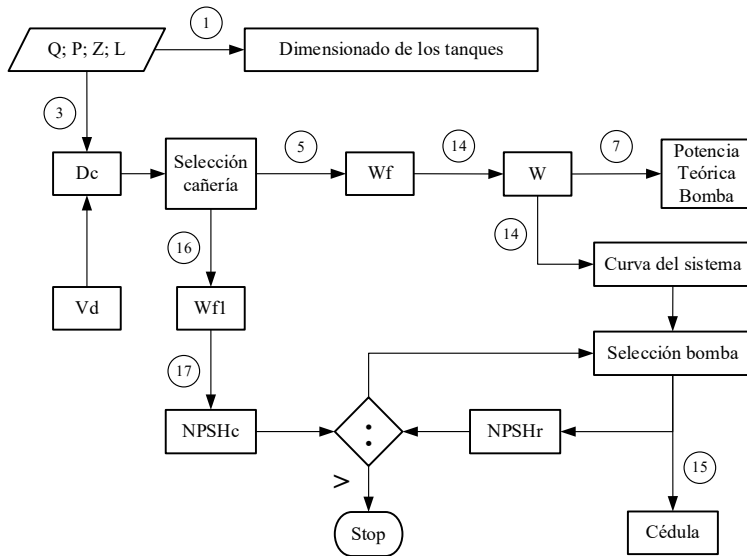


Fig. 2.21. Flujograma de cálculo para el sistema de transporte de fluidos.

CAPÍTULO 3

Diseño de equipos para la separación de fases: Tamices y elutriadores

Aplicaciones industriales: Clasificación de minerales; Despalillado del tabaco.

Análisis por tamizado de partículas sólidas:

| Tamices Tyler | | |
|------------------|-----------------------|-------|
| Malla Nº | Tamaño de la abertura | |
| | Pulgadas | mm |
| ... | 3,00 | 76,20 |
| 2 ^{1/2} | 0,312 | 7,925 |
| ... | ... | ... |
| 16 | 0,039 | 0,991 |
| ... | ... | ... |
| 400 | 0,0015 | 0,038 |

Fig. 3.1. Tamices Tyler.

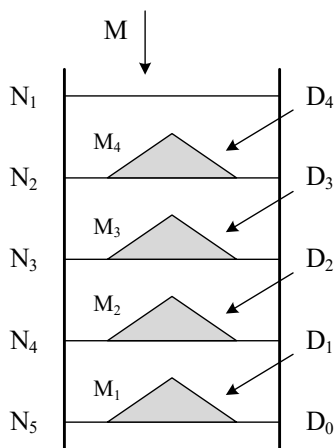


Fig. 3.2. Resultado experimental del análisis por tamizado.

| Tamices Tyler | | | | | | |
|----------------|----|---------------|------------------------|-------|--------------------------------|----|
| Malla N° | | Abertura (mm) | Diámetro de partículas | | Fracción másica retenida (f %) | |
| N ₁ | 6 | 3,327 | - | - | - | |
| N ₂ | 8 | 2,362 | D ₄ | 3,327 | f ₄ | 10 |
| N ₃ | 10 | 1,651 | D ₃ | 2,362 | f ₃ | 30 |
| N ₄ | 14 | 1,168 | D ₂ | 1,651 | f ₂ | 50 |
| N ₅ | 20 | 0,833 | D ₁ | 1,168 | f ₁ | 10 |
| Total muestra | | | | | 100 | |

Fig. 3.3. Resultado experimental del análisis por tamizado.

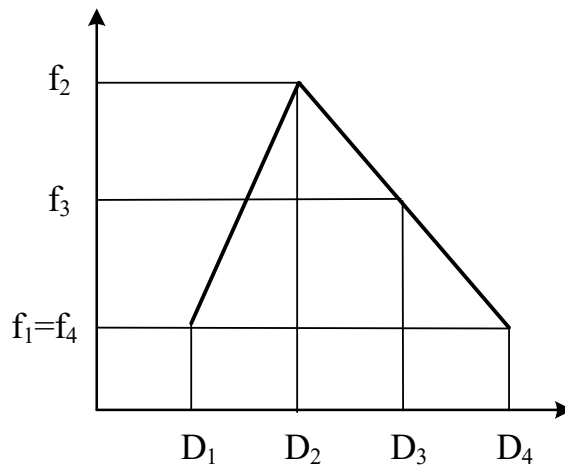


Fig. 3.4. Resultado experimental del análisis por tamizado.

Procesos para la separación de partículas sólidas por tamizado

Esquema de los procesos:

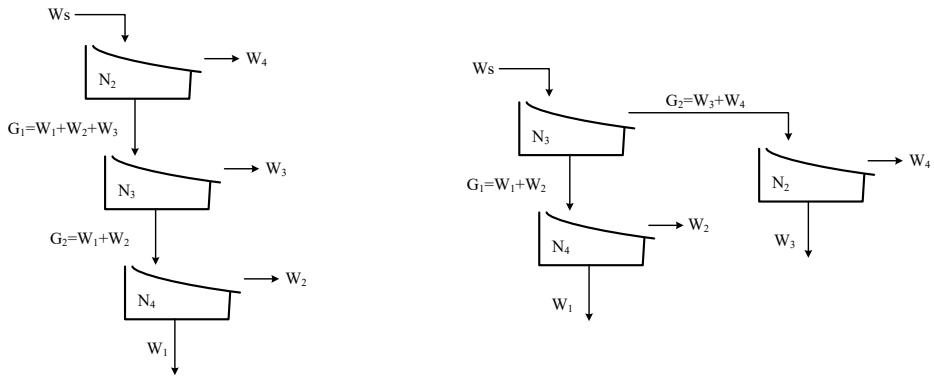


Fig. 3.5. Procesos para la separación fraccionada de partículas sólidas con tamices.

Separación de una mezcla monocomponente con alimentación seca

Esquema de la operación:

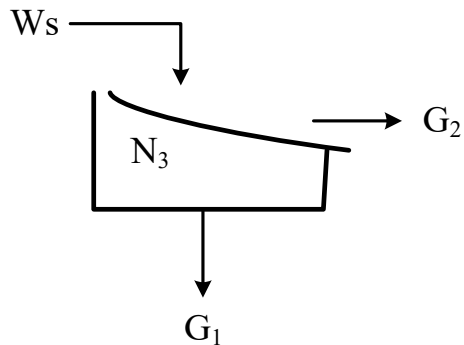


Fig. 3.6. Separación monocomponente con alimentación seca.

Corriente de alimentación:

$$W_s = W_1 + W_2 + W_3 + W_4$$

$$f_i = \frac{W_i}{W}$$

Corrientes de salida:

$$G_1 = W_1 + W_2$$

$$G_2 = W_3 + W_4$$

Balace de masas:

$$W_s = G_1 + G_2$$

Eficiencia de la separación:

$$\eta_t = \frac{(W_1 + W_2)G_2}{(W_1 + W_2)W_s}$$

Separación de una mezcla monocomponente con alimentación húmeda

Esquema de la operación:

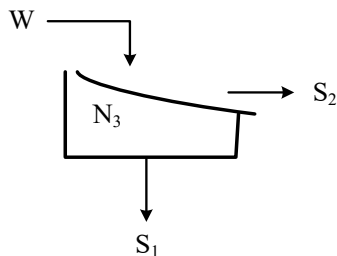


Fig. 3.7. Separación monocomponente con alimentación húmeda.

Corriente de alimentación:

$$W = W_s + Q_s \rho$$

$$C_s = \frac{W_s}{Q_s}$$

$$W_s = W_1 + W_2 + W_3 + W_4$$

$$f_i = \frac{W_i}{W}$$

$$W_s = W_A + W_B$$

$$x_A = \frac{W_A}{W}$$

$$x_{Ai} = \frac{W_{Ai}}{W_i}$$

Corrientes de salida:

$$S_1 = G_1 + Q_1 \rho$$

$$C_1 = \frac{G_1}{Q_1}$$

$$G_1 = W_1 + W_2$$

$$G_{1A} = W_{1A} + W_{2A}$$

$$G_{1B} = W_{1B} + W_{2B}$$

$$y_A = \frac{W_A}{G_1}$$

$$y_{Ai} = \frac{W_{Ai}}{G_i}$$

Balance de masas:

$$W_s = G_1 + G_2$$

$$Q_s = Q_1 + Q_2$$

Eficiencia de la separación:

$$\eta_t = \frac{(W_1 + W_2)G_1}{(W_1 + W_2)W_s}$$

Separación fluidodinámica de fases sólidas

Velocidad Terminal de las partículas:

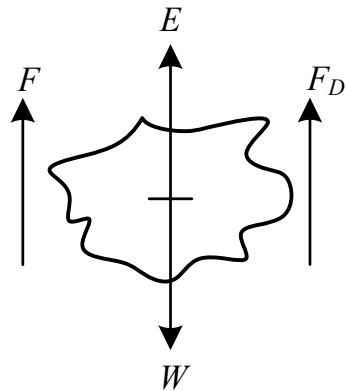


Fig. 3.8. Fuerzas actuantes sobre una partícula.

$$v_t = \frac{g(\rho_s - \rho)D_p^2}{18\mu} (FL) \quad (1)$$

$$v_t = \sqrt{\frac{4(\rho_s - \rho)gD_p}{3\rho C_D}} (FT) \quad (2)$$

$$C_D = \frac{24}{Re_m} = \frac{24\mu}{D_p v_t \rho} (FL) \quad (3)$$

Reynolds modificado para el movimiento de partículas en el seno de un fluido:

$$Re_m = \frac{D_p v_t \rho}{\mu}$$

Coefficiente de arrastre de Haider y Levenspiel (1989) para flujo turbulento:

$$C_D = \frac{24}{Re_m} \left[1 + (8.171e^{(-4.0655\varphi)}) Re_m^{(0.0964+0.5565\varphi)} \right] + \frac{73.69e^{(-5.0748\varphi)} Re_m}{Re_m + 5.378e^{(6.2122\varphi)}} \quad (4)$$

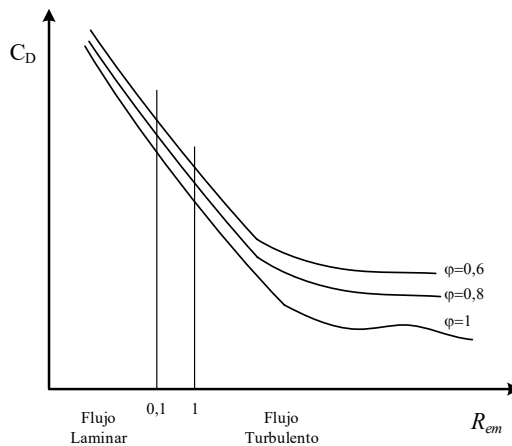


Fig. 3.9. Coeficiente de arrastre C_D en función del Re modificado.

Esfericidad de una partícula:

$$\varphi = \frac{A_o}{A_p} \leq 1$$

$$\varphi = \frac{\pi \left(\frac{6V_p}{\pi}\right)^{2/3}}{A_p} \leq 1$$

Curvas de separación fluidodinámica de fases:

$$\text{Log}C_D = -2\text{Log}R_{em} + \text{Log} \left[\frac{4gD_p^3\rho(\rho_s - \rho)}{3\mu^2} \right]$$

$$\text{Log}C_d = -2\text{Log}R_{em} + \text{Log}[A]$$

$$v_t = \frac{R_{em}\mu}{D_p\rho}$$

$$\text{Log}C_D = \text{Log}R_{em} + \text{Log} \left[\frac{4g\mu(\rho_s - \rho)}{3\rho^2v_t^3} \right]$$

$$\text{Log}C_D = \text{Log}R_{em} + \text{Log}[B]$$

$$D_p = \frac{R_{em}\mu}{v_t\rho}$$

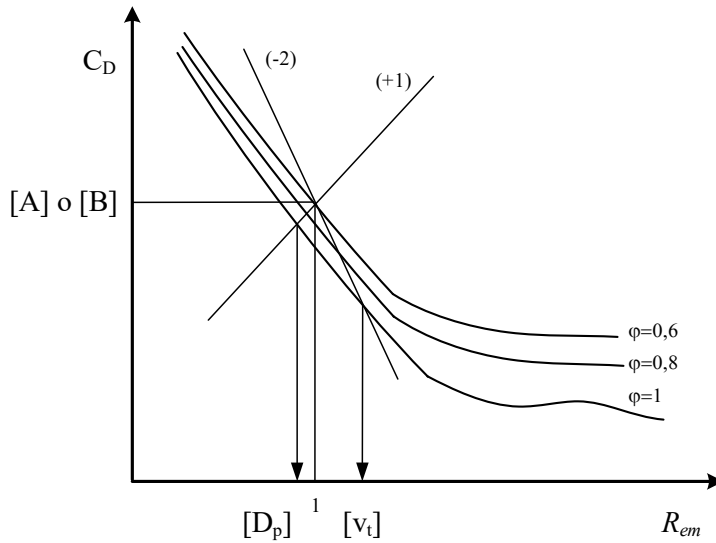


Fig. 3.10. Determinación gráfica de la v_t y/o el D_p

Relación de separación multicomponente por tamaño de partículas:

$$R_{t(1-2)} = D_1/D_2 \quad (5)$$

$$R_{t(i-x)} = D_i/D_x$$

| Gama de tamaños | | Relación de separación por tamaño |
|-----------------|---------------------|-----------------------------------|
| Menor | $G_1: (D_1 - D_2)$ | $R_{t(1-2)} = D_1/D_2$ |
| Menor | $G_2: (D_2 - D_3)$ | $R_{t(2-3)} = D_2/D_3$ |
| Menor | $G_3: (D_3 - D_4)$ | $R_{t(3-4)} = D_3/D_4$ |
| Media | $G'_1: (D_1 - D_3)$ | $R_{t(1-3)} = D_1/D_3$ |
| Media | $G'_2: (D_2 - D_4)$ | $R_{t(2-4)} = D_2/D_4$ |
| Mayor | $G_4: (D_1 - D_4)$ | $R_{t(1-4)} = D_1/D_4$ |

Fig. 3.11. Relación de separación por gama de tamaños.

Relación de separación multicomponente por densidad de los sólidos:

$$R_{sd} = \left[\frac{(\rho_B - \rho)}{(\rho_A - \rho)} \right]^a \quad a = \frac{1}{2} (FL) ; a = 1 (FT) \quad (6)$$

Condición de separación fluidodinámica:

$$R_{t(i-x)} \geq R_{sd} = \left[\frac{(\rho_B - \rho)}{(\rho_A - \rho)} \right]^a$$

Procesos para la separación de partículas sólidas por elutriación

Separación de una mezcla monocomponente con alimentación seca:

Curva de separación:

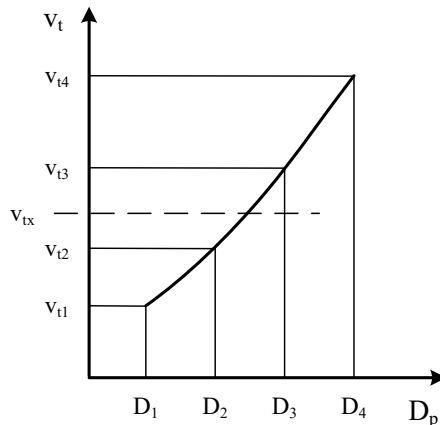


Fig. 3.12. Curva de separación monocomponente.

Esquema de la operación:

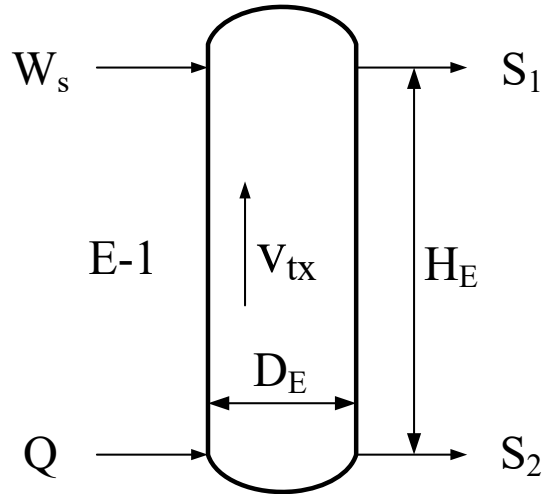


Fig. 3.13. Elutriador monocomponente con alimentación seca.

Corrientes de alimentación:

$$W_s = G_1 + G_1$$

Corrientes de salida:

$$S_1 = G_1 + Q_1\rho$$

$$S_2 = G_2 + Q_2\rho$$

$$G_1 = W_1 + W_2$$

$$G_2 = W_3 + W_4$$

$$C_1 = \frac{G_1}{Q_1}$$

$$C_2 = \frac{G_2}{Q_2}$$

Balance de masas:

$$W_s + Q\rho = S_1 + S_2$$

$$Q = Q_1 + Q_2$$

Dimensionado del equipo:

$$Q_1 = v_t A_E = v_t \frac{\pi D_E^2}{4}$$

$$D_E = \sqrt{\frac{4Q_1}{\pi v_t}} \quad (7)$$

$$H_E = 3A_E \quad (8)$$

Eficiencia de la separación fluidodinámica:

$$\eta_E = \frac{G_1}{G_{1W}}$$

Separación de una mezcla monocomponente con alimentación húmeda

Curva de separación: Fig. 3.12.

Esquema de la operación:

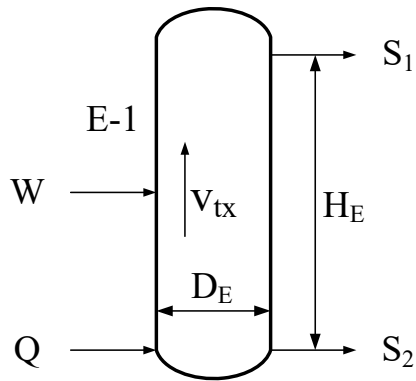


Fig. 3.14. Elutriador monocomponente con alimentación húmeda.

Corrientes de alimentación:

$$W = W_s + Q_s \rho$$

$$C_s = \frac{W_s}{Q_s}$$

Corrientes de salida:

$$S_1 = G_1 + Q_1 \rho$$

$$S_2 = G_2 + Q_2 \rho$$

$$G_1 = W_1 + W_2$$

$$G_2 = W_3 + W_4$$

$$C_1 = \frac{G_1}{Q_1}$$

$$C_2 = \frac{G_2}{Q_2}$$

Balance de masas:

$$W + Q\rho = S_1 + S_2$$

$$W_s = G_1 + G_2$$

$$Q + Q_s = Q_1 + Q_2$$

Separación de una mezcla multicomponente con alimentación húmeda sin isodromía

Curvas de separación:

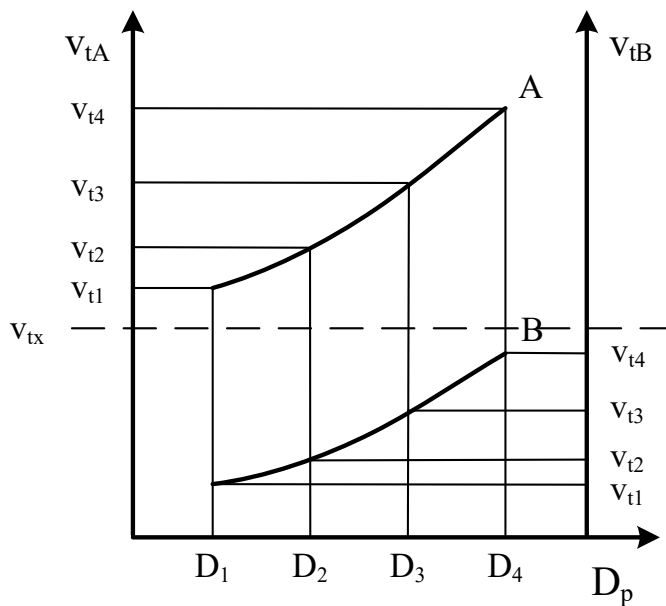


Fig. 3.15. Curva de separación multicomponente sin isodromía.

Relación de separación por tamaño de partículas:

$$R_{t(1-4)} = D_1/D_4$$

Condición de separación:

$$R_{t(1-4)} \geq R_{sd} = \left[\frac{(\rho_B - \rho)}{(\rho_A - \rho)} \right]^a$$

Esquema de la operación: Fig. 3.14.

Corriente de alimentación:

$$W = W_s + Q_s \rho$$

$$C_s = \frac{W_s}{Q_s}$$

Corrientes de salida:

$$S_1 = G_1 + Q_1 \rho$$

$$S_2 = G_2 + Q_2 \rho$$

$$G_1 = W_{B1} + W_{B2} + W_{B3} + W_{B4}$$

$$G_2 = W_{A1} + W_{A2} + W_{A3} + W_{A4}$$

$$C_1 = \frac{G_1}{Q_1}$$

$$C_2 = \frac{G_2}{Q_2}$$

Separación de una mezcla multicomponente con alimentación húmeda con isodromía

Curvas de separación:

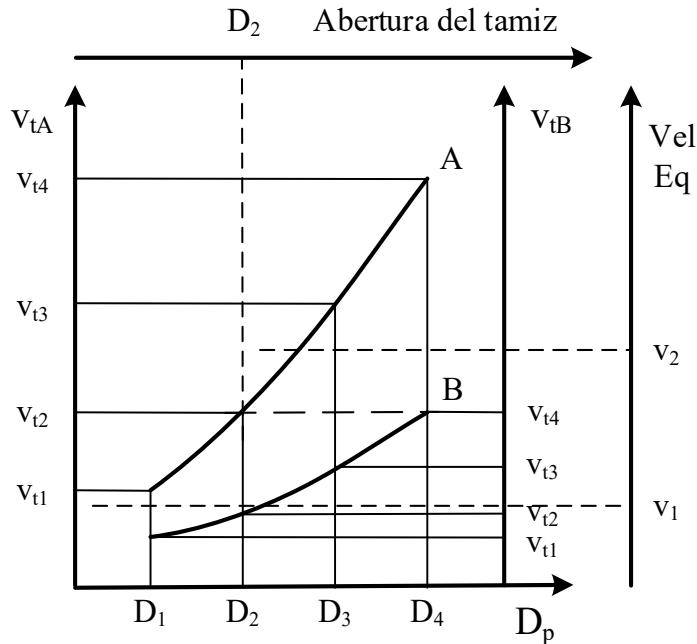


Fig. 3.16. Curva de separación velocidades del fluido en el elutriador.

