

30061E

11  
2º



**UNIVERSIDAD LA SALLE**

**ESCUELA DE QUIMICA  
INCORPORADA A LA U. N. A. M.**

**"DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBOS Y CORAZA PARA EL LABORATORIO DE INGENIERIA QUIMICA DE LA UNIVERSIDAD LA SALLE".**

**TESIS PROFESIONAL**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OPTAR AL TITULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO QUIMICO**

**P R E S E N T A :**

**VICTOR EMILIO JOUBERT CAIRE**

México, D. F.

**FALLA DE ORIGEN**

1988



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## I N D I C E

INTRODUCCION .....	1
CAPITULO I	
La importancia de la transferencia de calor .....	3
CAPITULO II	
Tipos de intercambiadores y sus aplicaciones .....	8
a) Intercambiadores de doble tubo .....	8
b) Intercambiadores de tubos y coraza .....	10
c ) Intercambiadores compactos .....	14
c.1) Intercambiadores de placas .....	14
c.2) Intercambiadores de laminillas .....	17
c.3) Intercambiadores de placas y aletas .....	18
c.4) Intercambiadores de bloques de grafito ...	19
d) Intercambiadores de calor especiales .....	22
El intercambiador de tubos y coraza .....	24
a) Generalidades sobre rehervidores .....	25
a.1) Rehervidores de marmita .....	25
a.2) Rehervidores verticales de termosifón ....	29
a.3) Rehervidores horizontales de termosifón ..	30
a.4) Rehervidores de circulación forzada .....	30
b) Evaporadores de circulación forzada .....	31
c) Evaporadores verticales de tubos largos .....	32
d) Condensadores horizontales y verticales .....	33
CAPITULO III	
Selección del intercambiador y de sus dimensiones	38

a) Selección de los materiales de construcción ...	45
a.1) corazas y bridas .....	46
a.2) tubos y espejos .....	47
a.3) tornillos .....	49
b) Detalles mecanicos de la construcción .....	50
b.1) Unión espejos - tubos .....	50
b.2) Cabezales y bridas .....	52
b.3) Soldadura .....	54
b.4) Boquillas .....	56
b.5) Trampa de vapor .....	58
 <b>PRACTICAS</b>	
a) Procedimientos previos a las prácticas .....	59
a.1) verificación de los sellos y juntas .....	59
a.2) Calibración del rotámetro .....	61
b) Fundamentos teóricos de las prácticas .....	63
Intercambio de calor en fluidos con cambio de fase	63
Desarrollo de las ecuaciones del proceso .....	67
c) Ejemplo de calculo de los coeficientes .....	71
d) Técnica de la práctica .....	79
e) Trabajo posterior a la practica .....	80
f) Cuestionario .....	80
 <b>CONCLUSIONES</b> .....	
<b>APENDICES</b> .....	84

## INTRODUCCION

Los laboratorios universitarios de las carreras relacionadas con la Ingeniería aportan beneficios a los estudiantes; por un lado, ayudan a memorizar conceptos que de otra forma serían fácilmente olvidados y, por otro lado, disminuyen el abismo existente entre la teoría universitaria y la realidad. Ya se ha dicho que entre más sentidos utilicemos al momento de aprender algo, más fácil será dicho aprendizaje; eso es exactamente lo que sucede con los laboratorios, ocupan los cinco sentidos de los estudiantes.

Un laboratorio de Ingeniería es un lugar donde existe el equipo necesario para experimentar en la mejoría de los procesos o para practicar los cálculos matemáticos que expresan teóricamente dichos procesos. Es un lugar donde aprendemos tarde o temprano, que la matemática es simplemente un par de anteojos que nos permite conocer y comprender una realidad que nuestros sentidos no pueden percibir debido a que el rango de percepción de los mismos es muy pequeño.

El átomo no puede verse con ninguno de los instrumentos ópticos que hasta hoy conocemos; ni siquiera con el microscopio electrónico, para verlo, debemos utilizar un instrumento más potente que el microscopio electrónico, la matemática.