Relación de separación vs. Condición de separación:

| Gama tamaños | Rel. Separación tamaño | Condición de separación |
|---------------------|------------------------|-------------------------|
| $G_1: (D_1 - D_2)$ | $R_{t(1-2)} = D_1/D_2$ | $R_{t(1-2)} > R_{sd}$ |
| $G_2: (D_2 - D_3)$ | $R_{t(2-3)} = D_2/D_3$ | $R_{t(2-3)} > R_{sd}$ |
| $G_3: (D_3 - D_4)$ | $R_{t(3-4)} = D_3/D_4$ | $R_{t(3-4)} > R_{sd}$ |
| $G'_1: (D_1 - D_3)$ | $R_{t(1-3)} = D_1/D_3$ | $R_{t(1-3)} > R_{sd}$ |
| $G'_2: (D_2 - D_4)$ | $R_{t(2-4)} = D_2/D_4$ | $R_{t(2-4)} < R_{sd}$ |
| $G_4: (D_1 - D_4)$ | $R_{t(1-4)} = D_1/D_4$ | $R_{t(1-4)} < R_{sd}$ |

Fig. 3.17. Relación de separación vs. Condición de separación.

Esquema del proceso:

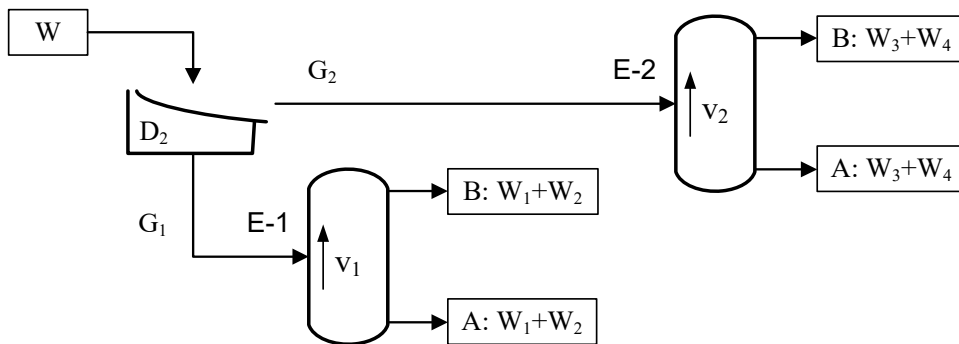


Fig. 3.18. Separación de componentes puros de una mezcla.

Flujograma para el cálculo:

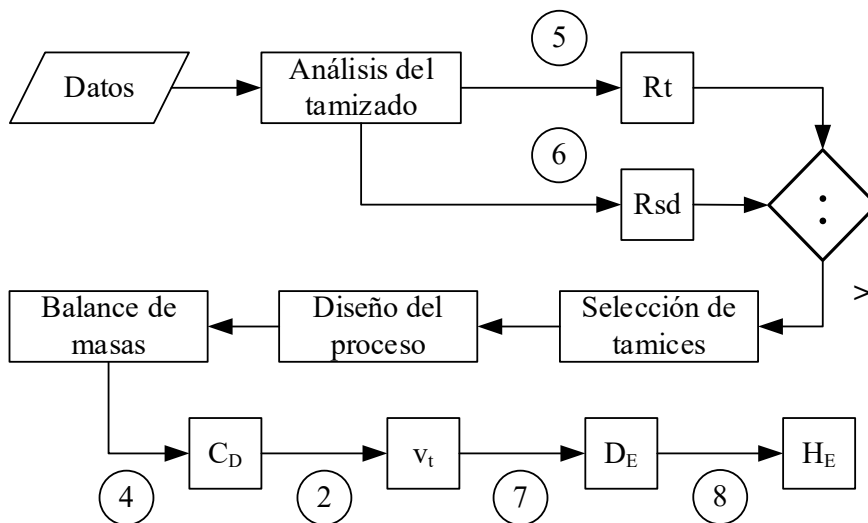


Fig. 3.19. Flujograma de cálculo para el diseño del proceso para la separación monocomponente con tamices y elutriadores.

Separación de una mezcla multicomponente con alimentación húmeda, isodromía y gama de tamaños diferentes

Curvas de separación:

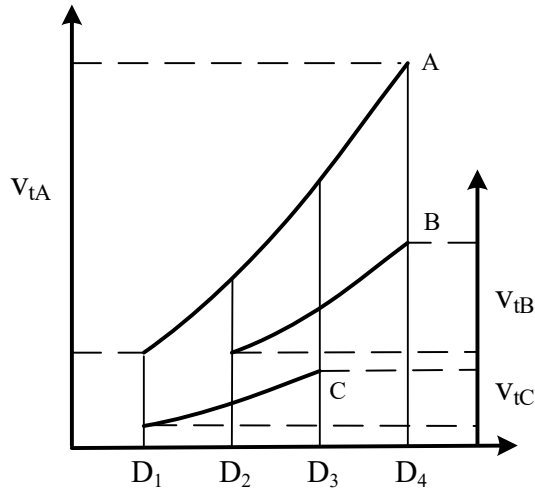


Fig. 3.20. Curvas de separación multicomponente con isodromía y tamaños diferentes.

Relación de separación por tamaño y condición de separación del proceso:

| Partículas de sólidos A y B | | |
|-----------------------------|------------------------|-------------------------|
| Gama de tamaños | Rel. Sep. por tamaño | Condición de separación |
| $G_1: (D_1 - D_2)$ | $R_{t(1-2)} = D_1/D_2$ | $R_{t(1-2)} < R_{sd}$ |
| $G_2: (D_2 - D_3)$ | $R_{t(2-3)} = D_2/D_3$ | $R_{t(2-3)} > R_{sd}$ |
| $G_3: (D_3 - D_4)$ | $R_{t(3-4)} = D_3/D_4$ | $R_{t(3-4)} > R_{sd}$ |
| $G'_1: (D_1 - D_3)$ | $R_{t(1-3)} = D_1/D_3$ | $R_{t(1-3)} < R_{sd}$ |
| $G'_2: (D_2 - D_4)$ | $R_{t(2-4)} = D_2/D_4$ | $R_{t(2-4)} < R_{sd}$ |
| $G_4: (D_1 - D_4)$ | $R_{t(1-4)} = D_1/D_4$ | $R_{t(1-4)} < R_{sd}$ |
| Partículas de sólidos A y C | | |
| Gama de tamaños | Rel. Sep. por tamaño | Condición de separación |
| $G_1: (D_1 - D_2)$ | $R_{t(1-2)} = D_1/D_2$ | $R_{t(1-2)} > R_{sd}$ |
| $G_2: (D_2 - D_3)$ | $R_{t(2-3)} = D_2/D_3$ | $R_{t(2-3)} > R_{sd}$ |
| $G_3: (D_3 - D_4)$ | $R_{t(3-4)} = D_3/D_4$ | $R_{t(3-4)} > R_{sd}$ |
| $G'_1: (D_1 - D_3)$ | $R_{t(1-3)} = D_1/D_3$ | $R_{t(1-3)} > R_{sd}$ |

| | | |
|-----------------------------|------------------------|-------------------------|
| $G_2': (D_2 - D_4)$ | $R_{t(2-4)} = D_2/D_4$ | $R_{t(2-4)} > R_{sd}$ |
| $G_4: (D_1 - D_4)$ | $R_{t(1-4)} = D_1/D_4$ | $R_{t(1-4)} > R_{sd}$ |
| Partículas de sólidos B y C | | |
| Gama de tamaños | Rel. Sep. por tamaño | Condición de separación |
| $G_1: (D_1 - D_2)$ | $R_{t(1-2)} = D_1/D_2$ | $R_{t(1-2)} > R_{sd}$ |
| $G_2: (D_2 - D_3)$ | $R_{t(2-3)} = D_2/D_3$ | $R_{t(2-3)} > R_{sd}$ |
| $G_3: (D_3 - D_4)$ | $R_{t(3-4)} = D_3/D_4$ | $R_{t(3-4)} > R_{sd}$ |
| $G_1': (D_1 - D_3)$ | $R_{t(1-3)} = D_1/D_3$ | $R_{t(1-3)} > R_{sd}$ |
| $G_2': (D_2 - D_4)$ | $R_{t(2-4)} = D_2/D_4$ | $R_{t(2-4)} > R_{sd}$ |
| $G_4: (D_1 - D_4)$ | $R_{t(1-4)} = D_1/D_4$ | $R_{t(1-4)} > R_{sd}$ |

Fig. 3.21. Relación de separación vs. condición de separación.

Esquema del proceso:

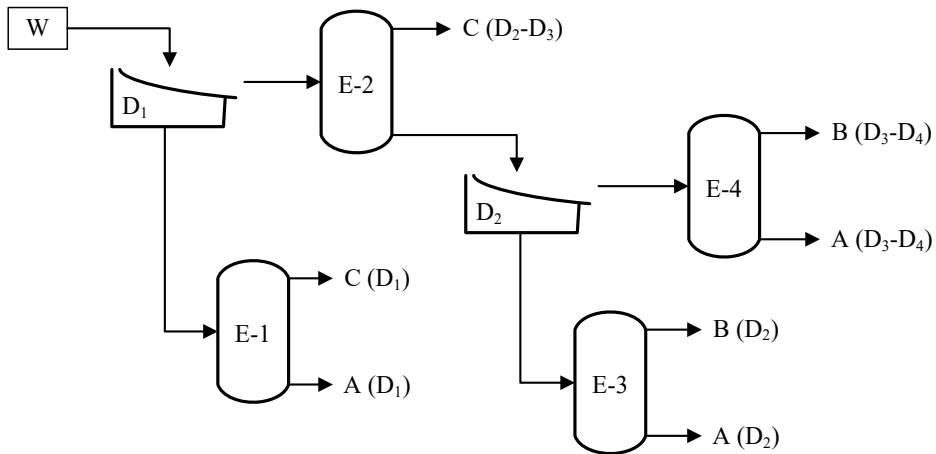


Fig. 3.22. Relación de separación por tamaño vs. condición de separación.

Proceso para el despalillado del tabaco empleando aire

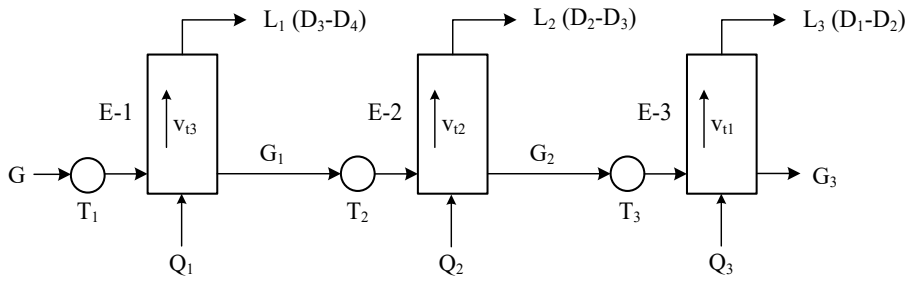


Fig. 3.23. Proceso de separación de palos y lámina para tabaco.

CAPÍTULO 4

Diseño de equipos que emplean lechos porosos fijos y fluidizados

Aplicaciones industriales: Lechos Fijos: Intercambio iónico. Filtración. Absorción. Catálisis heterogénea. Columnas de relleno. Lechos fluidizados: Catálisis heterogénea. Deshidratación y Secado fluidodinámico. Transporte de sólidos.

Diseño de equipos para la operación de un lecho poroso

Esquema de la operación:

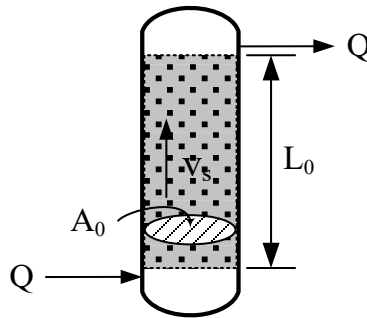


Fig. 4.1. Variables de diseño para un lecho poroso.

Porosidad del lecho:

$$\varepsilon_0 = \frac{V_v}{V_0} = \frac{V_v}{A_0 L_0}$$
$$1 - \varepsilon_0 = \frac{V_s}{V_0} = \frac{V_s}{A_0 L_0}$$

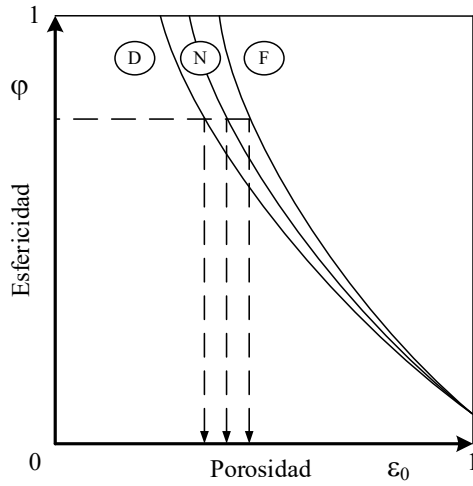


Fig. 4.2. Esfericidad de las partículas vs. Porosidad del lecho.

Caída de presión del fluido:

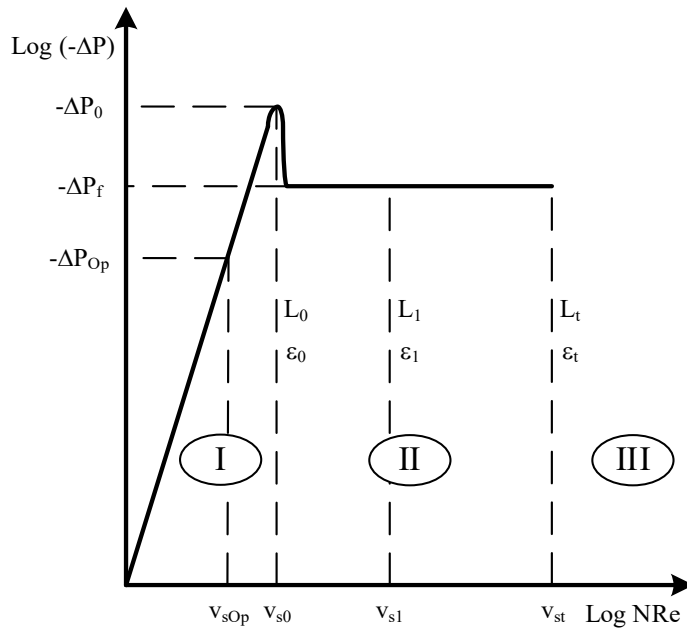


Fig. 4.3. Caída de presión del fluido en un lecho poroso.

Caída de presión del fluido que circula por el lecho fijo:

$$-\frac{\Delta P_{Op}}{L_0} g_c = \overbrace{150 \frac{\mu v_{sOp}(1 - \varepsilon_0)^2}{D_p^2 \varepsilon_0^3}}^{\text{Flujo Laminar}} + \overbrace{1.75 \frac{v_{sOp}^2 \rho (1 - \varepsilon_0)}{D_p \varepsilon_0^3}}^{\text{Flujo Turbulento}} \quad (\text{Ergum})$$

Caída de presión del fluido que circula por el lecho para el comienzo de la expansión:

$$-\frac{\Delta P_0}{L_0} g_c = \overbrace{150 \frac{\mu v_{s0}(1 - \varepsilon_0)^2}{D_p^2 \varepsilon_0^3}}^{\text{Flujo Laminar}} + \overbrace{1.75 \frac{v_{s0}^2 \rho (1 - \varepsilon_0)}{D_p \varepsilon_0^3}}^{\text{Flujo Turbulento}} \quad (\text{Ergum})$$

Caída de presión del fluido que circula por el lecho fluidizado:

$$-\frac{\Delta P_1}{L_1} g_c = (\rho_s - \rho)(1 - \varepsilon_1)g$$

Diseño de equipos para la operación de un lecho poroso fijo

Dimensionado del equipo:

$$A_0 = \frac{Q_{Op}}{v_{sOp}}$$

$$D_0 = \sqrt{\frac{4Q_{Op}}{\pi v_{sOp}}}$$

$$L_0 = \frac{m_s}{\rho_s A_0 (1 - \varepsilon_0)}$$

Diseño de equipos para la operación de un lecho poroso fluidizado

Esquema de la operación:

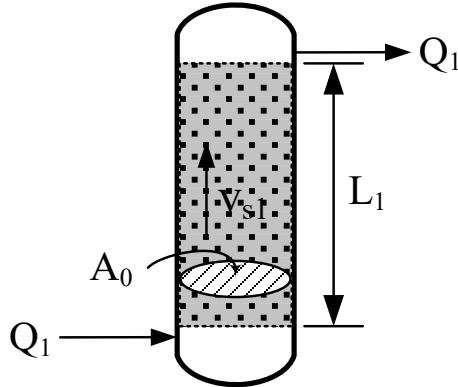


Fig. 4.4. Variables de diseño para un lecho poroso fluidizado.

Dimensionado del equipo:

$$A_0 = \frac{Q_1}{v_{s1}}$$

$$D_0 = \sqrt{\frac{4Q_1}{\pi v_{s1}}}$$

$$L_1 = \frac{m_s}{\rho_s A_0 (1 - \varepsilon_1)}$$

Velocidad del fluido en el comienzo de la expansión:

$$v_{s0} = \frac{g(\rho_s - \rho) D_p^2 \varepsilon_0^3}{150\mu(1 - \varepsilon_0)}$$

Velocidad del fluido para la operación con el lecho fluidizado:

$$v_{s1} = \frac{g(\rho_s - \rho)D_p^2 \varepsilon_1^3}{150\mu(1 - \varepsilon_1)}$$

Velocidad máxima del fluido para la operación con lecho fluidizado:

$$v_{st} = \sqrt{\frac{4(\rho_s - \rho)gD_p}{3\rho C_D}}$$

Grado de expansión del lecho fluidizado referido a la velocidad del fluido:

$$GExp = v_{s1} - v_{s0} = \frac{g(\rho_s - \rho)D_p^2}{150\mu} \left[\frac{\varepsilon_1^3}{(1 - \varepsilon_1)} - \frac{\varepsilon_0^3}{(1 - \varepsilon_0)} \right]$$

Grado de expansión máximo del lecho fluidizado referido a la velocidad del fluido:

$$GExp_{Max} = v_{st} - v_{s0} = \frac{g(\rho_s - \rho)D_p^2}{150\mu} \left[\frac{\varepsilon_t^3}{(1 - \varepsilon_t)} - \frac{\varepsilon_0^3}{(1 - \varepsilon_0)} \right]$$

Grado de expansión del lecho fluidizado referido a la altura del lecho:

$$\frac{L_0}{L_1} = \frac{(1 - \varepsilon_1)}{(1 - \varepsilon_0)}$$

Grado de expansión máximo del lecho fluidizado referido a la altura del lecho:

$$\frac{L_0}{L_t} = \frac{(1 - \varepsilon_t)}{(1 - \varepsilon_0)}$$

Diseño de un sistema para transporte fluido dinámico de partículas sólidas

Sistema de transporte forzado con bomba centrífuga:

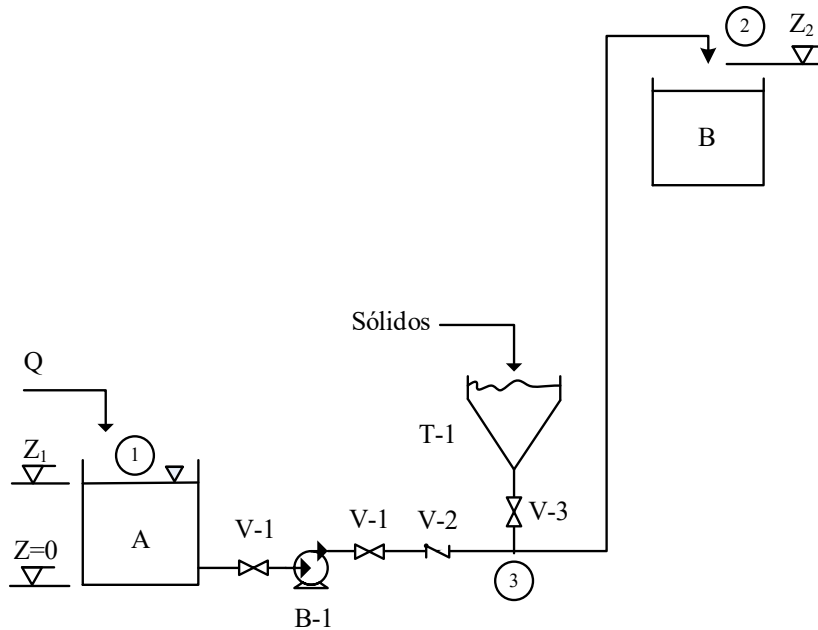


Fig. 4.5. Sistema forzado para el transporte de partículas sólidas con agua.