Actualmente la gente abusa de la matemática, los estudiantes tratan de comprender todos los fenómenos a base de matemáticas sin tratar de comprender el concepto físico, sin imaginarse lo que en realidad está sucediendo. Cuando un estudiante piensa en el comportamiento de un cierto sistema, lo hace en base a una fórmula, a un modelo matemático mediante el cual le sea posible comprender fácilmente el fenómeno. Su razonamiento es tan rudimentario como recordar la fórmula que expresa en núme

ros al sistema de sustituir en ella valores imaginarios que aportan un resultado que habla por sí solo.

El estudiante pasa del fenómeno a la comprensión de su comportamiento sin el mas mínimo razonamiento; sin hacer escala en el concepto físico y en la realidad.

El hecho de no comprender el concepto físico es grave ya que si no se comprende dicho concepto, se está sujeto a ciertos modelos matemáticos prefabricados y almacenados en la memoria; en esa memoria que tantas veces nos traiciona.

Es muy común que los estudiantes tengan que investigar en la bibliografía las fórmulas que expresan cierto sistema antes de aventurarse a opinar de cómo reaccionaría dicho sistema ante tal o cual cambio en las variables que lo afectan. No es bueno que seamos "doctus cum libro" y el laboratorio puede ayudarnos a no serlo.

De tal modo que este pequeño proyecto de tesis está hecho con el fin de ayudar a resolver el problema de la miopía existente en muchas personas que dependen por completo de la matemática, y que no la consideran como un medio sino como un fin.

Desde los días de Bacon, se ha pensado que la experimentación es tan profunda y necesariamente una parte de la ciencia que las actividades exploratorias no experimentales a menudo no tienen derecho a ser clasificados ni siquiera como ciencia.

Para cosechar la verdad, debemos reproducir acontecimientos y experiencias, muchas veces en un laboratorio.

## CAPITULO I

### LA IMPORTANCIA DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR

La transferencia de calor es un fenómeno verdaderamente común en la vida diaria. Cualquiera persona se enfrenta a dicho fenómeno todos los días, sin embargo, solo la gente relacionada con la ciencia se detiene a pensar en la forma de estudiar el fenómeno para poder entenderlo mejor y, de este modo, predecirlo para utilizarlo en su beneficio.

En casi toda la industria en la que se lleva a cabo una transformación de algún material se tiene que añadir o sustraer calor, para lo cual se requiere de equipos especiales llamados intercambiadores de calor que pueden ser de muy variados tipos según la función para la que se requieran como se verá en el siguiente capítulo.

Consideremos, como ejemplo al azar, la industria de los materiales plásticos y veamos cómo interviene en esta rama industrial la transferencia de calor.

A primera vista, nada parece estar más alejado de la transferencia de calor que un artículo elaborado con cualquier tipo de plástico; sin embargo, desde que el proceso de fabricación de dicho material se inicia, comienzan a sucederse secuencialmente una serie de cambios de temperatura. La fase inicial de fabricación de cualquier plástico sintético es la reacción de polimerización de algún tipo de monómero, y este tipo de reacciones frecuentemente requieren de un calentamiento inicial que desencadene la reacción. Ahí tenemos la primera necesidad de algún tipo de intercambiador de calor. Posteriormente, cuando la reacción se halla en pleno desarrollo, muchas veces se requiere

de algún medio con el cual se pueda quitar calor ya que es frecuente encontrar reacciones exotérmicas. Por esto, los reactores en los que se llevan a cabo los procesos de polimerización de materiales plásticos, tienen un intercambiador que les da calor y otro que les quita calor en caso de requerirse. O bien, por el mismo intercambiador se tiene la oportunidad de circular un medio caliente, como puede ser un aceite, y un medio enfriante que, por lo general es agua.