Curva operativa del sistema: Energía demandada por el sistema

$$\frac{\Delta P_{\text{sólidos}}}{\rho} + \frac{\Delta Z g}{g_c} + \frac{\Delta \bar{v}^2}{2\alpha g_c} + W_f = W$$

$$\frac{\Delta P_{\text{sólidos}}}{\rho} + \frac{Z_2 g}{g_c} + \frac{\bar{v}_2^2}{2\alpha g_c} + f \frac{\bar{v}^2}{2g_c} \sum \frac{L}{D} = W$$

Caída de presión del fluido con sólidos transportados:

$$\Delta P_{Sólidos} = \Delta P_{Fluido} \left[1 + B \left(\frac{D_c}{D_p} \right)^2 \left(\frac{\rho \mu Y_s}{\rho_s D_c v_c} \right)^k \right]$$

$$Y_s = \frac{m_{sólidos}}{m_{fluido}}$$

Coeficientes para el transporte de partículas sólidas con un líquido:

$$k = 1$$

$$B = \begin{cases} 0.48 & \rightarrow \text{para } A = 0.60 \\ 1.40 & \rightarrow \text{para } A = 1.00 \end{cases}$$

$$A = \sqrt{\frac{\frac{1}{3}(\rho_s - \rho) \rho g D_p^3}{\mu^2}}$$

Caída de presión del fluido desde la tolva de alimentación de sólidos en adelante:

$$\Delta P_{Fluido} = \left[\frac{Z_2 g \rho}{g_c} + f \frac{v_c^2 \rho}{2 g_c} \sum \frac{L}{D} \right]$$

Sistema de transporte forzado con ventilador:

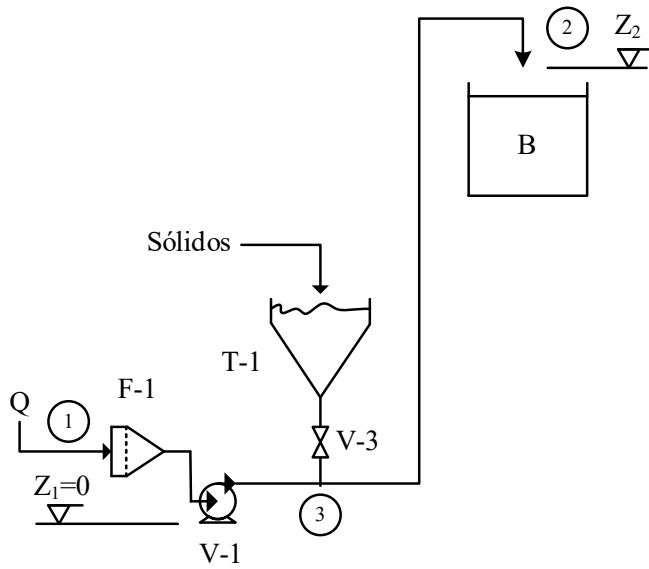


Fig. 4.6. Sistema forzado para el transporte de partículas sólidas con aire.

Coefficientes para el transporte de partículas sólidas con aire:

$$A = \sqrt{\frac{\frac{1}{3}(\rho_s - \rho) \rho g D_p^3}{\mu^2}}$$

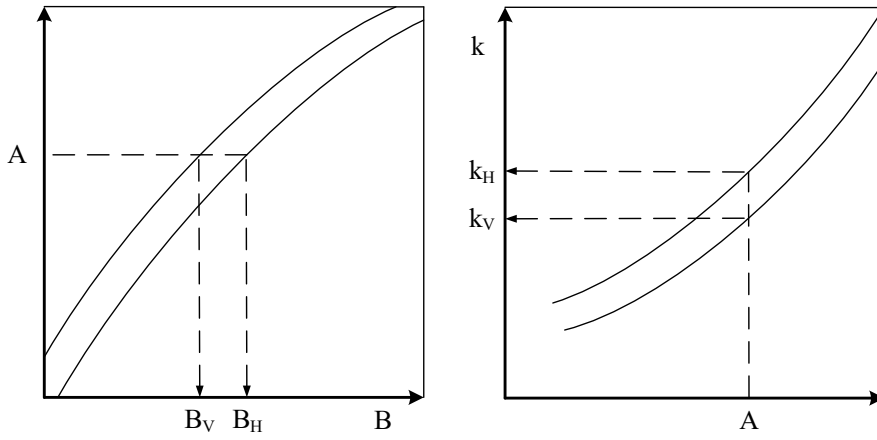


Fig. 4.7. Coeficientes para el transporte de partículas sólidas con aire.

CAPÍTULO 5

Diseño de equipos para la separación de fases: filtros

Aplicaciones industriales: Pasta de celulosa y papel; despallado de tabaco; potabilización de agua; producción de azúcar; levadura de cereza; alcohol etílico; cemento; productos químicos; tratamiento de efluentes industriales; etc.

Equipos de filtrado: De arena; placas y marcos; tambores, discos y platos rotativos de vacío; mesas aspirantes; mangas; tamices; etc.

Diseño de los equipos para la operación de filtrado

Esquema de la operación: Filtrado discontinuo.

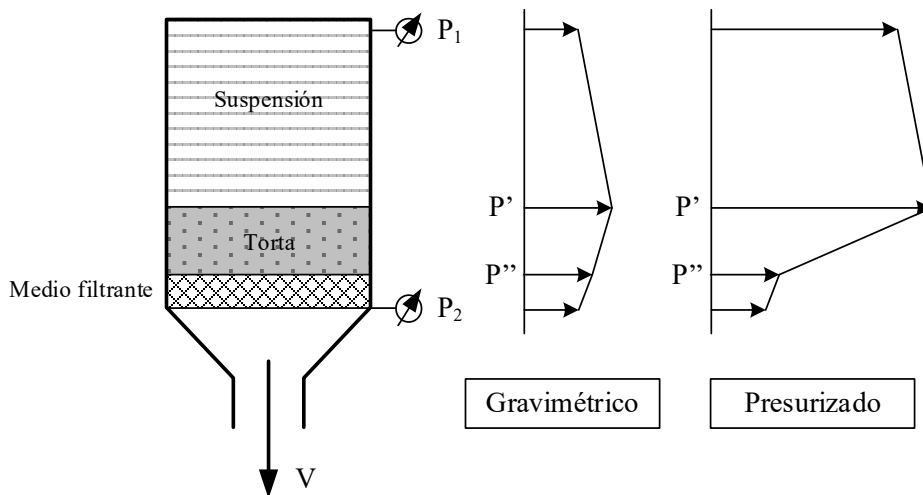


Fig. 5.1. Filtro discontinuo gravimétrico y presurizado.

Esquema de la operación: Filtrado continuo en serie.

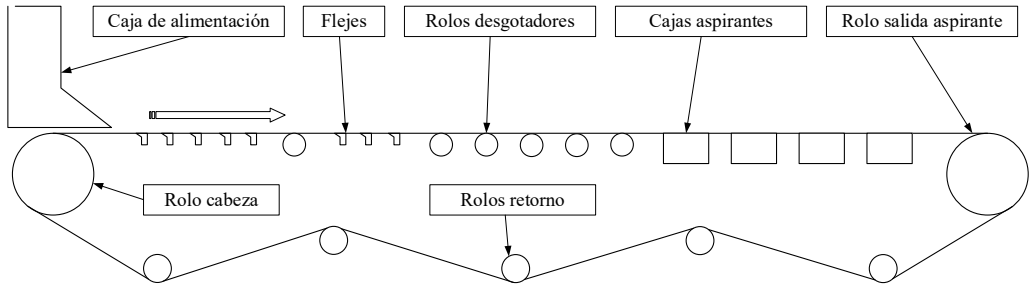


Fig. 5.2. Mesa de formación de hoja en máquina de papel.

Esquema de la operación: Filtrado continuo en serie y contracorrientes.

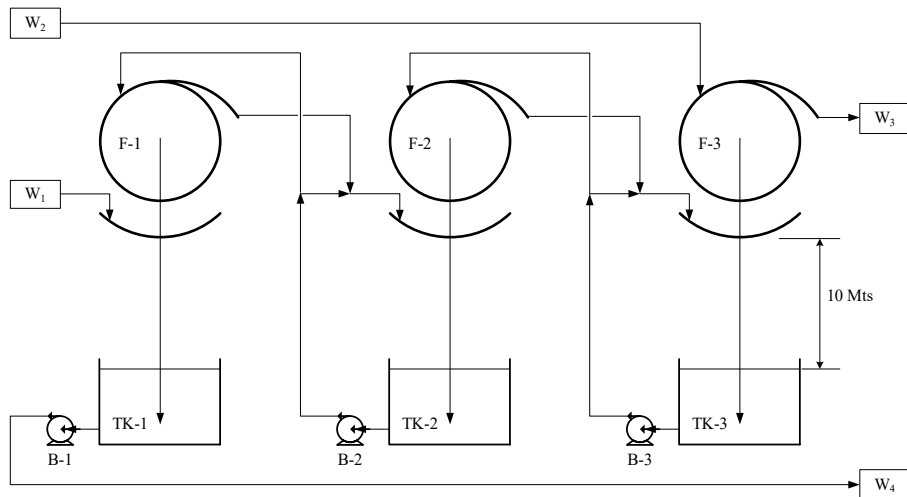


Fig. 5.3. Filtros de vacío para el lavado de pasta de celulosa.

Ecuación de diseño para filtros:

$$Q = \frac{dV}{d\theta} = \frac{\Delta P}{R_{eq}} = \frac{\Delta P}{R_t + R_m}$$

$$R_t = \frac{\alpha\mu CV}{A^2 g_c}$$

$$R_m = \frac{\alpha\mu CV_f}{A g_c}$$

$$\frac{dV}{d\theta} = \frac{\Delta P A^2 g_c}{\alpha\mu C(V + AV_f)}$$

Resistencia específica de la torta:

$$\alpha = \alpha' \Delta P^s$$

$$\alpha = \alpha' + b \Delta P^s$$

Diseño de filtros discontinuos

Área del filtro para la operación con caudal constante:

$$\Delta P^{(1-s)} = \frac{\alpha' \mu C Q (V + AV_f)}{g_c A^2}$$

$$A = \sqrt{\frac{\alpha' \mu C Q V}{g_c \Delta P^{(1-s)}}$$

Área del filtro para la operación con caída de presión constante:

$$\theta = \frac{\alpha' \mu C (V^2 + 2AVV_f)}{g_c 2A^2 \Delta P^{(1-s)}}$$

$$A = V \sqrt{\frac{\alpha' \mu C}{g_c 2\theta \Delta P^{(1-s)}}}$$

Espesor de la torta:

$$L_t = \frac{CV}{\rho_t A}$$

$$\rho_t = \frac{m_s}{AL_t}$$

Determinación de los parámetros característicos de la filtración:

$$\frac{\Delta P \theta}{V} = K_1 V + K_2$$

$$K_1 = \frac{\alpha' \mu C \Delta P^s}{g_c 2A^2}$$

$$K_2 = \frac{\alpha' \mu C \Delta P^s V_f}{g_c A}$$

| Tabla 1 | Ensayo de Filtración ($\Delta P = cte$) | | | | | |
|------------|---|--------------|--------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | V | | | $\theta \Delta P_1 / V$ | $\theta \Delta P_2 / V$ | $\theta \Delta P_3 / V$ |
| θ | ΔP_1 | ΔP_2 | ΔP_3 | | | |
| θ_1 | - | - | - | - | - | - |
| θ_2 | - | - | - | - | - | - |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| θ_n | - | - | - | - | - | - |

Fig. 5.4. Ensayo de filtración: Tabla de valores.

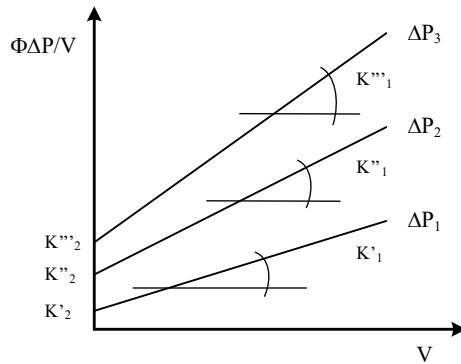


Fig. 5.5. Ensayo de filtración: Gráfico de los valores de la Fig. 5.4.

| Tabla 2 | Ensayo de Filtración a $\Delta P = cte$ | | | | | |
|--------------|---|---------|----------|--------|---------|----------|
| ΔP | K'_1 | K''_1 | K'''_1 | K'_2 | K''_2 | K'''_2 |
| ΔP_1 | - | | | - | | |
| ΔP_2 | | - | | | - | |
| ΔP_3 | | | - | | | - |

Fig. 5.6. Ensayo de filtración: Tabla con los valores obtenidos de la Fig. 5.5.

$$\log K_1 = \log \frac{\alpha' \mu C}{g_c 2A^2} + s \log \Delta P$$

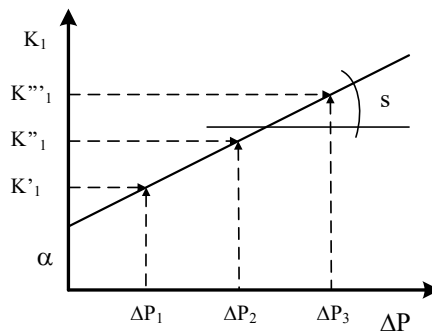


Fig. 5.7. Ensayo de filtración: Gráfico de los valores de la Fig. 5.6.

$$\log K_2 = \log \frac{\alpha' \mu C V_f}{g_c A} + s \log \Delta P$$

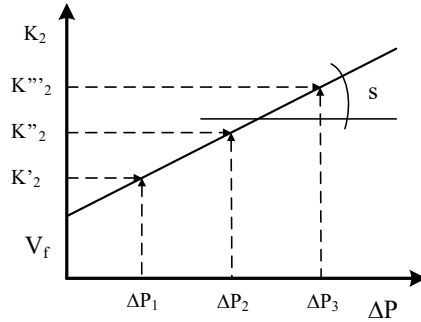


Fig. 5.8. Ensayo de filtración: Gráfico de los valores de la Fig. 4.6.

Diseño y selección de filtros continuos

Esquema de la operación:

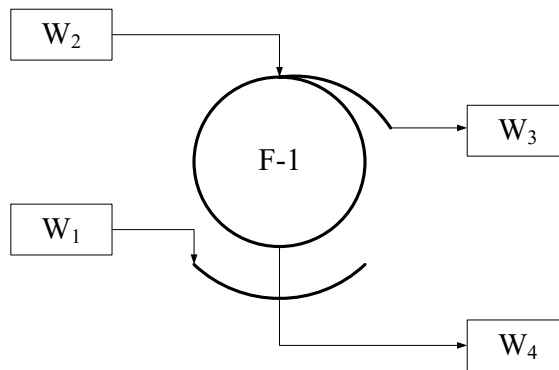


Fig. 5.9. Variables operativas de un filtro continuo.

Corriente de alimentación:

$$W_1 = W_{s1} + Q_1\rho$$

$$C = \frac{W_{s1}}{Q_1}$$

$$W_2 = Q_2\rho$$

$$R_l = \frac{m_l}{m_s} = \frac{W_2}{W_{s1}}$$

Corrientes de salida:

$$W_3 = W_{s3} + Q_3\rho$$

$$\rho_t = \frac{m_{s3}}{AL_t} = \frac{\rho_s W_{s3}}{W_{s3} + \rho_s Q_3}$$

$$W_4 = Q_4\rho$$

Balance de masas:

$$W_1 + W_2 = W_3 + W_4$$

$$W_{s1} = W_{s2} = W_s$$

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4$$

Requisitos para el diseño:

$$\varphi = \frac{A}{A_c} = \frac{\theta}{\theta_c} = \frac{V}{V_c} = \frac{V_f}{V_{fc}} = \frac{Q}{Q_c}$$

$$F_e = \frac{Q_4}{Q_c} = \left(\frac{W_4}{\rho}\right) \left(\frac{\theta_c}{V_c}\right) \leq 1$$

Área del filtro para caída de presión constante:

$$\theta_c = \frac{\alpha' \mu C (V_c^2 + 2\phi A_c V_c V_{fc})}{g_c 2\phi A_c^2 \Delta P^{(1-s)}}$$

$$N_c = \frac{\alpha' \mu C (W_4^2 + 2\phi \rho A_c W_4 F_e N_c V_{fc})}{g_c 2\phi \rho^2 A_c^2 F_e^2 \Delta P^{(1-s)}}$$

$$A_c = \frac{W_4}{\rho F_e} \sqrt{\frac{\alpha' \mu C}{g_c 2\phi N_c \Delta P^{(1-s)}}$$

Espesor de la torta:

$$L_t = \frac{W_s}{\rho_t A_c N_c}$$

Selección de un filtro de tambor rotativo con vacío:

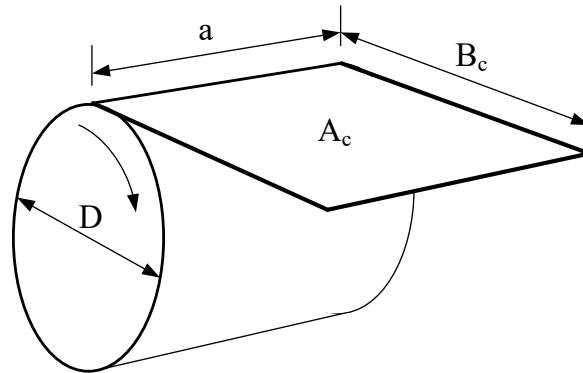


Fig. 5.10. Dimensionado del filtro continuo de vacío.

Tabla o longitud del tambor del filtro rotativo:

$$a = \frac{A_c}{\pi D}$$

Sistemas de vacío para filtros de tambor rotativo:

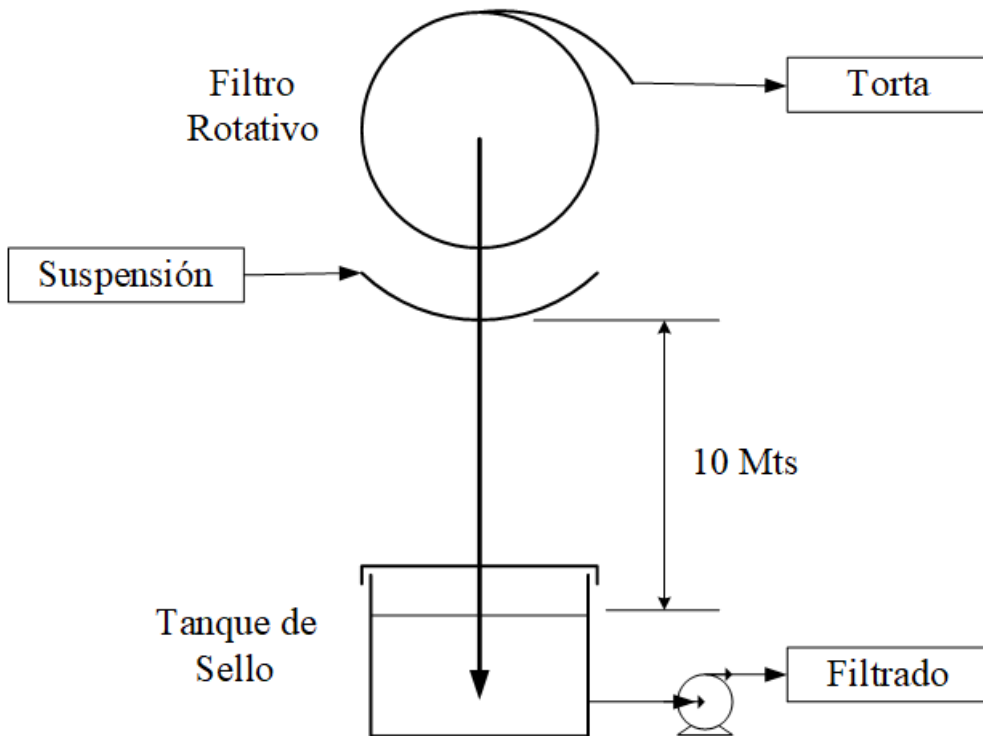


Fig. 5.11. Sistema gravimétrico de vacío para filtro de tambor.

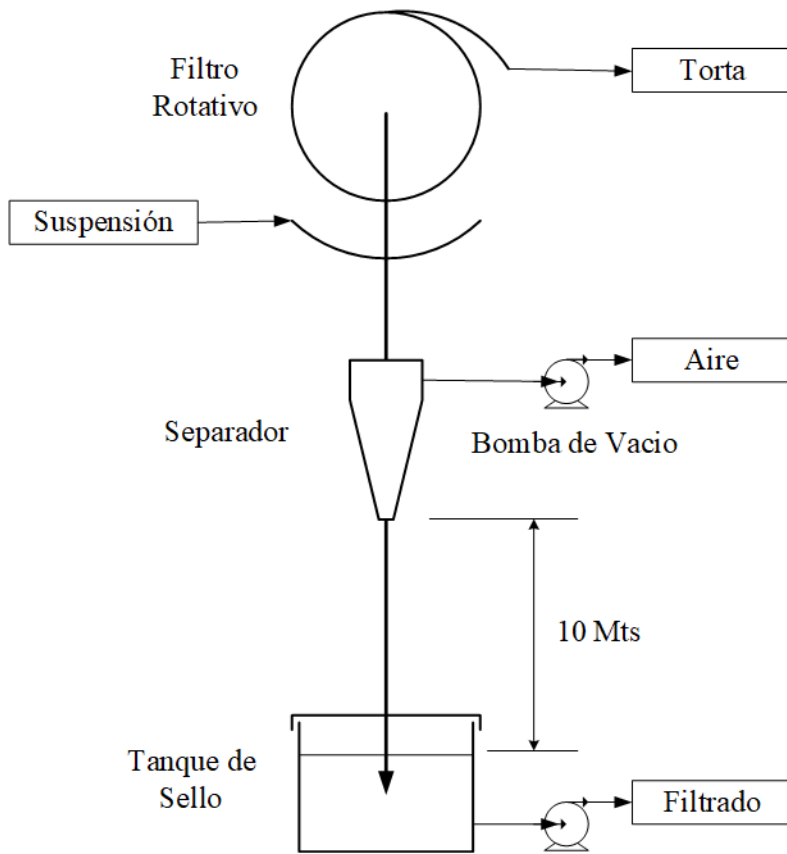


Fig. 5.12: Sistema forzado de vacío para filtro de tambor.

CAPÍTULO 6

Diseño de intercambiadores de doble tubo

Aplicaciones industriales: Pasta de celulosa y papel; producción de azúcar; levadura de cereza; alcohol etílico; productos químicos; agroindustrias; lácteos; petroquímica; etc.

Procesos industriales para transferencia de calor entre dos fluidos:

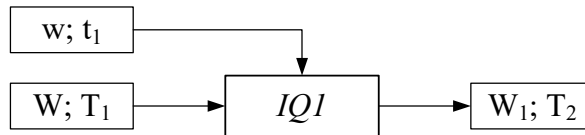


Fig. 6.1. Intercambiador de calor directo.

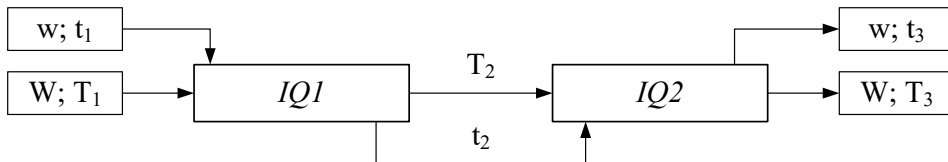


Fig. 6.2. IQDT conectados en serie-serie.

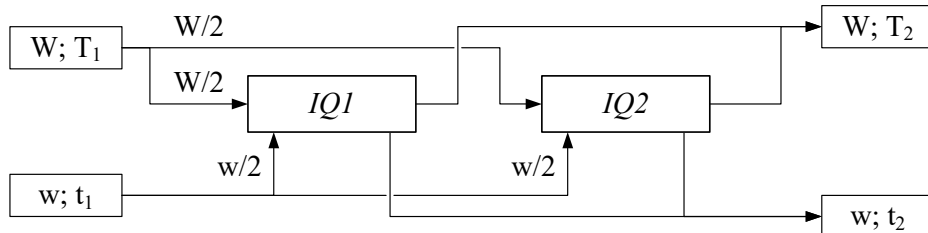


Fig. 6.3. IQDT conectados en paralelo-paralelo.

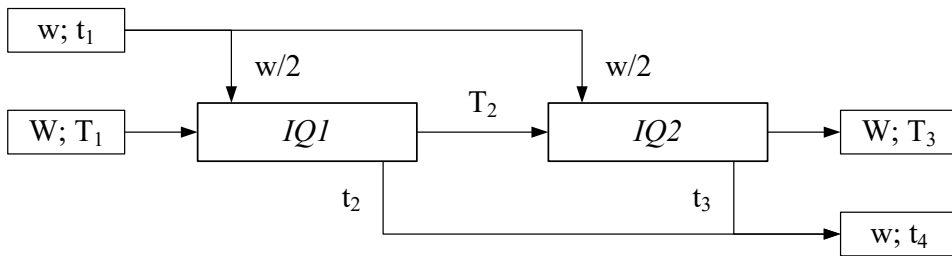


Fig. 6.4. IQDT conectados en serie-paralelo (Caliente-Frío).

Intercambiadores de calor de doble tubo:

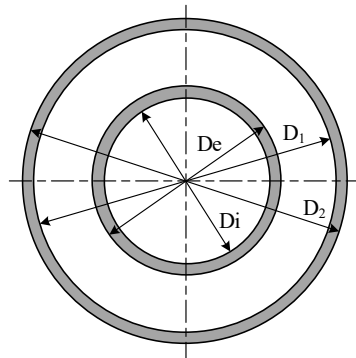


Fig. 6.5. Corte transversal de un intercambiador de calor de doble tubo.

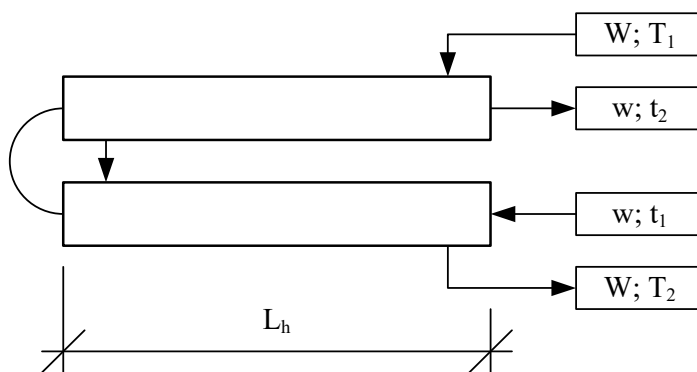


Fig. 6.6. Horquilla de un intercambiador de calor de doble tubo.

Identificación de las corrientes:

| Variables operativas del proceso | Unidad | | Fluidos | |
|--|-------------|------|----------|------|
| | | | Caliente | Frío |
| Fluido de proceso/servicio | Detalle | | | |
| Concentración fluidos proceso/servicio | PP | % | | |
| Temperatura de entrada del fluido | T_1 / t_1 | °C | | |
| Temperatura de salida del fluido | T_2 / t_2 | °C | | |
| Caudal másico de fluidos | W / w | Kg/h | | |

Fig. 6.7. Identificación de las corrientes del proceso.

Características de los equipos y requisitos del proceso:

| Equipo Existente | | | | |
|--|--------------------|---------------------|---------------------|----------|
| Detalle | | Variable | Unidad | Cantidad |
| Horquillas: | Cantidad | N_h | Adim. | |
| Tubos: | Diámetro Tubo Ext. | D_2 | Pulgada | |
| | Diámetro Tubo Int. | D_e | Pulgada | |
| | Espesor Tubo Ext. | e_2 | BWG | |
| | Espesor Tubo Int. | e_e | BWG | |
| | Longitud | L_h | Pie | |
| Material | | Acero Inox AISI 316 | | |
| Equipo Nuevo | | | | |
| Tubos: | Longitud | L_h | Pie | |
| | Material | | Acero Inox AISI 316 | |
| Requisitos del proceso para el diseño de los equipos | | | | |
| Factor de ensuciamiento requerido | | R_{dreq} | $h\ m^2/C/Kcal$ | |
| Caída de presión máxima admisible | | ΔP_{req} | $lb/pulg^2$ | |

Fig. 6.8. Características de los equipos y requisitos del proceso.

Balance de masas para un intercambiador de calor de contacto directo:

$$W + w = W_1$$

Conceptos sobre termodinámica

Contenido de calor:

$$\int dS = \int \frac{\partial q}{T}$$

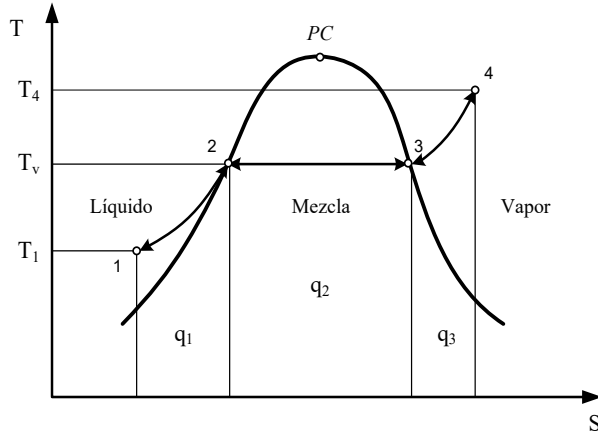


Fig. 6.9. Diagrama de Mollier (Temperatura vs Entropía).

$$q = q_1 + q_2 + q_3 [Kcal]$$

$$q = mc_p \Delta T_1 + m\lambda + mc'_p \Delta T_2$$

Transferencia de calor:

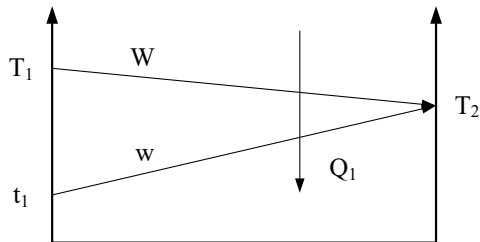


Fig. 6.10. Perfil de temperaturas para un intercambiador de contacto directo.

$$Q_1 = WC_p(T_1 - T_2) = wc_p(T_2 - t_1)[Kcal/h]$$

$$Q_1 = W\lambda_v = wc_p(T_2 - t_1)[Kcal/h]$$

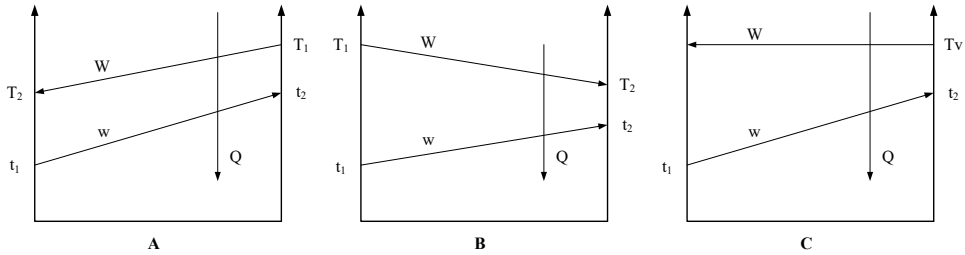


Fig. 6.11. Perfiles de temperatura para un intercambiador de contacto indirecto.

$$Q = WC_p\Delta T = wc_p\Delta t$$

$$Q = W\lambda_v = wc_p\Delta t$$

Conexión serie-serie:

Primer Equipo: $Q_1 = WC_{p1}(T_1 - T_2) = wc_{p1}(t_2 - t_1)$

Segundo Equipo: $Q_2 = WC_{p2}(T_2 - T_3) = wc_{p2}(t_3 - t_2)$

Balance global: $Q = Q_1 + Q_2 = WC_p(T_1 - T_3) = wc_p(t_3 - t_1)$

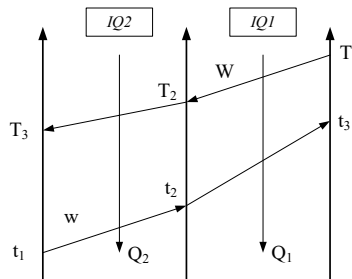


Fig. 6.12. Perfiles de temperatura para IQDT conectados según Fig. 6.2.

Conexión paralelo-paralelo:

Primer Equipo: $Q_1 = W_1 C_{p1}(T_1 - T_2) = w_1 c_{p1}(t_3 - t_1)$

Segundo Equipo: $Q_2 = W_2 C_{p2}(T_1 - T_3) = w_2 c_{p2}(t_3 - t_1)$

Balance global: $Q = Q_1 + Q_2 = W C_p(T_1 - T_2) = w c_p(t_2 - t_1)$

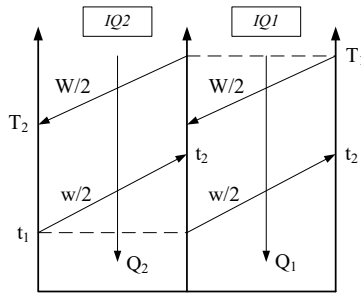


Fig. 6.13. Perfiles de temperatura para IQDT conectados según Fig. 6.3.

Conexión serie-paralelo (Caliente-Frío):

Primer Equipo: $Q_1 = W C_{p1}(T_1 - T_2) = (w/2) c_{p1}(t_2 - t_1)$

Segundo Equipo: $Q_2 = W C_{p2}(T_2 - T_3) = (w/2) c_{p2}(t_3 - t_1)$

Balance global: $Q = Q_1 + Q_2 = W C_p(T_1 - T_3) = w c_p(t_4 - t_1)$

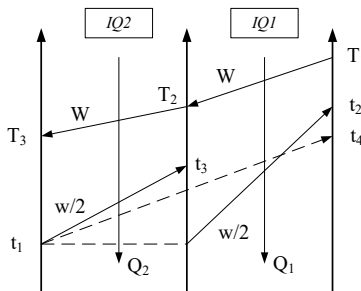


Fig. 6.14. Perfiles de temperatura para IQDT conectados según Fig. 6.4.

Calor total transferido en el proceso:

$$Q = \sum_1^n Q_i$$

Diseño de intercambiadores de calor de doble tubo

Ecuación de diseño para intercambiadores de calor:

$$Q_D = U_D A_D \Delta T M L_D \quad (1)$$

Perfil de temperaturas para el equipo:

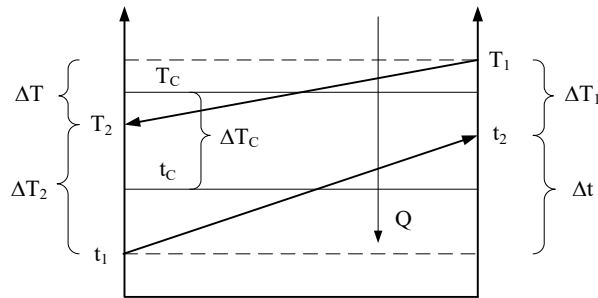


Fig. 6.15. Perfil de temperaturas de los fluidos en el intercambiador de calor.

Balace de calor para los fluidos:

$$Q_D = W C_p \Delta T \quad (2)$$

$$Q_D = w c_p \Delta t \quad (3)$$

Temperatura de salida vs. Caudal másico del fluido de servicio:

$$Q_D = W C_p \Delta T = w c_p \Delta t$$

Fuerza impulsora media logarítmica para la transferencia de calor:

$$\Delta T_{mlD} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad (4)$$

$$\Delta T_1 = T_1 - t_2$$

$$\Delta T_2 = T_2 - t_1$$

Fuerza impulsora media calórica para la transferencia de calor:

$$\Delta T_c = T_c - t_c$$

$$T_c = T_2 + F_c(T_1 - T_2)$$

$$t_c = t_1 + F_c(t_2 - t_1)$$

$$F_c = \frac{\left(\frac{1}{K_c}\right) + \left[\frac{r}{(r-1)}\right]}{1 + \frac{\ln(K_c+1)}{\ln r}} - \frac{1}{K_c}$$

$$K_c = \frac{(U_h - U_c)}{U_c}$$

$$r = \frac{\Delta T_c}{\Delta T_h} = \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}$$

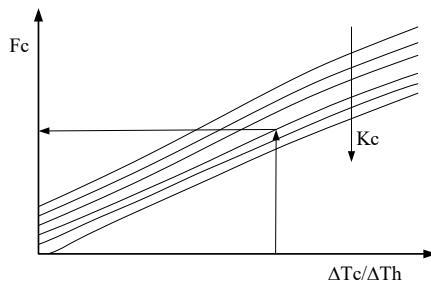


Fig. 6.16. Factor de corrección de rangos para las temperaturas calóricas.

Fuerza impulsora media aritmética para la transferencia de calor:

$$\Delta T_m = T_m - t_m$$

$$T_m = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

$$t_m = \frac{t_1 + t_2}{2}$$

Disposición de los fluidos y selección del conjunto de tubos:

Masa velocidad de los fluidos:

$$G = v\rho = W/a$$

$$G_i = \frac{4W_i}{\pi D_i^2} \quad (5)$$

$$G_e = \frac{4W_e}{\pi(D_1^2 - D_e^2)} \quad (6)$$

Relación de caudales másicos:

$$R_{CM} = \frac{w}{W} = \frac{C_p \Delta T}{c_p \Delta t} \quad (7)$$

Relación geométrica de caudales másicos:

$$RG_{CM} = \frac{W_e}{W_i} = \frac{(D_1^2 - D_e^2)}{D_i^2} \quad (8)$$

Tamaño del intercambiador de calor:

$$A_{Eq} = A_D = A_h N_h \quad (9)$$

Área de una horquilla:

$$A_h = 2\pi D_e L_h \quad (10)$$

Proceso de transferencia de calor entre los fluidos:

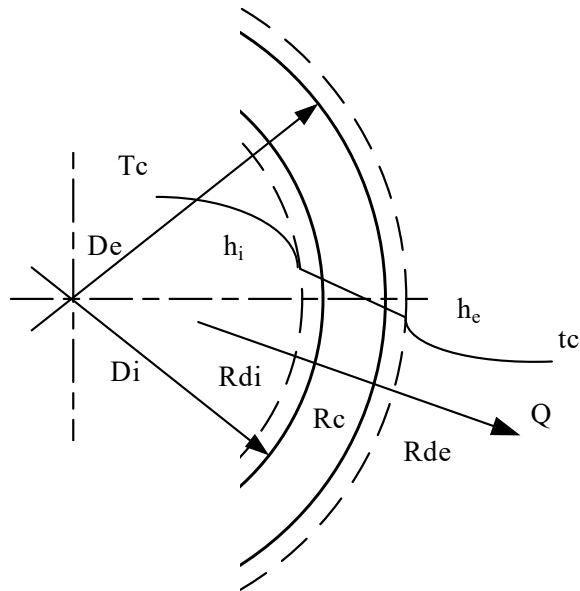


Fig. 6.17. Proceso de transferencia de calor a través de una pared cilíndrica.

Coefficiente global de transferencia de calor de diseño:

$$\frac{1}{U_D} = \frac{1}{U_C} + R_d \quad (11)$$

Coefficiente global de transferencia de calor limpio:

$$\frac{1}{U_C} = \frac{1}{h_{ie}} + \frac{1}{h_e} \quad (12)$$

$$h_{ie} = h_i \frac{D_i}{D_e}$$

Coefficientes peliculares de transferencia de calor:

$$h_{ie} = a \frac{k}{D_e} \left(\frac{D_i G_i}{\mu} \right)^\alpha \left(\frac{c_p \mu}{k} \right)^\beta \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^\gamma \quad (13)$$

$$h_e = a \frac{k}{D_{eq}} \left(\frac{D_{eq} G_e}{\mu} \right)^\alpha \left(\frac{c_p \mu}{k} \right)^\beta \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^\gamma \quad (14)$$

a, α, β y γ : son coeficientes cuyo valor es 0,027; 0,8; 1/3 y 0,14 respectivamente.

Diámetro equivalente del ánulo para la transferencia de calor:

$$D_{eq} = 4 \frac{S_p}{P_m} = \frac{(D_1^2 - D_e^2)}{D_e} \quad (15)$$

Temperatura de pared:

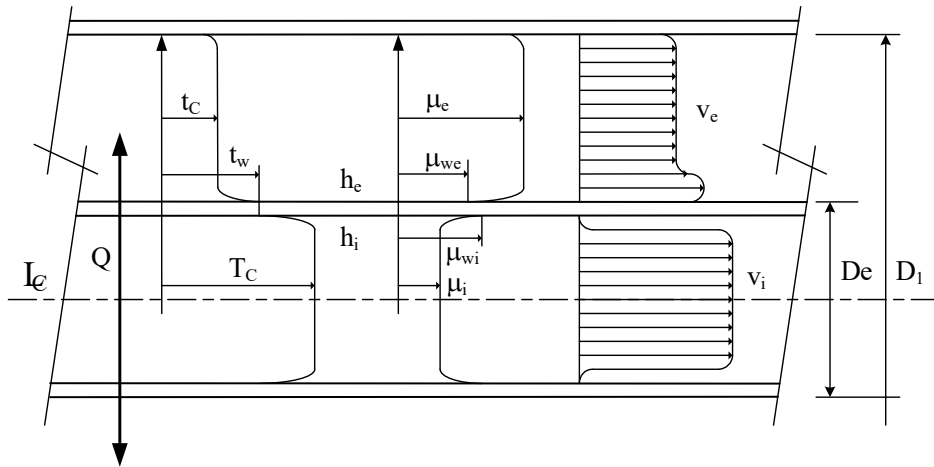


Fig. 6.18. Temperatura de pared cuando el fluido caliente circula por el tubo.