Posteriormente, con el fin de darle al material plástico una forma geométrica fácilmente manejable, se le vuelve a calentar con el objeto de fundirlo para pasarlo luego por un dispositivo de "pelletizado" que consiste en una serie de orificios que le dan al material una forma de tiras largas que, una vez formadas, se enfrían en una tina de agua (otro proceso de transferencia de calor) y se cortan en pequeños trocitos en forma de cilindros que pueden ser fácilmente manejados en bultos para ser distribuidos a todas las plantas que se dedican a volver a fundir este material para convertirlo en algún artículo de plástico de los que todos conocemos bien, como puede ser un bolígrafo hecho de poliestireno o el mango de un cepillo dental hecho de polipropileno.

Debido a que algunos materiales plásticos son sumamente higroscópicos, deben ser secados antes de ser fundidos para darles su forma final. Este secado se hace en hornos de convección forzada en los que se circula aire a temperaturas relativamente altas. Tenemos entonces otro proceso de transferencia de calor.

Cuando el material ha sido ya secado, se procede entonces al paso final en el proceso de manufactura de artículos plásticos que es el darles la forma final mediante alguno de los muchos procesos que se han inventado para este fin. El más común de ellos es el de inyección en el cual el material es fundido por

una serie de resistencias eléctricas que le vuelven a transferir calor. Una vez fundido, se le transporta mediante un tornillo sinfín especialmente diseñado que recibe el nombre de "husillo". Este husillo tiene tanta fuerza al girar que, además de transportar el material hacia su destino final (el molde), le proporciona al material plástico una cantidad adicional de calor por medio de la fricción. A veces, este efecto de fricción llega a ser tan importante, que se requiere entonces de algún medio enfriante para que el material plástico no se degrade por tener una temperatura demasiado alta. La máquina que realiza este trabajo recibe el nombre de "inyectora" y también tiene un intercambiador de calor de tubos y coraza con el cual enfría el aceite del sistema hidráulico que mueve todos los componentes de la máquina. Este pequeño intercambiador que puede verse siempre al pie de la máquina de inyección de plástico, es muy parecido al que se piensa diseñar en este trabajo, con la gran diferencia de que aquel lleva aceite por los tubos y agua por la coraza.

El último paso de la inyección, se da cuando el material, impulsado por el husillo, penetra en un molde que tiene la forma de la pieza final de plástico. Este molde, generalmente es de acero y posee en el interior de sus paredes, una serie de canales por los que circula agua de enfriamiento con el objeto de extraerle al plástico la cantidad de calor necesaria para que su temperatura final sea lo suficientemente baja como para extraer la pieza sin que sufra deformaciones. A su vez, el agua que pasa por el molde para enfriar el plástico, se calienta por este efecto y debe ser enfriada para volver a circularla por dentro del molde. Este proceso se lleva a cabo por medio de una torre de enfriamiento, equipo en el que suceden una transferencia de calor y de masa en forma simultánea. Para ciertos tipos de plásticos, se requiere de que la superficie del molde tenga una temperatura muy baja (de 4 o 5°C) que no puede ser

lograda por medio de una torre de enfriamiento. En estos casos, se cuenta con un equipo adicional de transferencia de calor que recibe el nombre de "chiller" que puede enfriar el agua a esas temperaturas.

De esta forma, vemos que el proceso de manufactura de cualquier artículo plástico involucra, por lo menos, diez distintos procesos de transferencia de calor que se llevan a cabo en una gama muy variada de equipos industriales.

La conclusión de lo anterior nos hace pensar en lo importante que es el hecho de que el estudiante de ingeniería química se familiarice con los procesos de transferencia de calor.

En el siguiente cuadro podemos apreciar en qué procesos de la industria química hay requerimientos de transferencia:

PROCESO	NECESIDAD CALORIFICA
absorción	evaporación y condensación
destilación	evaporación y condensación
reacción	calentamiento o enfriamiento
cristalización	evaporación
almacenamiento	refrigeración
flujo de fluidos	calentamiento, enfriamiento
fisión nuclear	enfriamiento
acondicionamiento de aire	enfriamiento o calentamiento
generación de vapor	calentamiento
secado	calentamiento

El equipo requerido para llevar a cabo todos estos procesos de transferencia es muy variado. Sin embargo, podemos encontrar algunas características que le son afines a toda la gama de intercambiadores de calor. A continuación mencionamos algunas de estas características:

- El calor siempre se transfiere de las partes calientes a las partes frías.
- La superficie de contacto por la cual se transfiere el calor es siempre máxima en el caso de que se quiera transferir calor y mínima en el caso de que se quiera aislar.
- Se trata siempre de que los materiales utilizados tengan un coeficiente de conductividad térmica que favorezca el proceso.
- De ser posible, se prefiere un cambio de fase a lo largo del proceso ya que el calor latente tiene valores muy superiores a los del calor sensible.
- Se trata siempre de que el tamaño que ocupan los equipos construídos para este fin sea mínimo. A veces no se puede lograr un tamaño muy reducido, entonces puede diseñarse un equipo alto pero que ocupe un área pequeña.
- Los equipos deben producir bajas caídas de presión a menos que el proceso requiera lo contrario.
- Se prefiere, generalmente, que los flúidos involucrados en la transferencia fluyan a contra-corriente o en flujo cruzado, ya que el flujo en paralelo presenta siempre un gradiente promedio de temperaturas mucho menor.
- Por último, algo que se busca en todos los equipos industriales es que su costo de fabricación sea lo menor posible. Aquí es donde el diseño puede hacer grandes diferencias.

## CAPITULO II

### TIPOS DE INTERCAMBIADORES Y SUS APLICACIONES

Los equipos para transferir calor más utilizados en la industria son los intercambiadores de calor:

- a) De doble tubo
- b) de tubos y coraza
- c) compactos
  - c.1) de placas
  - c.2) de laminillas
  - c.3) de placas y aletas
  - c.4) de bloques de grafito
- d) especiales

A continuación, los analizaremos a cada uno por separado:

#### a) INTERCAMBIADORES DE DOBLE TUBO

Estos aparatos son utilizados para servicios en lo que el área de transferencia requerida es relativamente pequeña, consisten en dos tubos concéntricos con el retorno en forma de "U" por lo cual, requieren de una cantidad considerable de espacio para su instalación.

Su construcción generalmente se hace a las medidas comerciales de los tubos. Un intercambiador de doble tubo típico es el que muestra en la figura 2.1.

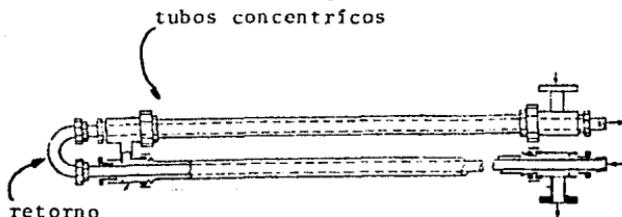


fig. 2.1 Intercambiador de doble tubo

La tubería del centro está soportada por collarines dentro de la tubería externa. El fluido externo hace su retorno sin pasar por la "U" de retorno por la que pasa el fluido interno y la cual no tiene, en general ningún aislamiento debido a que no está provista de una gran superficie.

Estos aparatos son a veces de gran utilidad ya que pueden ser contruidos por plomeros con materiales comerciales. Su longitud generalmente no rebasa los 6 metros ya que, con longitudes mayores, el tubo interno se dobla por su propio peso.

Una de las mayores desventajas de estos equipos es que, el más pequeño de ellos, tiene no menos de 14 puntos en los que puede desarrollarse goteo. Sin embargo, estos equipos son muy utilizados cuando las áreas de transferencia requeridas no excedan los 20 m<sup>2</sup>. Su uso no se restringe a los sistemas líquido-líquido, sino que también pueden usarse para sistemas gas-líquido y para sistemas gas-gas.