Para el fluido caliente circulando por los tubos:

$$t_w = t_c + \frac{h_{ie}}{h_{ie} + h_e} (T_c - t_c) = T_c - \frac{h_e}{h_{ie} + h_e} (T_c - t_c)$$

Para el fluido caliente circulando por el ánulo:

$$t_w = t_c + \frac{h_e}{h_{ie} + h_e} (T_c - t_c) = T_c - \frac{h_{ie}}{h_{ie} + h_e} (T_c - t_c)$$

Vida útil de los equipos:

$$R_{dc} \geq R_{dreq}$$

$$VU = R_{dc}/R_{dreq}$$

Caída de presión del fluido que circula por los tubos:

$$\Delta P_i = f_i \frac{G_i^2}{2g_c \rho} \frac{N_h L_h}{D_i} \quad (16)$$

Caída de presión total del fluido que circula por el ánulo:

$$\Delta P_e = \frac{N_h G_e^2}{2g_c \rho} \left[f_e \frac{L_h}{D'_{eq}} + 1 \right] \quad (17)$$

Caída de presión por retorno (ΔP_r) en el ánulo:

$$\Delta P_r = C_v N_h$$

Cabeza de velocidad:

$$C_v = \frac{\rho \bar{v}^2}{2g_c} = \frac{G^2}{2g_c \rho}$$

Diámetro equivalente del ánulo para la caída de presión:

$$D'_{eq} = (D_1 - D_e) \quad (18)$$

Factor de fricción de Darcy para la caída de presión de los fluidos:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left\{ \frac{1}{3.7065} \left(\frac{\varepsilon}{D_{eq}} \right) - \frac{5.0452}{R_e} \log \left[\frac{1}{2.8257} \left(\frac{\varepsilon}{D_{eq}} \right)^{1.1098} + \frac{5.8506}{R_e^{0.8981}} \right] \right\}$$

Puesta en marcha para intercambiadores de doble tubo:

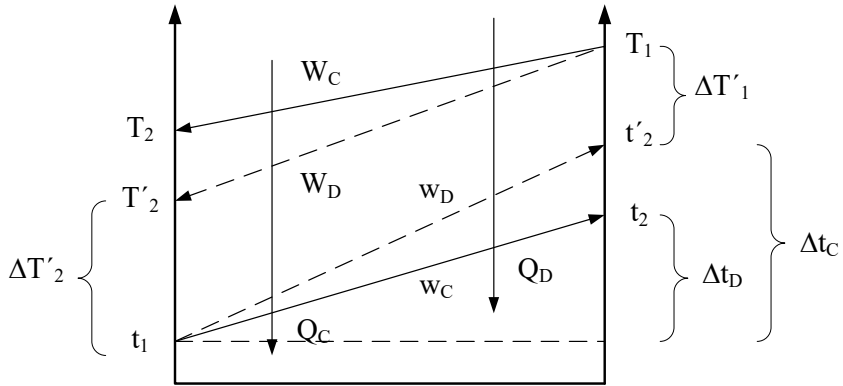


Fig. 6.19. Perfil de temperaturas para la puesta en marcha.

$$Q_C = U_C A_C \Delta T m l_C = W_D C_p (T_1 - T_2') = w_D c_p (t_2' - t_1)$$

$$\Delta T m l_C = \frac{\Delta T_1' - \Delta T_2'}{\ln \frac{\Delta T_1'}{\Delta T_2'}}$$

$$\Delta T_1' = (T_1 - t_2')$$

$$\Delta T_2' = (T_2' - t_1)$$

Temperaturas de salida con el equipo limpio:

$$T_2' = \frac{T_1 - R[(T_1 - t_1) + t_1 e^{(U_C A_D / w_D c_p)(R-1)}]}{1 - R e^{(U_C A_D / w_D c_p)(R-1)}} \quad (\text{Contracorriente})$$

$$R = \frac{w_D c_p}{W_D C_p} = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1}$$

$$T_2' = \frac{[R + e^{(U_{CAD}/w_D c_p)(R+1)}]T_1 + [e^{(U_{CAD}/w_D c_p)(R+1)} - 1]Rt_1}{(R + 1)e^{(U_{CAD}/w_D c_p)(R+1)}} \quad (\text{Paralelas})$$

$$R = \frac{w_D c_p}{W_D C_p} = \frac{T_1 - T_2'}{t_2' - t_1}$$

$$t_2' = t_1 + \frac{T_1 - T_2'}{R}$$

Área de transferencia requerida para la puesta en marcha:

$$A_C = A_D \frac{U_D}{U_C}$$

Caudal del fluido de servicio requerido para la puesta en marcha:

$$w_C = w_D \frac{\Delta t_C}{\Delta t_D} = w_D \frac{(t_2' - t_1)}{(t_2 - t_1)}$$

Intercambiadores conectados en serie-paralelo:

Corriente caliente en serie con "n" corrientes frías en paralelo (Fig. 6.4):

$$Q_D = U_D A_D \Delta T$$

$$\Delta T = \gamma(T_1 - t_1)$$

$$\frac{1 - P}{\gamma} = \frac{nR}{R - 1} \ln \left[\frac{R - 1}{R} \left(\frac{1}{P} \right)^{(1/n)} + \frac{1}{R} \right]$$

$$R = \frac{(T_1 - T_3)}{n(t_4 - t_1)}$$

$$P = \frac{(T_3 - t_1)}{(T_1 - t_1)}$$

Corriente fría en serie con "n" corrientes calientes en paralelo:

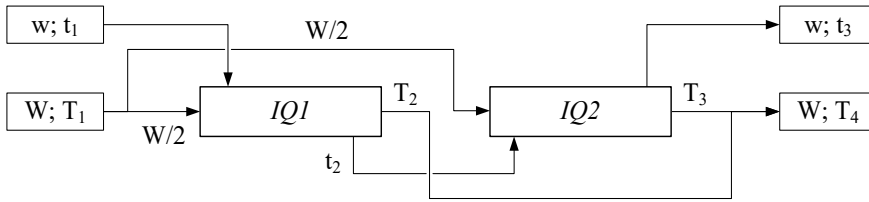


Fig. 6.20. IQDT conectados en serie-paralelo (Frío-Caliente).

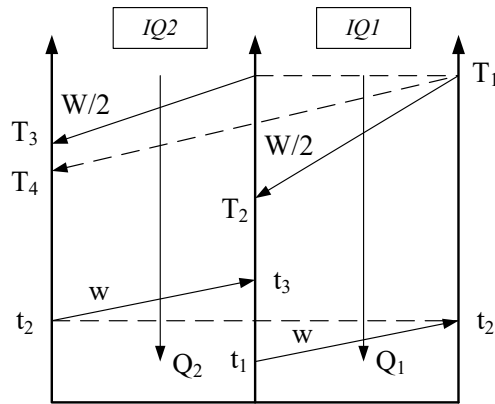


Fig. 6.21. Perfiles de temperatura para IQDT conectados según Fig. 6.20.

$$Q_D = U_D A_D \Delta T$$

$$\Delta T = \gamma' (T_1 - t_1)$$

$$\frac{1 - P'}{\gamma'} = \frac{n}{R' - 1} \ln \left[(R' - 1) \left(\frac{1}{P'} \right)^{(1/n)} + R' \right]$$

$$R' = \frac{n(T_1 - T_4)}{(t_3 - t_1)}$$

$$P' = \frac{(T_1 - t_3)}{(T_1 - t_1)}$$

Optimización operativa del diseño:

$$R_{dc} \geq R_{dreq} \quad (19)$$

$$\Delta P_c \leq \Delta P_{req} \quad (20)$$

Resultados vs. Acciones correctivas:

| Resultado vs. Requisito | Diagnóstico | Acciones correctivas |
|--|---|--|
| $R_{dc} = R_{dreq}$ $(\Delta P_c)_{Anulo} = \Delta P_{Req}$ $(\Delta P_c)_{Tubo} = \Delta P_{Req}$ | El equipo será operativo durante un año. No admite aumentos de producción. | No es necesario hacer nada siempre que los cálculos hayan contemplado la situación de puesta en marcha y/o los posibles cambios en las condiciones operativas. |
| $R_{dc} > R_{dreq}$ $(\Delta P_c)_{Anulo} > \Delta P_{Req}$ $(\Delta P_c)_{Tubo} > \Delta P_{Req}$ | Está sobredimensionado para la transferencia de calor y será operativo por más de un año. El caudal de los fluidos es excesivo. | Existente: Verificar la resistencia mecánica del equipo a la sobrecarga de presión; Verificar el sistema de transporte de los fluidos a la caída de presión; Reducir la cantidad de horquillas y el caudal del fluido de servicio; Emplear equipos en paralelo-paralelo. Nuevo: Redimensionar el conjunto de tubos. |
| $R_{dc} < R_{dreq}$ $(\Delta P_c)_{Anulo} < \Delta P_{Req}$ $(\Delta P_c)_{Tubo} < \Delta P_{Req}$ | Está subdimensionado para la transferencia de calor y será operativo por menos de un año. Permite aumentos del caudal de ambos fluidos. | Existente: Aumentar la cantidad de horquillas y el caudal del fluido de servicio. Nuevo: Redimensionar el conjunto de tubos para obtener un equipo más grande. |
| $R_{dc} < R_{dreq}$ $(\Delta P_c)_{Anulo} > \Delta P_{Req}$ $(\Delta P_c)_{Tubo} > \Delta P_{Req}$ | Está subdimensionado para la transferencia de calor y será operativo por menos de un año. El caudal de los fluidos es excesivo. | Existente: Emplear equipos en paralelo-paralelo. Nuevo: Redimensionar el conjunto de tubos para obtener un equipo más grande. |
| $R_{dc} < R_{dreq}$ $(\Delta P_c)_{Anulo} < \Delta P_{Req}$ | Está subdimensionado para la transferencia de calor y será operativo por menos de un año. El caudal del fluido que circula | Existente: Aumentar la cantidad de horquillas y reducir el caudal del fluido de servicio si está circulando por el tubo. Probar con el fluido que |

| | | |
|--|---|---|
| $(\Delta P_c)_{Tubo} > \Delta P_{Req}$ | <p>por el tubo es excesivo.</p> | <p>circula por los tubos con equipos en paralelo.</p> <p>Nuevo: Redimensionar el conjunto de tubos para obtener un equipo más grande.</p> |
| $R_{dc} < R_{dreq}$ $(\Delta P_c)_{Anulo} > \Delta P_{Req}$ $(\Delta P_c)_{Tubo} < \Delta P_{Req}$ | <p>Está subdimensionado para la transferencia de calor y será operativo por menos de un año. El caudal del fluido que circula por el ánulo es excesivo.</p> | <p>Existente: Aumentar la cantidad de horquillas y reducir el caudal del fluido de servicio si está circulando por el ánulo. Probar el fluido que circula por el ánulo con equipos en paralelo.</p> <p>Nuevo: Redimensionar el conjunto de tubos para obtener un equipo más grande.</p> |
| $R_{dc} > R_{dreq}$ $(\Delta P_c)_{Anulo} < \Delta P_{Req}$ $(\Delta P_c)_{Tubo} < \Delta P_{Req}$ | <p>Está sobredimensionado para la transferencia de calor y será operativo por más de un año. Permite aumentos de producción para ambos fluidos.</p> | <p>Existente: Reducir la cantidad de horquillas y aumentar el caudal del fluido de servicio.</p> <p>Nuevo: Redimensionar el conjunto de tubos para obtener un equipo más pequeño.</p> |
| $R_{dc} > R_{dreq}$ $(\Delta P_c)_{Anulo} < \Delta P_{Req}$ $(\Delta P_c)_{Tubo} > \Delta P_{Req}$ | <p>Está sobredimensionado para la transferencia de calor y será operativo por más de un año. El caudal del fluido que circula por el tubo es excesivo.</p> | <p>Existente: Reducir el caudal del fluido de servicio si va por el tubo; Cambiar la disposición de los fluidos en ánulo y tubo; Reducir la cantidad de horquillas; Emplear equipos en serie-paralelo.</p> <p>Nuevo: Redimensionar el conjunto de tubos.</p> |
| $R_{dc} > R_{dreq}$ $(\Delta P_c)_{Anulo} > \Delta P_{Req}$ $(\Delta P_c)_{Tubo} < \Delta P_{Req}$ | <p>Está sobredimensionado para la transferencia de calor y será operativo por más de un año. El caudal del fluido que circula por el ánulo es excesivo.</p> | <p>Existente: Reducir el caudal del fluido de servicio si va por el ánulo; Cambiar la disposición de los fluidos en ánulo y tubo; Reducir la cantidad de horquillas; Emplear equipos en serie-paralelo.</p> <p>Nuevo: Redimensionar el conjunto de tubos.</p> |

Fig. 6.22. Diagnóstico para la optimización operativa de IQDT.

Relaciones de semejanza:

$$h \propto G^{0,8}$$

$$\Delta P \propto G^2$$

$$\frac{(h)_1}{(h)_2} = \frac{(G^{0,8})_1}{(G^{0,8})_2} \rightarrow (h)_2 = (h)_1 \frac{(G^{0,8})_2}{(G^{0,8})_1}$$

$$\frac{(\Delta P)_1}{(\Delta P)_2} = \frac{(G^2)_1}{(G^2)_2} \rightarrow (G^2)_2 = (G^2)_1 \frac{(\Delta P)_2}{(\Delta P)_1}$$

Flujograma para el cálculo de verificación de IQDT existentes:

| Variables | | | Unidad | Serie-Serie | | Serie-Paralelo | |
|---|-------------------------------------|----------------|-------------------------|-------------|------|----------------|------|
| | | | | Caliente | Frío | Caliente | Frío |
| <i>Variables operativas del proceso</i> | | | | | | | |
| Temperatura de entrada fluidos | T ₁ | t ₁ | °C | | | | |
| Temperatura de salida fluidos | T ₂ | t ₂ | °C | | | | |
| Cantidad de corrientes en paralelo | n | | Kg/h | | | | |
| Caudal másico del fluido en c/Eq | W | w | Kg/h | | | | |
| <i>Características de los equipos</i> | | | | | | | |
| Tamaño del equipo | A _{Eq} | | m ² | | | | |
| Cantidad total de horquillas | N _h | | Adim | | | | |
| Cantidad de horquillas en c/Eq | N _{hEq} | | Adim | | | | |
| Diámetro de tubos: Interior/Exterior | D ₁ / D ₃ | | Pulgadas | | | | |
| Espesor de tubos: Interior/Exterior | e ₁ / e ₃ | | BWG | | | | |
| Longitud de los tubos | L _h | | Mts | | | | |
| Área de transferencia por horquilla | A _h | | m ² | | | | |
| <i>Requisitos para el diseño de los equipos</i> | | | | | | | |
| Factor de ensuciamiento requerido | Rd _R | | h°Cm ² /Kcal | | | | |
| Caída de presión requerida | ΔP _R | | Lb/pulg ² | | | | |
| <i>Balances de masa y calor</i> | | | | | | | |
| Calor transferido en el equipo | Q _D | | Kcal/h | | | | |
| Relación de caudales másicos | R _{CM} | | Adm | | | | |
| Rel. geométrica caudales másicos | RG _{CM} | | Adm | | | | |
| Disposición de fluidos: | Tubo/Ánulo | | Adm | | | | |
| Masa velocidad: Tubo/Ánulo | Gi / Ge | | Kg/hm ² | | | | |
| <i>Transferencia de calor (TDC)</i> | | | | | | | |
| Fuerza impulsora media logarítmica | ΔT _{ml} | | °C | | | | |
| Fuerza impulsora Serie-Paralelo | ΔT | | °C | | | | |
| Temp. calórica fluidos: Caliente/Frío | Tc | tc | °C | | | | |
| Fuerza impulsora media calórica | ΔT _c | | °C | | | | |
| Diámetro equivalente p/TDC: Ánulo | D _{eq} | | mm | | | | |
| Coefficiente pelicular: Tubo/Ánulo | h _{ie} / h _e | | Kcal/h°Cm ² | | | | |
| Coefficiente global limpio | U _C | | Kcal/h°Cm ² | | | | |
| Coef. global de diseño calculado | U _D | | Kcal/h°Cm ² | | | | |
| Área de transferencia de calor | A _D | | m ² | | | | |
| Cantidad de horquillas calculadas | N _{hc} | | Adim | | | | |
| Cantidad de horquillas adoptadas | N _h | | Adim | | | | |
| Tamaño del equipo | A _{Eq} | | m ² | | | | |
| Coefficiente global de diseño | U _D | | Kcal/h°Cm ² | | | | |
| Factor ensuciamiento calculado | Rd _C | | h°Cm ² /Kcal | | | | |
| Vida Útil | VU | | Años | | | | |
| <i>Transferencia de cantidad de movimiento: Caída de presión en fluidos (CDP)</i> | | | | | | | |
| Diámetro equivalente p/CDP: Ánulo | D' _{eq} | | mm | | | | |
| CDP calculada: Tubo, Anulo | ΔP _i / ΔP _e | | Lb/pulg ² | | | | |
| <i>Condiciones operativas de puesta en marcha (PEM)</i> | | | | | | | |
| Área requerida | A _C | | m ² | | | | |
| Cantidad horquillas calculadas | N' _{hc} | | Adim | | | | |
| Cant. horquillas adoptadas p/equipo | N' _h | | Adim | | | | |
| Caudal fluido servicio corregido | w _C / W _C | | Kg/h | | | | |
| CDP fluido servicio p/PEM | ΔP' _i / ΔP' _e | | Lb/pulg ² | | | | |

Fig. 6.25. Resultados obtenidos IQDT existentes.

| Variables | Unidad | | Fluido | | Fluido | |
|--|-------------------------------------|-------------------------|----------|------|----------|--------------|
| | | | Caliente | Frío | Caliente | Frío |
| <i>Variables operativas del proceso</i> | | | | | | |
| Temperatura de entrada fluidos | T ₁ | t ₁ | °C | | | |
| Temperatura de salida fluidos | T ₂ | t ₂ | °C | | | |
| Caudal másico fluido: Caliente/Frío | W | w | Kg/h | | | |
| <i>Características de los equipos</i> | | | | | | |
| Diámetro de tubos: Interior/Exterior | D ₁ / D ₃ | Pulgadas | | | | |
| Espesor de tubos: Interior/Exterior | e ₁ / e ₃ | BWG | | | | |
| Longitud de los tubos | L _h | Mts | | | | |
| Área de transferencia por horquilla | A _h | m ² | | | | |
| <i>Requisitos para el diseño de los equipos</i> | | | | | | |
| Factor de ensuciamiento requerido | Rd _R | h°Cm ² /Kcal | | | | |
| Caída de presión requerida | ΔP _R | Lb/pulg ² | | | | |
| <i>Balances de masa y calor</i> | | | | | | |
| Calor transferido en el equipo | Q _D | Kcal/h | | | | |
| Relación de caudales másicos | R _{CM} | Adm | | | | |
| Relación geométrica caudales másicos | RG _{CM} | Adm | | | | |
| Disposición de fluidos: | Tubo / Anulo | Adm | | Tubo | Anulo | Tubo / Anulo |
| Masa velocidad: Tubo/Anulo | Gi / Ge | Kg/hm ² | | | | |
| <i>Transferencia de calor (TDC)</i> | | | | | | |
| Fuerza impulsora media logarítmica | ΔT _{ml} | °C | | | | |
| Temp. calórica fluidos: Caliente/Frío | T _c t _c | °C | | | | |
| Fuerza impulsora media calórica | ΔT _c | °C | | | | |
| Diámetro equiv. p/TDC: Anulo | D _{eq} | mm | | | | |
| Coefficiente global de diseño adoptado | U _D | Kcal/h°Cm ² | | | | |
| Área de TDC calculada | A _D | m ² | | | | |
| Cantidad de horquillas calculadas | N _{hc} | Adim | | | | |
| Cantidad de horquillas adoptadas | N _h | Adim | | | | |
| Tamaño del equipo | A _{Eq} | m ² | | | | |
| Coefficiente global de diseño calculado | U' _D | Kcal/h°Cm ² | | | | |
| Coefficiente pelicular: Tubo/Anulo | h _{ie} / h _e | Kcal/h°Cm ² | | | | |
| Coefficiente global limpio | U _C | Kcal/h°Cm ² | | | | |
| Factor ensuciamiento calculado | Rd _c | h°Cm ² /Kcal | | | | |
| Vida Útil | VU | Años | | | | |
| <i>Transferencia de cantidad de movimiento: Caída de presión fluidos (CDP)</i> | | | | | | |
| Diámetro equivalente p/CDP: Anulo | D' _{eq} | mm | | | | |
| CDP calculada: Tubo, Anulo | ΔP _i / ΔP _e | Lb/pulg ² | | | | |
| <i>Condiciones operativas de puesta en marcha (PEM)</i> | | | | | | |
| Área requerida | A _C | m ² | | | | |
| Cantidad horquillas calculadas | N' _{hc} | Adim | | | | |
| Cant. horquillas adoptadas p/equipo | N' _h | Adim | | | | |
| Temperaturas de salida p/PEM | T ₂ ' t ₂ ' | °C | | | | |
| Caudal fluido servicio corregido | w _C / W _C | Kg/h | | | | |
| CDP fluido servicio corregida | ΔP' _i / ΔP' _e | Lb/pulg ² | | | | |

Fig. 6.26. Resultados obtenidos para IQDT nuevos.