La velocidad de los flujos solamente se halla limitada por el proceso de transferencia de calor y la presión en el tubo interno puede llegar a ser, en algunos casos de - -  
15 x 10<sup>6</sup> kgf/m<sup>2</sup>.

b) INTERCAMBIADORES DE TUBOS Y CORAZA

Este tipo de aparatos es utilizado cuando se requiere de grandes superficies de intercambio de calor en forma económica en la compra y en la operación; las terminales de los tubos se montan sobre una placa que los sostiene llamada "espejo". La coraza o recipiente que contiene en su interior al haz de tubos es generalmente cilíndrica.

Uno de los fluidos fluye dentro de los tubos y el otro - fuera de ellos, dentro de la coraza.

Un aparato típico de tubos y coraza es el que se muestra en la figura 2.2.

Cuando el patrón de flujo es en paralelo, a baja velocidad, se produce un bajo coeficiente de transferencia de calor así como una baja caída de presión. Cuando se requiere de mayores coeficientes se emplean operaciones con pasos múltiples.

Estos aparatos se encuentran provistos del lado de la coraza, de placas deflectoras de metal llamadas mamparas cuyo objeto es el de dar la turbulencia necesaria al fluido que va por fuera de los tubos para lograr así, una distribución uniforme y un alto coeficiente.

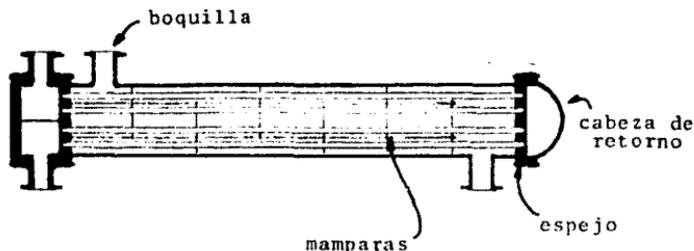


fig. 2.2 Intercambiador de tubos y coraza

Los baffles ayudan también a mantener los tubos libres de incrustaciones. Cuando la operación requiere de vapor - por el lado de la coraza, no se necesitan los baffles de deflectores.

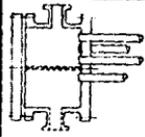
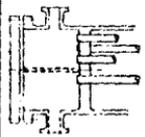
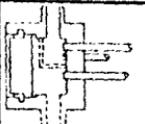
Las propiedades de los fluidos son las que determinan qué fluido irá por fuera de los tubos y cuál por dentro de los tubos; generalmente en dicha elección se siguen estos criterios:

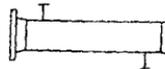
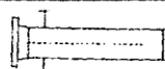
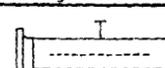
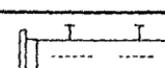
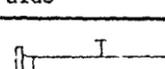
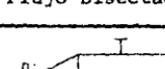
- El fluido más incrustante deberá ir por el ducto que sea más fácil de limpiar; generalmente la coraza.
- Cuando se maneja un fluido corrosivo, generalmente se le hace pasar por dentro de los tubos para evitar que la coraza deba ser construída con aleaciones costosas.
- De igual modo, los fluidos de alta presión se colocan dentro de los tubos evitando así, un espesor demasiado grande en las paredes de la coraza.
- Otro de los criterios a tomar en cuenta, es la viscosidad. Los fluidos de alta viscosidad deben ser colocados del lado de la coraza para poder darles la turbulencia necesaria con las mamparas.
- Para un sistema determinado, en igualdad de condiciones y tratándose del mismo fluido, se obtienen mayores coeficientes por fuera de los tubos que en el interior de los mismos.

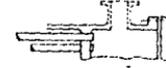
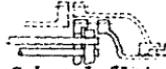
Por ahora no diremos más sobre este tipo de intercambiadores, ya que la segunda parte de este capítulo se ocupará de los mismos en específico.

Lo último que vale la pena mencionar en esta parte es la manera más utilizada de clasificar a los intercambiadores de tubos y coraza.

Los estándares del T.E.M.A. (Tubular Exchanger Manufacturers Association) son la referencia más utilizada para la clasificación y agrupan a los siguientes tipos de aparatos:

	CABEZAL FRONTAL
A	 Tapa desmontable
B	 Tapa integral
C	 Haz desmontable
	 Haz fijo Tapa desmontable
D	 Especial para altas presiones

	TIPO DE CORAZA
F	 1 paso
F	 2 pasos, baffle longitudinal
G	 Flujo dividido
H	 Doble flujo dividido
J	 Flujo bisectado
K	 Rehervidor tipo Kettle

	CABEZAL TRASERO
L	 Espejo fijo (A)
M	 Espejo fijo (B)
N	 Espejo fijo (C)
P	 Cabezal flotante
S	 Cabezal flotante doble
T	 Cabezal flotante desmontable
U	 Haz de tubos en
W	 Cabezal flotante con anillo

c) INTERCAMBIADORES COMPACTOS

Reciben este nombre aquellos intercambiadores de calor cuya relación superficie/volumen es grande. Se sugiere en la literatura, considerar como intercambiadores compactos a aquellos que pueden llegar a tener una relación superficie/volumen de  $3000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ .

Generalmente, el uso de este tipo de intercambiadores encuentra grandes aplicaciones en los sistemas criogénicos.

c.1) INTERCAMBIADORES DE PLACAS

Este tipo de intercambiadores fué introducido al comercio por primera vez en 1924. Son aparatos formados por una serie de placas rectangulares colocadas paralelamente y sostenidas por un marco, todas ellas selladas con cubierta exterior y presentando en sus vértices, cuatro puertas por las que pueden entrar o salir los fluidos involucrados en el intercambio de calor. Dos de las puertas conducen a uno de los líquidos dentro y fuera de la superficie formada por el pasillo de transferencia de calor como puede observarse en la figura 2.3.

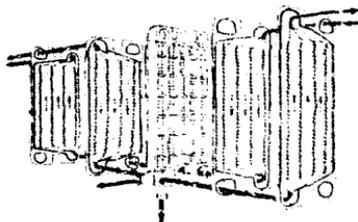


fig. 2.3 Intercambiador de placas

Las primeras aplicaciones que encontraron los intercambiadores de placas y aletas fueron aplicaciones aeronáuticas debido a que en un avión la relación rendimiento/peso es muy importante. Hoy en día, estos intercambiadores han encontrado su importancia en muchos procesos en los que están involucradas todas las combinaciones de fases entre los fluidos de proceso.

Estos intercambiadores de calor han sido utilizados en la obtención de oxígeno por destilación del aire y en la licuefacción del helio desde 1950. El elemento básico en estos aparatos es un canal de flujo que consiste de dos placas planas separadas por una lámina corrugada como podemos apreciar en la figura 2.4. En las orillas se colocan dos barras que sellan el paso del flujo interno.

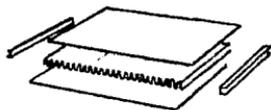


fig. 2.4 Detalle de un intercambiador de placas

Varias de estas unidades se ensamblan para formar el intercambiador deseado, de manera que éste puede servir en contracorriente o en flujo cruzado.

Existen varios tipos de corrugados para usarse en este tipo de intercambiadores, lo más usual es encontrar láminas corrugadas ondulada y uniformemente como la que se muestra en la figura 2.4, aunque en algunos casos se utilicen láminas corrugadas perforadas con pequeños orificios.

Las placas se fabrican en láminas metálicas de bajo calibre que se corrugan de alguna manera con el objeto de aumentar su resistencia mecánica, su área de contacto y para aumentar también, la turbulencia de los fluidos.