Cuadro 6.1. Catálogo de Tubos de Acero Inoxidable.

| Diámetro Exterior | | BWG | | | | | |
|-------------------|--------|------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|
| | | 20 | 18 | 16 | 14 | 12 | 10 |
| | | Espesor [mm] | | | | | |
| [pulgadas] | [mm] | 0,89 | 1,24 | 1,65 | 2,11 | 2,77 | 3,40 |
| | | Diámetro Interior [mm] | | | | | |
| 3/8 | 9,53 | 7,75 | 7,05 | | | | |
| 1/2 | 12,70 | 10,92 | 10,22 | 9,40 | | | |
| 5/8 | 15,88 | 14,10 | 13,40 | 12,58 | | | |
| 3/4 | 19,05 | 17,27 | 16,57 | 15,75 | 14,83 | | |
| 7/8 | 22,23 | 20,45 | 19,75 | 18,93 | 18,01 | | |
| 1 | 25,40 | 23,62 | 22,92 | 22,10 | 21,18 | 19,86 | |
| 1 1/4 | 31,75 | 29,97 | 29,27 | 28,45 | 27,53 | 26,21 | |
| 1 1/2 | 38,10 | 36,32 | 35,62 | 34,80 | 33,88 | 32,56 | |
| 1 3/4 | 44,45 | | 41,97 | 41,15 | 40,23 | 38,91 | 37,65 |
| 2 | 50,80 | | 48,32 | 47,50 | 46,58 | 45,26 | 44,00 |
| 2 1/2 | 63,50 | | 61,02 | 60,20 | 59,28 | 57,96 | 56,70 |
| 3 | 76,20 | | 73,72 | 72,90 | 71,98 | 70,66 | 69,40 |
| 3 1/2 | 88,90 | | 86,42 | 85,60 | 84,68 | 83,36 | 82,10 |
| 4 | 101,60 | | | 98,30 | 97,38 | 96,06 | 94,80 |
| 4 1/2 | 114,30 | | | 111,00 | 110,08 | 108,76 | 107,50 |

Fuente: <http://www.peninsulardevastagos.es/wp-content/uploads/peninsular-tubos-para-altas-temperaturas-y-ambientes-corrosivos.pdf>

Cuadro 6.2. Relación Geométrica de Caudales Másicos.

| Arreglo de Tubos | | BWG | | | | | |
|-------------------|---------------|---------------------------------------|--------|-------------|-------|------|------|
| | | 20 | 18 | 16 | 14 | 12 | 10 |
| Diámetro Exterior | | Espesor [mm] | | | | | |
| Tubo Interior | Tubo Exterior | 0,89 | 1,24 | 1,65 | 2,11 | 2,77 | 3,40 |
| [pulgadas] | [pulgadas] | W ₂ /W ₁ [adim] | | | | | |
| 3/8 | 1/2 | 0,48 | 0,28 | | | | |
| | 5/8 | 1,80 | 1,79 | | | | |
| | 3/4 | 3,46 | 3,70 | | | | |
| | 7/8 | 5,46 | 6,03 | | | | |
| | 1 | 7,79 | 8,76 | | | | |
| | 1 1/4 | 13,46 | 15,43 | | | | |
| | 1 1/2 | 20,48 | 23,74 | | | | |
| | 1 3/4 | | 33,66 | | | | |
| | 2 | | 45,21 | | | | |
| | 2 1/2 | | 73,19 | | | | |
| | 3 | | 107,67 | | | | |
| | 3 1/2 | | 148,65 | | | | |
| | 4 | | | | | | |
| 4 1/2 | | | | | | | |
| 1/2 | 5/8 | 0,31 | 0,17 | | | | |
| | 3/4 | 1,15 | 1,08 | 0,98 | | | |
| | 7/8 | 2,15 | 2,19 | 2,23 | | | |
| | 1 | 3,33 | 3,49 | 3,70 | | | |
| | 1 1/4 | 6,18 | 6,66 | 7,33 | | | |
| | 1 1/2 | 9,71 | 10,60 | 11,88 | | | |
| | 1 3/4 | | 15,32 | 17,34 | | | |
| | 2 | | 20,81 | 23,71 | | | |
| | 2 1/2 | | 34,10 | 39,19 | | | |
| | 3 | | 50,49 | 58,32 | | | |
| | 3 1/2 | | 69,96 | 81,10 | | | |
| | 4 | | | 107,53 | | | |
| | 4 1/2 | | | 137,62 | | | |
| 5/8 | 3/4 | 0,23 | 0,13 | | | | |
| | 7/8 | 0,84 | 0,77 | 0,67 | | | |
| | 1 | 1,54 | 1,52 | 1,49 | | | |
| | 1 1/4 | 3,25 | 3,37 | 3,52 | | | |
| | 1 1/2 | 5,37 | 5,67 | 6,06 | | | |
| | 1 3/4 | | 8,41 | 9,11 | | | |
| | 2 | | 11,61 | 12,67 | | | |
| | 2 1/2 | | 19,35 | 21,32 | | | |
| | 3 | | 28,88 | 32,01 | | | |
| | 3 1/2 | | 40,22 | 44,74 | | | |
| | 4 | | | 59,51 | | | |
| | 4 1/2 | | | 76,32 | | | |
| | 3/4 | 7/8 | 0,18 | 0,10 | | | |
| 1 | | 0,65 | 0,59 | 0,51 | 0,39 | | |
| 1 1/4 | | 1,79 | 1,80 | 1,80 | 1,80 | | |
| 1 1/2 | | 3,21 | 3,30 | 3,42 | 3,57 | | |
| 1 3/4 | | | 5,09 | 5,36 | 5,71 | | |
| 2 | | | 7,18 | 7,63 | 8,22 | | |
| 2 1/2 | | | 12,24 | 13,15 | 14,33 | | |
| 3 | | | 18,47 | 19,96 | 21,91 | | |

| | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------------|-------|-------|
| | 3 1/2 | | 25,88 | 28,08 | 30,95 | |
| | 4 | | | 37,49 | 41,47 | |
| | 4 1/2 | | | 48,21 | 53,45 | |
| 7/8 | 1 | 0,15 | 0,08 | | | |
| | 1 1/4 | 0,97 | 0,93 | 0,88 | 0,81 | |
| | 1 1/2 | 1,97 | 1,99 | 2,00 | 2,02 | |
| | 1 3/4 | | 3,25 | 3,35 | 3,47 | |
| | 2 | | 4,72 | 4,92 | 5,17 | |
| | 2 1/2 | | 8,28 | 8,74 | 9,32 | |
| | 3 | | 12,67 | 13,46 | 14,46 | |
| | 3 1/2 | | 17,89 | 19,08 | 20,60 | |
| | 4 | | | 25,60 | 27,73 | |
| | 4 1/2 | | | 33,02 | 35,86 | |
| 1 | 1 1/4 | 0,45 | 0,40 | 0,34 | 0,25 | 0,11 |
| | 1 1/2 | 1,21 | 1,19 | 1,16 | 1,12 | 1,05 |
| | 1 3/4 | | 2,13 | 2,15 | 2,17 | 2,20 |
| | 2 | | 3,22 | 3,30 | 3,40 | 3,56 |
| | 2 1/2 | | 5,86 | 6,10 | 6,40 | 6,88 |
| | 3 | | 9,12 | 9,56 | 10,11 | 11,02 |
| | 3 1/2 | | 12,99 | 13,68 | 14,55 | 15,98 |
| | 4 | | | 18,46 | 19,70 | 21,76 |
| | | 4 1/2 | | | 23,91 | 25,57 |
| 1 1/4 | 1 1/2 | 0,35 | 0,30 | 0,25 | 0,18 | 0,08 |
| | 1 3/4 | | 0,88 | 0,85 | 0,81 | 0,74 |
| | 2 | | 1,55 | 1,54 | 1,53 | 1,51 |
| | 2 1/2 | | 3,17 | 3,23 | 3,31 | 3,42 |
| | 3 | | 5,17 | 5,32 | 5,51 | 5,80 |
| | 3 1/2 | | 7,54 | 7,81 | 8,13 | 8,65 |
| | 4 | | | 10,69 | 11,18 | 11,96 |
| | | 4 1/2 | | | 13,98 | 14,66 |
| 1 1/2 | 1 3/4 | | 0,24 | 0,20 | 0,15 | 0,06 |
| | 2 | | 0,70 | 0,66 | 0,63 | 0,56 |
| | 2 1/2 | | 1,79 | 1,79 | 1,80 | 1,80 |
| | 3 | | 3,14 | 3,19 | 3,25 | 3,34 |
| | 3 1/2 | | 4,74 | 4,85 | 4,98 | 5,19 |
| | 4 | | | 6,78 | 7,00 | 7,33 |
| | | 4 1/2 | | | 8,98 | 9,29 |
| 2 | 2 1/2 | | 0,49 | 0,46 | 0,43 | 0,38 |
| | 3 | | 1,22 | 1,21 | 1,20 | 1,18 |
| | 3 1/2 | | 2,09 | 2,10 | 2,12 | 2,13 |
| | 4 | | | 3,14 | 3,18 | 3,24 |
| | | 4 1/2 | | | 4,32 | 4,40 |
| 2 1/2 | 3 | | 0,38 | 0,35 | 0,33 | 0,29 |
| | 3 1/2 | | 0,92 | 0,91 | 0,89 | 0,87 |
| | 4 | | | 1,55 | 1,55 | 1,54 |
| | | 4 1/2 | | | 2,29 | 2,30 |
| 3 | 3 1/2 | | 0,31 | 0,29 | 0,26 | 0,23 |
| | 4 | | | 0,73 | 0,71 | 0,69 |
| | | 4 1/2 | | | 1,23 | 1,22 |
| 4 | 4 1/2 | | | 0,21 | 0,19 | 0,16 |
| | | | | | 0,16 | 0,14 |

Fuente: Elaboración propia a partir del Cuadro 6.1.

CAPÍTULO 7

Diseño de intercambiadores de coraza y tubos

Aplicaciones industriales: Pasta de celulosa y papel; producción de azúcar; levadura de cereza; alcohol etílico; productos químicos; agroindustrias; lácteos; petroquímica; etc.

Procesos industriales para transferencia de calor entre dos fluidos con una extracción intermedia:

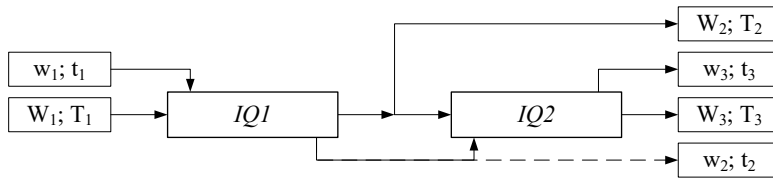


Fig. 7.1. Intercambiadores de calor en serie-serie con extracción intermedia.

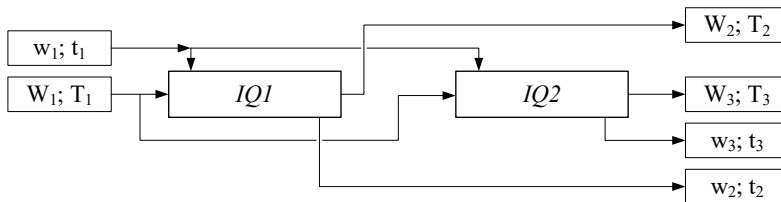


Fig. 7.2. Intercambiadores de calor en paralelo-paralelo con extracción intermedia.

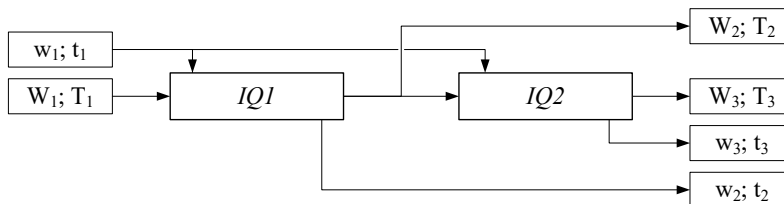


Fig. 7.3. Intercambiadores de calor en serie-paralelo (*caliente-frío*) con extracción intermedia.

Intercambiadores de calor de coraza y tubos:

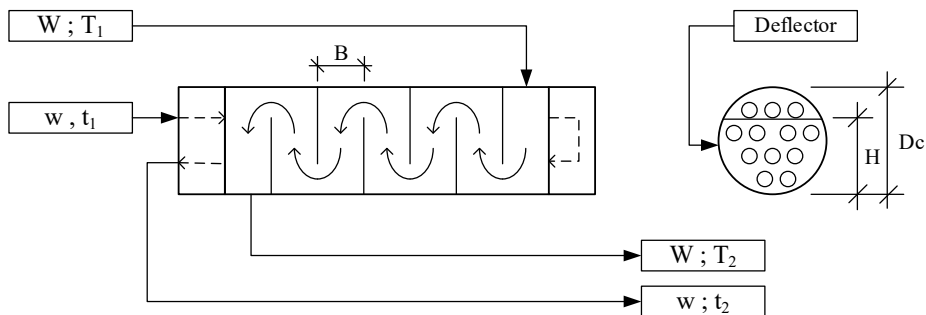


Fig. 7.4. Intercambiador de calor de coraza y tubos 1-2.

Disposición de los tubos en la coraza:

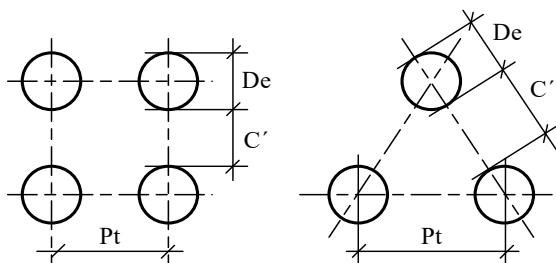


Fig. 7.5. Disposición de tubos en la coraza de los intercambiadores de calor.

Identificación de las corrientes:

| Variables operativas del proceso | | | Intercambiador | | | |
|-------------------------------------|-------------|--------|----------------|------|----------|------|
| | | | 1 | | 2 | |
| | | | Fluidos | | | |
| Detalle | Variable | Unidad | Caliente | Frío | Caliente | Frío |
| Fluido de proceso | NaOH | | | | | |
| Concentración del fluido de proceso | PP | % | | | | |
| Fluido de servicio | Agua | | | | | |
| Temperatura de entrada de fluidos | T_1 / t_1 | °C | | | | |
| Temperatura de salida de fluidos | T_3 / t_2 | °C | | | | |
| Temperatura de salida intermedia | T_2 | °C | | | | |
| Caudal másico de fluidos | W / w | Kg/h | | | | |

Fig. 7.6. Identificación de las corrientes del proceso.

Características de los equipos y requisitos del proceso:

| Equipo Existente | | | | |
|--|---------------------------|------------------|-------------------------------|----------|
| Detalle | | Variable | Unidad | Cantidad |
| Coraza: | Diámetro | | D_c | Pulgadas |
| | Número de pasos en coraza | | n_c | Adim. |
| | Deflectores: | Tipo | Segmentados | |
| | | Separación | B | Pulgadas |
| | | Altura | H | Pulgadas |
| Material | | A°C° | | |
| Tubos: | Diámetro | | D_e | Pulgadas |
| | Espesor | | e_c | BWG |
| | Longitud | | L_t | Pie |
| | Cantidad | | N_t | Adim. |
| | Disposición de tubos | | Cuadro/Triángulo | |
| | Paso entre tubos | | P_t | Pulgadas |
| | Numero de pasos por tubos | | n_t | Adim. |
| | Material | | Acero Inox AISI 316 | |
| Equipo Nuevo | | | | |
| Coraza: | Deflectores: | Tipo | Segmentados | |
| | Material | | A°C° | |
| Tubos: | Espesor | | e_c | BWG |
| | Longitud máxima | | L_t | Pie |
| | Disposición de tubos | | Cuadro/Triángulo | |
| | Material | | Acero Inox AISI 316 | |
| Requisitos del proceso para el diseño de los equipos | | | | |
| Factor de ensuciamiento total requerido | | R_{dreq} | $h\text{ pie}^{2\circ F}/BTU$ | |
| Caída de presión máxima admisible | | ΔP_{req} | $lb/pulg^2$ | |

Fig. 7.7. Requisitos para el diseño de los equipos nuevos.

Balance de masas:

$$W_1 = W_2 + W_3$$

$$w_1 = w_2 + w_3$$

Conexión serie-serie:

Primer Equipo: $Q_1 = W_1 c_{p1} (T_1 - T_2) = w_1 c_{p1} (t_2 - t_1)$

Segundo Equipo: $Q_2 = W_3 C_{p2}(T_2 - T_3) = w_3 c_{p2}(t_3 - t_2)$

Balance global: $Q = Q_1 + Q_2$

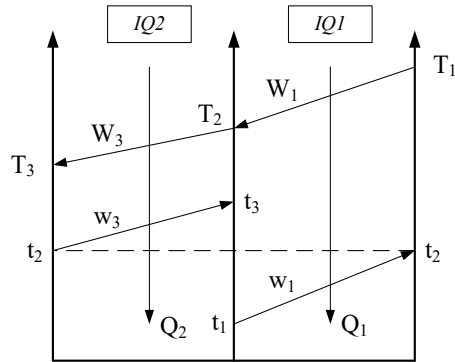


Fig. 7.8. Perfil de temperaturas para equipos conectados en *serie-serie*.

Conexión paralelo-paralelo:

Primer Equipo: $Q_1 = W_1 C_{p1}(T_1 - T_2) = w_1 c_{p1}(t_2 - t_1)$

Segundo Equipo: $Q_2 = W_3 C_{p3}(T_1 - T_3) = w_3 c_{p3}(t_3 - t_1)$

Balance global: $Q = Q_1 + Q_2$

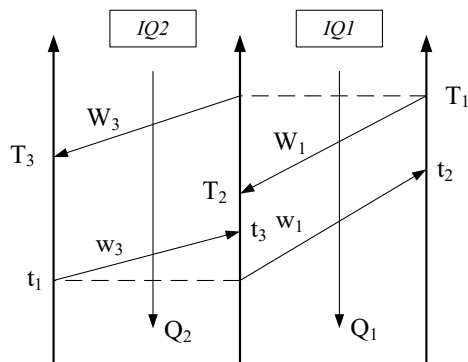


Fig. 7.9. Perfil de temperaturas para equipos conectados en *paralelo-paralelo*.

Conexión serie-paralelo:

Primer Equipo: $Q_1 = W_1 C_{p1} (T_1 - T_2) = w_1 c_{p1} (t_2 - t_1)$

Segundo Equipo: $Q_2 = W_3 C_{p3} (T_2 - T_3) = w_3 c_{p3} (t_3 - t_1)$

Balance global: $Q = Q_1 + Q_2$

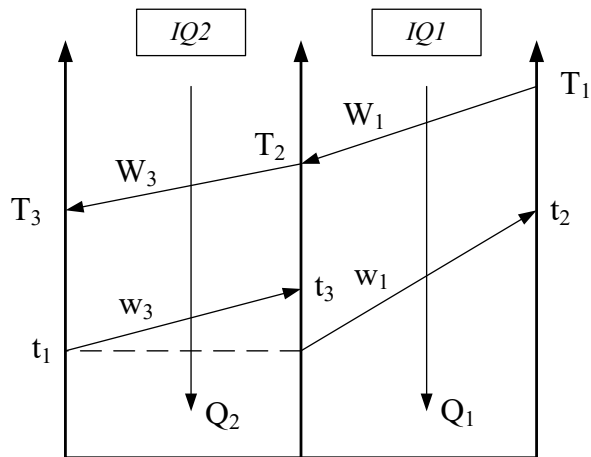


Fig. 7.10. Perfil de temperaturas para equipos conectados en *serie-paralelo*.

Balance de calor para los fluidos:

$$Q = \sum_1^n Q_i$$

Diseño de intercambiadores de calor de coraza y tubos

Ecuación de diseño para intercambiadores de calor:

$$Q_D = U_D A_D F_t \Delta T M L_D \quad (1)$$

Perfil de temperaturas para el equipo:

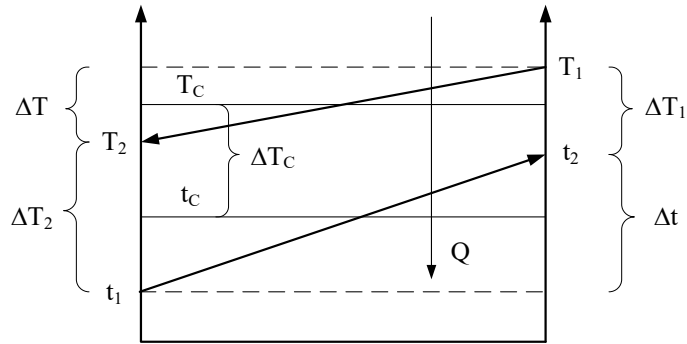


Fig. 7.11. Perfil de temperaturas de los fluidos en el intercambiador de calor.

Balace de calor para los fluidos:

$$Q_D = WC_p \Delta T \quad (2)$$

$$Q_D = wc_p \Delta t \quad (3)$$

Temperatura de salida vs. Caudal másico del fluido de servicio:

$$Q_D = WC_p \Delta T = wc_p \Delta t$$

Fuerza impulsora media logarítmica para la transferencia de calor:

$$\Delta T_{ml_D} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad (4)$$

$$\Delta T_1 = T_1 - t_2$$

$$\Delta T_2 = T_2 - t_1$$

Fuerza impulsora media calórica para la transferencia de calor:

$$\Delta T_c = T_c - t_c$$

$$T_c = T_2 + F_c(T_1 - T_2)$$

$$t_c = t_1 + F_c(t_2 - t_1)$$

$$F_c = \frac{\left(\frac{1}{K_c}\right) + \left[\frac{r}{(r-1)}\right]}{1 + \frac{\ln(K_c+1)}{\ln r}} - \frac{1}{K_c}$$

$$K_c = \frac{(U_h - U_c)}{U_c}$$

$$r = \frac{\Delta T_c}{\Delta T_h} = \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}$$

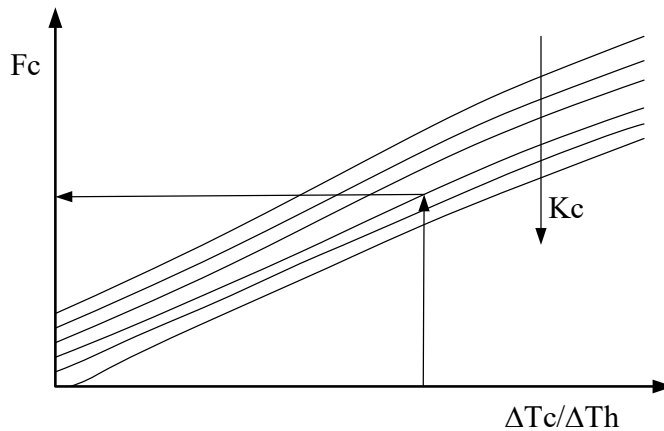


Fig. 7.12. Factor de corrección de rangos para las temperaturas calóricas.

Fuerza impulsora media aritmética para la transferencia de calor:

$$\Delta T_m = T_m - t_m$$

$$T_m = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

$$t_m = \frac{t_1 + t_2}{2}$$

Factor de corrección F_t de la fuerza impulsora:

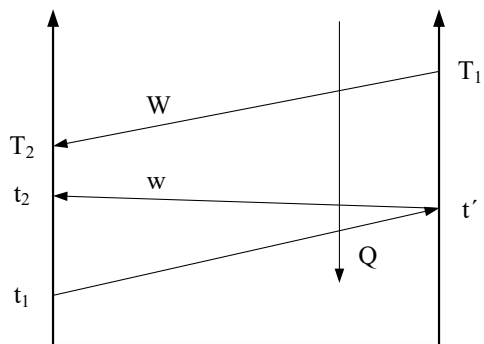


Fig. 7.13. Perfil de temperaturas para un intercambiador 1-2.

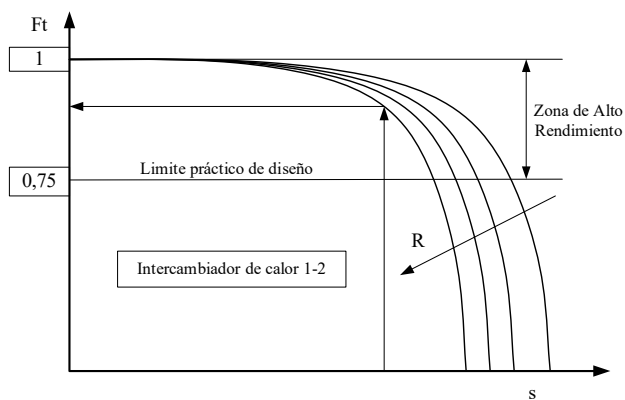


Fig. 7.14. Factor F_t para un intercambiador de calor 1-2.

$$s = \frac{(t_2 - t_1)}{(T_1 - t_1)} \leq 1$$

$$R = \frac{wC_p}{WC_p} = \frac{(T_1 - T_2)}{(t_2 - t_1)}$$

Temperatura de cruce y de aproximación:

$$CT = t_2 - T_2$$

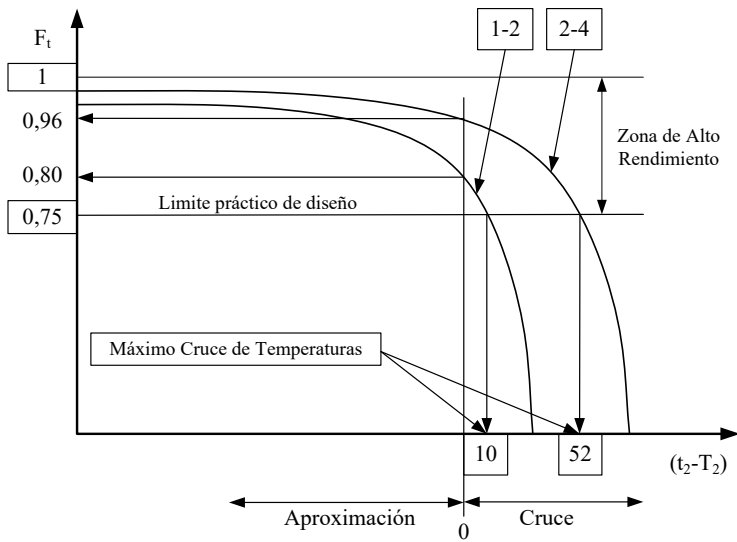


Fig. 7.15. Factor F_t para intercambiadores de calor 1-2 y 2-4.

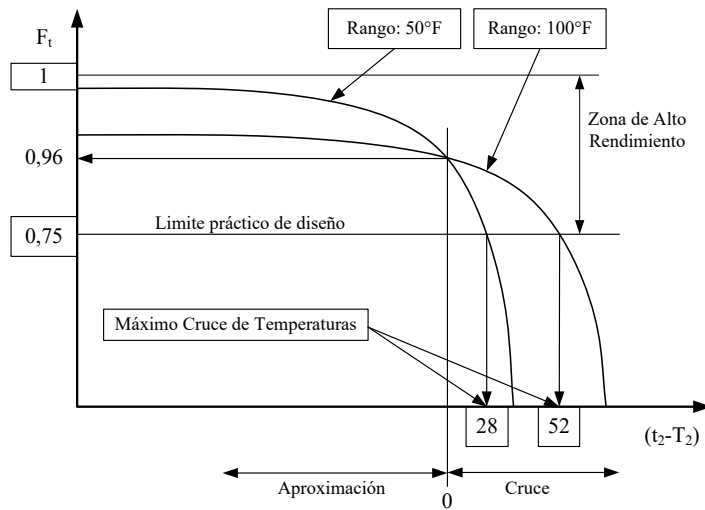


Fig. 7.16. Factor F_t para un intercambiador de calor 1-2 con rangos diferentes.

Determinación del F_t para un intercambiador del tipo 1-2, 1-4, 1-6, etc.:

$$F_t = \frac{\left[\frac{\sqrt{R^2+1}}{R-1} \right] \ln \frac{(1-s)}{(1-Rs)}}{\ln \frac{2-s(R+1-\sqrt{R^2+1})}{2-s(R+1+\sqrt{R^2+1})}} \quad (5)$$

Determinación del F_t para un intercambiador del tipo 2-4; 2-8; 2-12, etc.:

$$F_t = \frac{\left[\frac{\sqrt{R^2+1}}{2(R-1)} \right] \ln \frac{(1-s)}{(1-Rs)}}{\ln \frac{2/s-1-R+(2/s)\sqrt{(1-s)(1-Rs)+\sqrt{R^2+1}}}{2/s-1-R+(2/s)\sqrt{(1-s)(1-Rs)-\sqrt{R^2+1}}}} \quad (6)$$

Disposición de los fluidos y selección del conjunto coraza y tubos:

Masa velocidad de los fluidos:

$$G = v\rho = W/a$$

$$G_i = \frac{4W_i n_t}{\pi D_i^2 N_t} \quad (7)$$

$$G_e = \frac{W_e P_t n_c}{D_c BC'} \quad (8)$$

Relación de caudales másicos:

$$R_{CM} = \frac{w}{W} = \frac{C_p \Delta T}{c_p \Delta t} \quad (9)$$

Relación geométrica de caudales másicos:

$$RG_{CM} = \frac{W_e}{W_i} \approx \frac{4 D_c BC' n_t}{\pi D_i^2 N_t P_t n_c} \quad (10)$$

Tamaño del intercambiador de calor:

$$A_{Eq} = A_D = \pi D_e N_t L_t \quad (11)$$

Longitud de los tubos:

$$L_t = \frac{A_D}{\pi D_i N_t} \quad (12)$$

Proceso de transferencia de calor entre los fluidos:

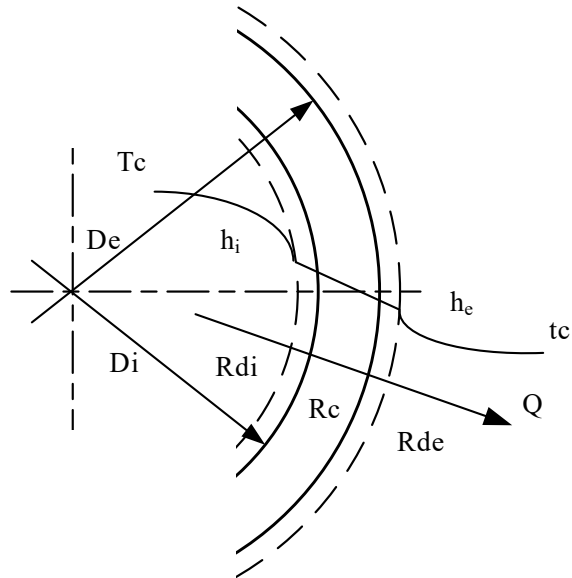


Fig. 7.17. Transferencia de calor a través de una pared cilíndrica.

Coefficiente global de transferencia de calor de diseño:

$$\frac{1}{U_D} = \frac{1}{U_C} + R_d \quad (13)$$

Coefficiente global de transferencia de calor limpio:

$$\frac{1}{U_C} = \frac{1}{h_{ie}} + \frac{1}{h_e} \quad (14)$$

$$h_{ie} = h_i \frac{D_i}{D_e}$$

Coefficientes peliculares de transferencia de calor:

$$h_{ie} = a \frac{k}{D_e} \left(\frac{D_i G_i}{\mu} \right)^\alpha \left(\frac{c_p \mu}{k} \right)^\beta \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^\gamma \quad (15)$$

a, α, β y γ : son coeficientes que valen 0,027; 0,8; 1/3 y 0,14 respectivamente.

$$h_e = a \frac{k}{D_{eq}} \left(\frac{D_{eq} G_e}{\mu} \right)^\alpha \left(\frac{c_p \mu}{k} \right)^\beta \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^\gamma \quad (16)$$

a, α, β y γ : son coeficientes que valen 0,36; 0,55; 1/3 y 0,14 respectivamente.

Diámetro equivalente del lado de la coraza para la transferencia de calor:

Disposición de los tubos en cuadro:

$$D_{eq} = 4 \frac{S_p}{P_m} = \frac{(4P_t^2 - \pi D_e^2)}{\pi D_e} \quad (17)$$

Disposición de los tubos en triángulo:

$$D_{eq} = \frac{(4P_t^2 \sqrt{0,75} - \pi D_e^2)}{\pi D_e} \quad (18)$$

Temperatura de pared:

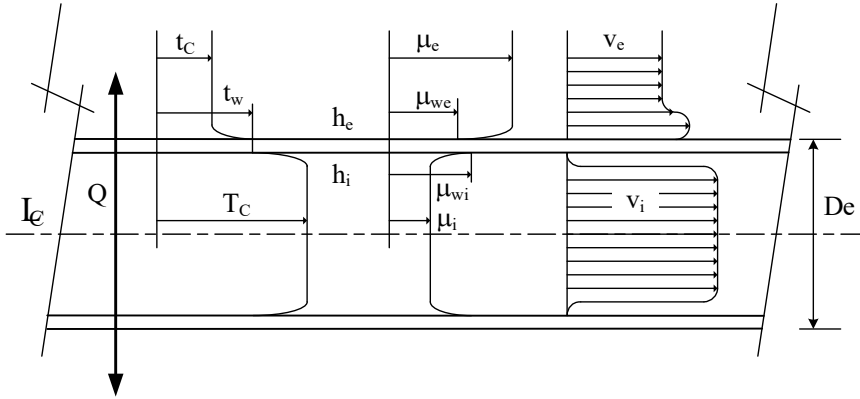


Fig. 7.18. Temperatura de pared cuando el fluido caliente circula por los tubos.

Para el fluido caliente circulando por los tubos:

$$t_w = t_c + \frac{h_{ie}}{h_{ie} + h_e} (T_c - t_c) = T_c - \frac{h_e}{h_{ie} + h_e} (T_c - t_c)$$

Para el fluido caliente circulando por la coraza:

$$t_w = t_c + \frac{h_e}{h_{ie} + h_e} (T_c - t_c) = T_c - \frac{h_{ie}}{h_{ie} + h_e} (T_c - t_c)$$

Vida útil de los equipos:

$$R_{dc} \geq R_{dreq}$$

$$VU = R_{dc}/R_{dreq}$$

Caída de presión total del fluido que circula por los tubos:

$$\Delta P_i = \frac{G_i^2 n_t}{2\rho g_c} \left[f_i \frac{L_t}{D_i \phi_i} + 4 \right] \quad (19)$$

Caída de presión por retorno (ΔP_r) en los tubos:

$$\Delta P_r = 4C_v n_t$$

Cabeza de velocidad:

$$C_v = \frac{\rho \bar{v}^2}{2g_c} = \frac{G^2}{2g_c \rho}$$

Caída de presión del fluido que circula por la coraza:

$$\Delta P_e = f_e \frac{G_e^2}{2\rho g_c} \frac{L_t}{D_{eq} \phi_e} \frac{D_c n_c}{B} \quad (20)$$

Diámetro equivalente en la coraza para la caída de presión: Ídem transferencia de calor.

Factor de fricción de Darcy para la caída de presión de los fluidos:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left\{ \frac{1}{3.7065} \left(\frac{\varepsilon}{D_{eq}} \right) - \frac{5.0452}{R_e} \log \left[\frac{1}{2.8257} \left(\frac{\varepsilon}{D_{eq}} \right)^{1.1098} + \frac{5.8506}{R_e^{0.8981}} \right] \right\}$$

Puesta en marcha para intercambiadores de coraza y tubos:

$$Q_C = U_C A_C \Delta T m_L C = W_D C_p (T_1 - T_2') = w_D c_p (t_2' - t_1)$$

$$\Delta T m_L C = \frac{\Delta T_1' - \Delta T_2'}{\ln \frac{\Delta T_1'}{\Delta T_2'}}$$

$$\Delta T_1' = (T_1 - t_2')$$

$$\Delta T_2' = (T_2' - t_1)$$

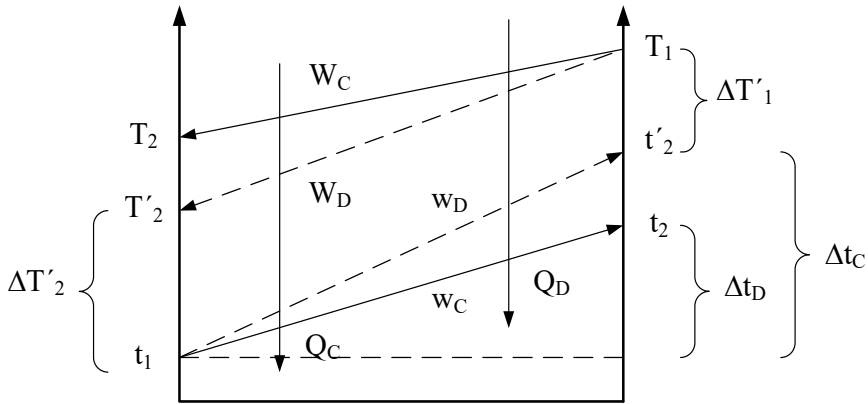


Fig. 7.19. Perfil de temperaturas para la puesta en marcha.

Temperaturas de salida con el equipo limpio:

$$T'_2 = \frac{T_1 - R[(T_1 - t_1) + t_1 e^{(U_{CAD}/W_D c_p)(R-1)}]}{1 - R e^{(U_{CAD}/W_D c_p)(R-1)}} \quad (\text{Contracorriente})$$

$$R = \frac{W_D c_p}{W_D C_p} = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1}$$

$$T'_2 = \frac{[R + e^{(U_{CAD}/W_D c_p)(R+1)}]T_1 + [e^{(U_{CAD}/W_D c_p)(R+1)} - 1]Rt_1}{(R + 1)e^{(U_{CAD}/W_D c_p)(R+1)}} \quad (\text{Paralelas})$$

$$R = \frac{W_D c_p}{W_D C_p} = \frac{T_1 - T'_2}{t'_2 - t_1}$$

$$t'_2 = t_1 + \frac{T_1 - T'_2}{R}$$

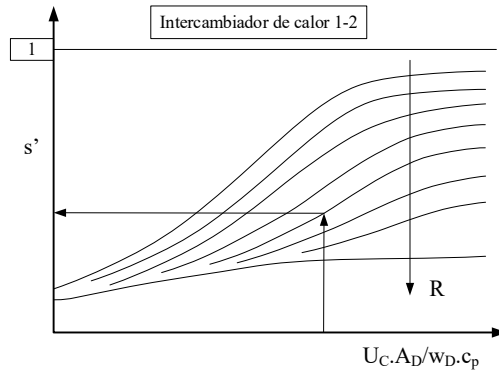


Fig. 7.20. Temperatura salida fluido servicio para la puesta en marcha.

$$F_t \Delta T m l_D = \frac{U_C A_D}{w_D c_p}$$

$$R = \frac{w_D c_p}{W_D C_p} = \frac{(T_1 - T'_2)}{(t'_2 - t_1)}$$

$$s' = \frac{(t'_2 - t_1)}{(T_1 - t_1)}$$

Área de transferencia requerida para la puesta en marcha:

$$A_C = A_D \frac{U_D}{U_C}$$

Caudal del fluido de servicio requerido para la puesta en marcha:

$$w_C = w_D \frac{\Delta t_C}{\Delta t_D} = w_D \frac{(t'_2 - t_1)}{(t_2 - t_1)}$$

Optimización operativa del diseño:

$$R_{dc} \geq R_{dreq} \quad (21)$$

$$\Delta P_c \leq \Delta P_{req} \quad (22)$$

Resultados vs. Acciones correctivas:

| Resultado vs. Requisito | Diagnóstico | Acciones correctivas |
|---|---|--|
| $R_{dc} = R_{dreq}$ $(\Delta P_c)_{Coraza} = \Delta P_{Req}$ $(\Delta P_c)_{Tubo} = \Delta P_{Req}$ | El equipo será operativo durante un año. No admite aumentos de producción. | No es necesario hacer nada siempre que los cálculos hayan contemplado la situación de puesta en marcha y/o los posibles cambios en las condiciones operativas. |
| $R_{dc} > R_{dreq}$ $(\Delta P_c)_{Coraza} > \Delta P_{Req}$ $(\Delta P_c)_{Tubo} > \Delta P_{Req}$ | Está sobredimensionado para la transferencia de calor y será operativo por más de un año. El caudal de los fluidos es excesivo. | Existente: Verificar la resistencia mecánica del equipo a la sobrecarga de presión; Verificar el sistema de transporte de los fluidos a la caída de presión; Reducir el caudal del fluido de servicio; Emplear equipos paralelo-paralelo. Nuevo: Redimensionar el conjunto C-T. |
| $R_{dc} < R_{dreq}$ $(\Delta P_c)_{Coraza} < \Delta P_{Req}$ $(\Delta P_c)_{Tubo} < \Delta P_{Req}$ | Está subdimensionado para la transferencia de calor y será operativo por menos de un año. Permite aumentos del caudal de ambos fluidos. | Existente: Destapar tubos y aumentar el caudal del fluido de servicio. Nuevo: Redimensionar el conjunto C-T para obtener un equipo más grande. |
| $R_{dc} < R_{dreq}$ $(\Delta P_c)_{Coraza} > \Delta P_{Req}$ $(\Delta P_c)_{Tubo} > \Delta P_{Req}$ | Está subdimensionado para la transferencia de calor y será operativo por menos de un año. El caudal de los fluidos es excesivo. | Existente: Emplear equipos en paralelo-paralelo. Nuevo: Redimensionar el conjunto C-T para obtener un equipo más grande. |
| $R_{dc} < R_{dreq}$ $(\Delta P_c)_{Coraza} < \Delta P_{Req}$ $(\Delta P_c)_{Tubo} > \Delta P_{Req}$ | Está subdimensionado para la transferencia de calor y será operativo por menos de un año. El caudal del fluido que circula por el tubo es excesivo. | Existente: Destapar tubos y/o reducir el caudal del fluido de servicio si está circulando por el tubo. Probar con el fluido que circula por los tubos con equipos en paralelo. Nuevo: Redimensionar el conjunto C-T para obtener un equipo más grande. |
| $R_{dc} < R_{dreq}$ $(\Delta P_c)_{Coraza} > \Delta P_{Req}$ $(\Delta P_c)_{Tubo} < \Delta P_{Req}$ | Está subdimensionado para la transferencia de calor y será operativo por menos de un año. El caudal del fluido que circula por la coraza es excesivo. | Existente: Destapar tubos y/o reducir el caudal del fluido de servicio si está circulando por la coraza. Probar el fluido que circula por la coraza con equipos en paralelo. Nuevo: Redimensionar el conjunto C-T |

| | | |
|---|---|--|
| | | para obtener un equipo más grande. |
| $R_{dc} > R_{dreq}$ $(\Delta P_c)_{Coraza} < \Delta P_{Req}$ $(\Delta P_c)_{Tubo} < \Delta P_{Req}$ | Está sobredimensionado para la transferencia de calor y será operativo por más de un año. Permite aumentos de producción para ambos fluidos. | Existente: Tapar tubos y/o aumentar el caudal del fluido de servicio. Nuevo: Redimensionar el conjunto C-T para obtener un equipo más pequeño. |
| $R_{dc} > R_{dreq}$ $(\Delta P_c)_{Coraza} < \Delta P_{Req}$ $(\Delta P_c)_{Tubo} > \Delta P_{Req}$ | Está sobredimensionado para la transferencia de calor y será operativo por más de un año. El caudal del fluido que circula por el tubo es excesivo. | Existente: Reducir el caudal del fluido de servicio si va por los tubos; Cambiar la disposición de los fluidos en coraza y tubos; Emplear equipos en serie-paralelo. Nuevo: Redimensionar el conjunto C-T para adecuarlo al fluido que circula por los tubos. |
| $R_{dc} > R_{dreq}$ $(\Delta P_c)_{Coraza} > \Delta P_{Req}$ $(\Delta P_c)_{Tubo} < \Delta P_{Req}$ | Está sobredimensionado para la transferencia de calor y será operativo por más de un año. El caudal del fluido que circula por la coraza es excesivo. | Existente: Reducir el caudal del fluido de servicio si va por la coraza; Cambiar la disposición de los fluidos en coraza y tubos; Emplear equipos en serie-paralelo. Nuevo: Redimensionar el conjunto C-T para adecuarlo al fluido que circula por la coraza. |

Fig. 7.21. Diagnóstico para la optimización operativa de IQCT.

Relaciones de semejanza:

$$h_{ie} \propto G_i^{0,8} \quad (23)$$

$$h_e \propto G_e^{0,55} \quad (24)$$

$$\Delta P \propto G^2 \quad (25)$$

$$\frac{(h_{ie})_1}{(h_{ie})_2} = \frac{(G_i^{0,8})_1}{(G_i^{0,8})_2} \rightarrow (h_{ie})_2 = (h_{ie})_1 \frac{(G_i^{0,8})_2}{(G_i^{0,8})_1}$$

$$\frac{(h_e)_1}{(h_e)_2} = \frac{(G_e^{0,55})_1}{(G_e^{0,55})_2} \rightarrow (h_e)_2 = (h_e)_1 \frac{(G_e^{0,55})_2}{(G_e^{0,55})_1}$$

Flujograma para el cálculo de diseño de IQCT nuevos:

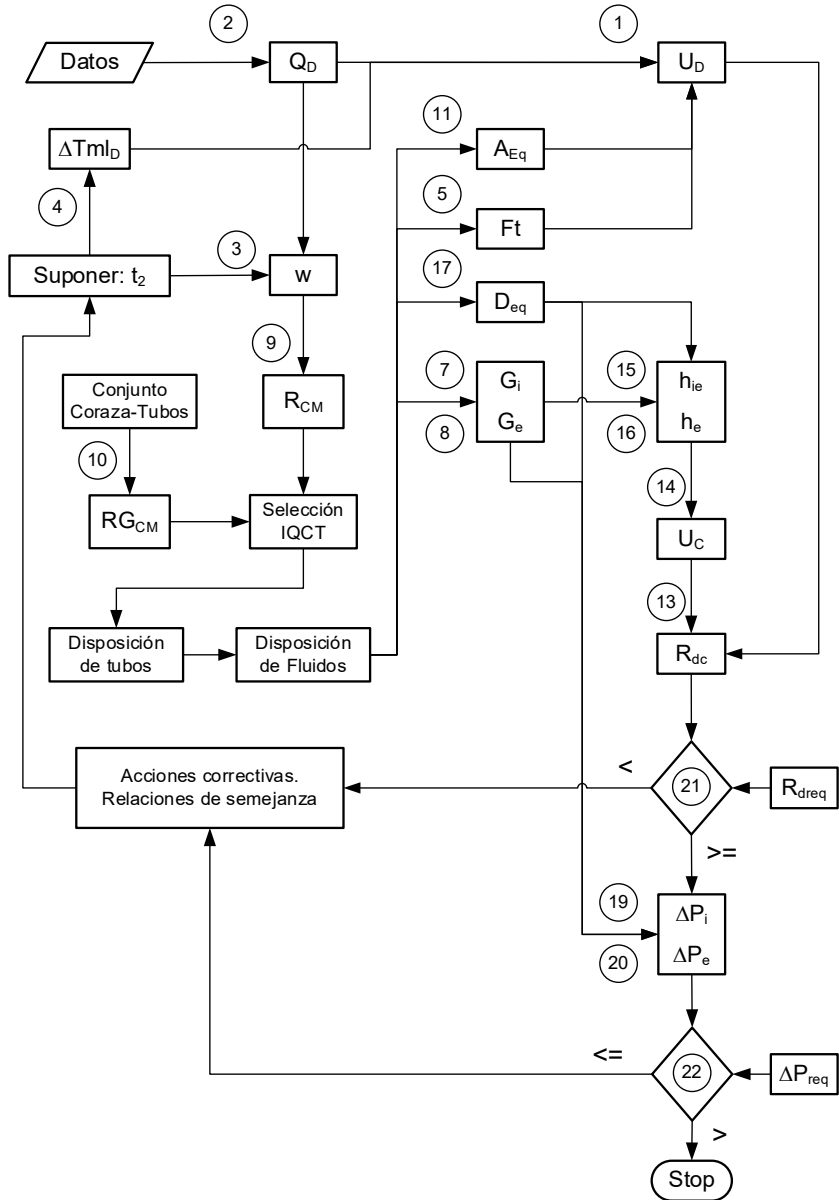


Fig. 7.23. Flujograma para el cálculo de IQCT nuevos.

| IQCT conectados en paralelo | Unidad | Intercambiador | | | |
|---|-----------------------|----------------|------|----------|------|
| | | 1 | | 2 | |
| | | Caliente | Frío | Caliente | Frío |
| <i>Variables operativas del proceso</i> | | | | | |
| Fluido de proceso/servicio | Detalle | | | | |
| Concentración fluidos proceso/servicio | % | | | | |
| Temperatura de entrada de fluidos | °F | | | | |
| Temperatura de salida fluidos | °F | | | | |
| Caudal másico de fluidos | Lb/h | | | | |
| <i>Requisitos para el diseño de los equipos</i> | | | | | |
| Factor de ensuciamiento requerido | $h^{\circ}FPic^2/BTU$ | | | | |
| Caída de presión máxima admisible | Lb/Pulg ² | | | | |
| <i>Características de los equipos</i> | | | | | |
| Diámetro: Coraza/Tubos | Pulg | | | | |
| Disposición de tubos: Cuadro-Triangular | Adm | | | | |
| Área de pasaje: Coraza/tubos | Pulg ² | | | | |
| Relación geométrica de caudales másicos | Adm | | | | |
| Disposición de fluidos: Coraza/Tubos | Adm | | | | |
| Longitud de Tubos | Pie | | | | |
| Número de tubos | Adm | | | | |
| <i>Balances de masa y calor</i> | | | | | |
| Relación de caudales másicos | Adm | | | | |
| Calor transferido en el equipo | BTU/h | | | | |
| Velocidad de masa: Coraza/Tubos | Lb/hPulg ² | | | | |
| Diámetro equivalente: Coraza | Pulg | | | | |
| Temperatura calórica de fluidos | °F | | | | |
| Fuerza Impulsora Media Logarítmica | °F | | | | |
| Fuerza Impulsora Media Calórica | °F | | | | |
| Factor de corrección de la Fuerza Impulsora | Adm | | | | |
| <i>Transferencia de calor (TDC)</i> | | | | | |
| Área de transferencia calculada | Pie ² | | | | |
| Área del equipo seleccionado | Pie ² | | | | |
| Coefficiente Global de Diseño | $BTU/h^{\circ}FPic^2$ | | | | |
| Coefficiente Pelicular: Coraza/Tubos | $BTU/h^{\circ}FPic^2$ | | | | |
| Temperatura de pared | °F | | | | |
| Coef. Pelicular corregido: Coraza/Tubos | $BTU/h^{\circ}FPic^2$ | | | | |
| Coefficiente Global limpio | $BTU/h^{\circ}FPic^2$ | | | | |
| Factor de ensuciamiento Calculado | $h^{\circ}FPic^2/BTU$ | | | | |
| <i>Transferencia de cantidad de movimiento: Caída de presión en fluidos (CDP)</i> | | | | | |
| Caída de presión calculada Coraza y Tubos | Lb/Pulg ² | | | | |
| <i>Condiciones operativas de puesta en marcha (PEM)</i> | | | | | |
| Área de puesta marcha | Pie ² | | | | |
| Caudal de puesta marcha | Lb/h | | | | |
| CDP fluido servicio p/PEM | Lb/pulg ² | | | | |
| Vida Útil | Año | | | | |

Fig. 7.24. Resultados obtenidos para IQCT existentes en paralelo.

| IQCT conectados en paralelo | Unidad | Intercambiador | | | |
|---|-----------------------|----------------|------|----------|------|
| | | 1 | | 2 | |
| | | Caliente | Frío | Caliente | Frío |
| <i>Variables operativas del proceso</i> | | | | | |
| Fluido de proceso/servicio | Detalle | | | | |
| Concentración fluidos proceso/servicio | % | | | | |
| Temperatura de entrada de fluidos | °F | | | | |
| Temperatura de salida fluidos | °F | | | | |
| Caudal másico de fluidos | Lb/h | | | | |
| <i>Requisitos para el diseño de los equipos</i> | | | | | |
| Factor de ensuciamiento requerido | $h^{\circ}FPie^2/BTU$ | | | | |
| Caída de presión máxima admisible | Lb/Pulg ² | | | | |
| <i>Características de los equipos seleccionados</i> | | | | | |
| Diámetro: Coraza/Tubos | Pulg | | | | |
| Disposición de tubos: Cuadro-Triangular | Adm | | | | |
| Área de pasaje: Coraza/tubos | Pulg ² | | | | |
| Relación geométrica de caudales másicos | Adm | | | | |
| Disposición de fluidos: Coraza/Tubos | Adm | | | | |
| Longitud de Tubos | Pie | | | | |
| Número de tubos | Adm | | | | |
| Área de transferencia calculada | Pie ² | | | | |
| <i>Balances de masa y calor</i> | | | | | |
| Calor transferido en el equipo | BTU/h | | | | |
| Relación de caudales másicos | Adm | | | | |
| Velocidad de masa: Coraza/Tubos | Lb/hPulg ² | | | | |
| Diámetro equivalente: Coraza | Pulg | | | | |
| Temperatura calórica de fluidos | °F | | | | |
| Fuerza Impulsora Media Logarítmica | °F | | | | |
| Fuerza Impulsora Media Calórica | °F | | | | |
| Factor de corrección de la Fuerza Impulsora | Adm | | | | |
| <i>Transferencia de calor (TDC)</i> | | | | | |
| Coefficiente Global de Diseño | $BTU/h^{\circ}FPie^2$ | | | | |
| Coefficiente Pelicular: Coraza/Tubos | $BTU/h^{\circ}FPie^2$ | | | | |
| Temperatura de pared | °F | | | | |
| Coef. Pelicular corregido: Coraza/Tubos | $BTU/h^{\circ}FPie^2$ | | | | |
| Coefficiente Global limpio | $BTU/h^{\circ}FPie^2$ | | | | |
| Factor de ensuciamiento Calculado | $h^{\circ}FPie^2/BTU$ | | | | |
| <i>Transferencia de cantidad de movimiento: Caída de presión en fluidos (CDP)</i> | | | | | |
| Caída de presión calculada Coraza y Tubos | Lb/Pulg ² | | | | |
| <i>Condiciones operativas de puesta en marcha (PEM)</i> | | | | | |
| Área de puesta marcha | Pie ² | | | | |
| Caudal de puesta marcha | Lb/h | | | | |
| CDP fluido servicio p/PEM | Lb/pulg ² | | | | |
| Vida Útil | Año | | | | |

Fig. 7.25. Resultados obtenidos para IQCT nuevos en paralelo.

Fig. A-1: Relación de caudales máxicos para IQCT (1-nt) con arreglo triangular y distancia (B) entre deflectores intermedia.

| Dc | B | C' | nt | Dl | Nt | Pt | nc | Wo/Wi | ai | ao |
|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|--------|
| Pulg. | Pulg. | Pulg. | Adim. | Pulg. | Adim. | Pulg. | Adim. | Adim. | Pulg.2 | Pulg.2 |
| 8 | 3,2 | 0,1875 | 1 | 0,75 | 36 | 0,9375 | 1 | 0,32 | 15,9 | 5,1 |
| | 3,2 | 0,1875 | 2 | 0,75 | 32 | 0,9375 | 1 | 0,72 | 7,1 | 5,1 |
| | 3,2 | 0,1875 | 4 | 0,75 | 26 | 0,9375 | 1 | 1,78 | 2,9 | 5,1 |
| | 3,2 | 0,1875 | 6 | 0,75 | 24 | 0,9375 | 1 | 2,90 | 1,8 | 5,1 |
| | 3,2 | 0,1875 | 8 | 0,75 | 18 | 0,9375 | 1 | 5,15 | 1,0 | 5,1 |
| 10 | 4 | 0,1875 | 1 | 0,75 | 62 | 0,9375 | 1 | 0,23 | 27,4 | 8,0 |
| | 4 | 0,1875 | 2 | 0,75 | 56 | 0,9375 | 1 | 0,52 | 12,4 | 8,0 |
| | 4 | 0,1875 | 4 | 0,75 | 47 | 0,9375 | 1 | 1,23 | 5,2 | 8,0 |
| | 4 | 0,1875 | 6 | 0,75 | 42 | 0,9375 | 1 | 2,07 | 3,1 | 8,0 |
| | 4 | 0,1875 | 8 | 0,75 | 36 | 0,9375 | 1 | 3,22 | 2,0 | 8,0 |
| 12 | 4,8 | 0,1875 | 1 | 0,75 | 109 | 0,9375 | 1 | 0,24 | 48,2 | 11,5 |
| | 4,8 | 0,1875 | 2 | 0,75 | 98 | 0,9375 | 1 | 0,53 | 21,6 | 11,5 |
| | 4,8 | 0,1875 | 4 | 0,75 | 86 | 0,9375 | 1 | 1,21 | 9,5 | 11,5 |
| | 4,8 | 0,1875 | 6 | 0,75 | 82 | 0,9375 | 1 | 1,91 | 6,0 | 11,5 |
| | 4,8 | 0,1875 | 8 | 0,75 | 78 | 0,9375 | 1 | 2,67 | 4,3 | 11,5 |
| 25 | 10 | 0,1875 | 1 | 0,75 | 532 | 0,9375 | 1 | 0,21 | 235,0 | 50,0 |
| | 10 | 0,1875 | 2 | 0,75 | 506 | 0,9375 | 1 | 0,45 | 111,8 | 50,0 |
| | 10 | 0,1875 | 4 | 0,75 | 468 | 0,9375 | 1 | 0,97 | 51,7 | 50,0 |
| | 10 | 0,1875 | 6 | 0,75 | 446 | 0,9375 | 1 | 1,52 | 32,8 | 50,0 |
| | 10 | 0,1875 | 8 | 0,75 | 434 | 0,9375 | 1 | 2,09 | 24,0 | 50,0 |
| 39 | 15,6 | 0,1875 | 1 | 0,75 | 1377 | 0,9375 | 1 | 0,20 | 608,3 | 121,7 |
| | 15,6 | 0,1875 | 2 | 0,75 | 1330 | 0,9375 | 1 | 0,41 | 293,8 | 121,7 |
| | 15,6 | 0,1875 | 4 | 0,75 | 1258 | 0,9375 | 1 | 0,88 | 138,9 | 121,7 |
| | 15,6 | 0,1875 | 6 | 0,75 | 1248 | 0,9375 | 1 | 1,32 | 91,9 | 121,7 |
| | 15,6 | 0,1875 | 8 | 0,75 | 1212 | 0,9375 | 1 | 1,82 | 66,9 | 121,7 |

Fuente: Kern, D.; Procesos de Transferencia de Calor; CECSA; 197

CAPÍTULO 8

Dejando huellas...

Al finalizar una clase, cuando todavía quedaban algunos minutos para conversar sobre las cosas de la vida profesional, un alumno me preguntó: ¿Cómo fueron sus primeros pasos en la vida profesional?, y continuó diciendo: ...porque a mí me da la impresión de que cuando ingrese a mi primer trabajo, veré todo como una nebulosa gigante.

Mi respuesta fue: ¡No te quepa la menor duda que va a ser así!... Te vas a encontrar como en la casa de un extraño, con personas dando vueltas de aquí para allá, con máquinas, ruidos, olores, luces, etc. que serán todas como una mágica novedad... y donde lo conocido luego de tantos años de vida universitaria comienza a desfallecer frente a este nuevo y vertiginoso panorama. No desesperar es la consigna, ser prudente, advertido, atinado y mantener una actitud positiva (...) Es la ley para la subsistencia en este mundo (...)

La atención para el buen desempeño profesional seguramente que deberá ser puesta en el aprendizaje acelerado de dos aspectos fundamentales: el tecnológico y el organizacional. Lo tecnológico tiene que ver con el estudio de los procesos que se llevan adelante dentro de la actividad, hasta entender cuáles son los fundamentos sobre los que se sostiene la operación de cada máquina o equipo de ese proceso, cómo se controlan las variables operativas y cuáles son los requisitos de calidad de cada producto obtenido. En esto, lo más razonable es buscar la bibliografía y la información que exista sobre la especialidad que nos permita avanzar con el estudio de estas tecnologías. ¿Cuándo hacerlo? En algunas organizaciones se dispone inicialmente de un tiempo durante la jornada laboral que está asignado al entrenamiento profesional, pero que, en general, no es suficiente y por tanto habrá que quitarle un pedazo de tiempo al esparcimiento.

En cuanto a lo organizacional, la clave es conocer y entender la cultura que existe en la gestión de la empresa o institución para asegurarse

la convivencia y la permanencia en la misma. La cultura organizacional tiene que ver entre otras cosas con la importancia que “se le da” dentro de la organización a las reglamentaciones en concordancia con las actuaciones del personal. Para tomar un ejemplo, en algunas empresas el “memorándum” tiene un valor relativo con relación a los resultados esperados de un proceso. Vale decir que para “hacerse cargo” de una gestión no basta con escribir un papel, sino que, además, será necesario “estar personalmente presente” en las actuaciones, más allá que la responsabilidad directa por esa gestión recaiga sobre otra persona.

Aquí es donde aparece el “factor humano” de cualquier organización, el cual normalmente es el más complicado ya que no se reduce a un simple cálculo matemático. Hay que conocer el modo de actuar y de relacionarse que tienen las personas en esa organización frente a distintas situaciones. Pensar que una organización es un organismo vivo no está mal y, como tal, hay que pensar en “modo holístico” vale decir con una visión integral de todas las actividades que componen el proceso industrial, donde se incluye además de la producción, la administración, la comercialización y hasta el financiamiento.

Es un claro ejercicio de “percepción” y “adaptación” que se consigue a través del tiempo y donde la honestidad, la actitud positiva y el respeto, juegan un papel preponderante a la hora de establecer buenas relaciones con todo el personal de la organización y de hecho que esto es el punto de partida para acelerar el aprendizaje y obtener resultados que serán de utilidad.

Más allá de las amistades que se puedan formar dentro de la organización, vale tener presente que no es fácil encontrar el apoyo de otras personas para avanzar en ciertas actuaciones ya que la cultura organizacional de algunas empresas o instituciones todavía están lejos de entender lo que es el trabajo en equipo, por lo cual, la competencia profesional puede ser muy fuerte en todos los niveles. De todos modos, vale tener presente que, para cualquier aprendizaje, es fundamental conversar con operarios, pares, jefes, especialistas externos, en fin, con todas las personas que estén disponibles para ello.

También es posible que, por distintos motivos, no tengamos el perfil necesario para mantener una sana convivencia laboral con esa cultura organizacional. En ese caso, se deberá buscar otros rumbos hasta encontrar el lugar para nosotros, y no está mal incluir, en esta búsqueda, a la posibilidad de crear una actividad propia para avanzar en el camino del emprendedorismo.

Finalmente, creo que la vida brinda todas las posibilidades de hacer, pero será necesario siempre poner nuestra cuota de esfuerzo en la búsqueda de una sana convivencia con la gente y la naturaleza. Las huellas por el camino recorrido tienen que ser nuestras, propias de cada uno de nosotros, a su vez, nunca serán las mismas. Al principio serán débiles, casi como un espejismo que aparecen y desaparecen de un soplido. Con el tiempo se van a ir consolidando, marcando su relieve con otra presencia, que se observará no solo en lo profesional sino también en lo personal. Es el camino de la vida, donde no basta con “conocer” sino con “saber hacer” y, para eso, desarrollar el espíritu de aventura es una fortaleza. Mucha suerte y buen trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- Coulson, J.M. - Richardson, J.F. (2003). *Ingeniería Química: Operaciones Básicas*. T II. España: Reverté.
- Foust, A.S., Wenzel, L. A.; Clamp, C. W.; Maus, L. & Brandersen, L. B. (1975). *Principios de Operaciones Unitarias*. [Traducido al español de Dr. J. A. Lanuza Escobar]. 8ª ed. México: CECSA.
- Geankoplis, C. J. (2006). *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*. 3ª ed. México: CECSA.
- Karassik, I. J. y Carter, R. (1978). *Bombas Centrifugas: Selección, Operación y Mantenimiento*. México: CECSA.
- Kern, D. (1975). *Procesos de Transferencia de Calor*. [Traducido al español de Ing. Nicolás M. Ambrossi]. 9ª ed. México: CECSA.
- Libby, C. E. (1974). *Ciencia y Tecnología sobre Pulpa y Papel*. [Traducido al español de Ing. Salvador Carrasco Narro]. TI y II. 3ª ed. México: CECSA.
- Manzo, A. J. (1973). *Manual para la Preparación de Monografías*. Argentina: HUMANITAS.
- Perry, J. H. (1976). *Manual de Ingeniero Químico*. [Traducido al español de Ing. Santiago Alonso]. T I y II. México: UTHEA.
- Peters, M. S. y Timmerhaus, K. D. (1978). *Diseño de Plantas y su Evaluación Económica para Ingenieros Químicos*. [Traducido al español de Dr. Rodolfo H. Busch]. Argentina: GÉMINIS SRL.
- Schmidt, R. (1974). *Manual Práctico del Equipo de Plantas*. España: BELATERRA.

AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE JUJUY

Rector

Lic. Rodolfo Alejandro Tecchi

Vice-Rector

Dr. Ricardo Enrique Gregorio Slavutsky

Secretario General

E.S. Edgardo Aramayo

Secretario de Asuntos Académicos

Mg. Mario César Bonillo

Secretario Legal y Técnico

Dr. César Guillermo Farfán

Secretario de Administración

C.P.N. Jaime Sebastián Berástegui

Secretaria de Ciencia y Técnica y Estudios Regionales

Mg. Sandra Adriana Giunta

Secretario de Extensión Universitaria

Dr. Ernesto Max Agüero

Secretario de Bienestar Universitario

Brom. Fernando Ramón Torrejón

Coordinador de EDIUNJu

Lic. Daniel González



Diseño de equipos e instalaciones para procesos químicos industriales, de Pablo Soler, se terminó de imprimir en la segunda quincena del mes de mayo del 2019, en los Talleres Gráficos de la Imprenta de la UNJu.

Jujuy - Argentina.

Tirada: 100 ejemplares.

El diseño de los equipos y el control de los procesos químicos son tareas propias de los ingenieros químicos y como tal deberán brindar soluciones a esos requerimientos. De allí que, conocer los aspectos conceptuales y disponer de las habilidades para el cálculo es la clave. Este libro es el resumen de una publicación más integrada y explícita que al día de la fecha se encuentra en la etapa de escritura. Es básicamente una “caja de herramientas” que contiene ecuaciones, gráficas, tablas, etc, y que se realizó para ser empleada como “guía de clases” por los alumnos que cursan la asignatura Operaciones Unitarias I en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Jujuy. De hecho que durante las clases se desarrollan estos temas con la amplitud necesaria y suficiente para que los contenidos programáticos sean entendidos y aplicados durante el curso de la asignatura. Disponer de este libro, ha sido comprobadamente positivo y facilitador tanto para los alumnos, como para los docentes desde el punto de vista del proceso de enseñanza-aprendizaje.

ISBN 978-950-721-543-8