El patrón de corrugado de las placas difiere de un caso a otro, ya que depende de las consideraciones especiales que se hayan hecho en el diseño. Los tipos más comunes de corrugado son los dos siguientes:

- a) Corrugado transversal en el que las arrugas tienen una profundidad mayor a la distancia que separa las placas de modo que las arrugas de una placa penetran en las arrugas de la placa siguiente proporcionándose - así, una sección de flujo de envergadura constante.
- b) Corrugado hecho a la medida de la separación entre - placas en el que el ángulo de corrugado de la placa siguiente es inverso de modo que, al juntar las placas, se forma una sección de flujo de área variable que da como resultado una mayor turbulencia y, en consecuencia, un mayor coeficiente de transferencia de calor. Con este tipo de corrugado también se con sigue un número mayor de puntos de contacto entre las placas lográndose, de este modo, la posibilidad de ma nejar mayores presiones con materiales relativamente delgados.

Los intercambiadores de placas pueden ser usados para múltiples servicios; diferentes fluidos pueden fluir a través de las distintas partes del intercambiador. Este tipo de intercambiadores es muy utilizado para manejar fluidos altamente viscosos (más de 500 centipois)<sup>(8)</sup> ya que aseguran una completa turbulencia con números de Reynolds tan bajos como 150<sup>(8)</sup>.

Generalmente, se limita este tipo de aparatos a presiones no mayores a los 20 kgf/cm<sup>2</sup> y a temperaturas menores a los 150°C. Su uso en la condensación de grandes cantidades de vapor es impráctico, tampoco es satisfactorio en el manejo de gases y su utilización en sistemas con sólidos suspendidos está altamente restringido ya que las partículas pueden llegar a obstruir las secciones de flujo debido a que su tamaño es relativamente pequeño.

Una característica muy importante de los intercambiadores de placas es la imposibilidad de que exista un goteo entre los fluidos involucrados en el proceso de transferencia de calor debido a la construcción de este tipo de aparatos. Esto puede observarse claramente en la figura 2.4.

#### c.2) INTERCAMBIADORES DE LAMINILLAS

Estos intercambiadores pueden considerarse como una combinación entre intercambiadores de placas y de tubos y coraza.

Los tubos son reemplazados por pares de placas planas y paralelas soldadas en sus orillas formando largos y angostos canales, varios de estos elementos son agrupados dentro de una coraza. Como resultado de esto, el área disponible para el flujo del lado de la coraza se ve altamente disminuída y toma un valor comparable al área de flujo del interior de los elementos.

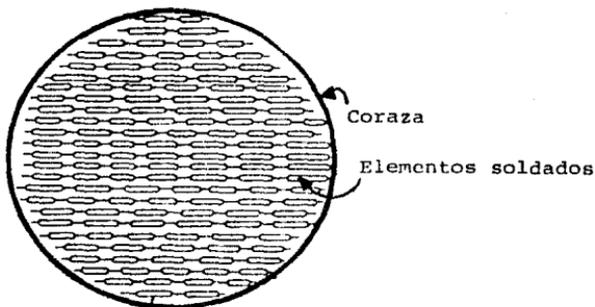


fig. 2.5 Sección transversal de un intercambiador de laminillas

Esto significa que las velocidades de los dos líquidos en promedio, son comparables como se puede observar en la sección transversal de un intercambiador de laminillas como el que se muestra en la figura 2.5. Uno de los lados de los elementos está fijo, y el otro permanece flotante para permitir las expansiones térmicas. Las conexiones a la coraza son iguales a las de cualquier intercambiador de tubos y coraza y el tipo de construcción generalmente permite que los elementos sean desmontables para facilitar el mantenimiento.

El flujo en este tipo de aparatos es a contracorriente, evitándose así, las desventajas existentes en cierto tipo de intercambiadores de tubos y coraza en los que el flujo no es a contracorriente a todo lo largo del equipo.

Otra característica de los intercambiadores de laminillas es que su diámetro hidráulico es relativamente pequeño, resultando de esto altos coeficientes de transferencia de calor. El lado de la coraza, debido a que es fácilmente accesible, se utiliza para procesar fluidos sucios o incrustantes, y también para ebullición o condensación.

Estos intercambiadores generalmente no se fabrican en áreas mayores a los 750 m<sup>2</sup> y no se diseñan para temperaturas mayores a 500 °C. Algunos de ellos llegan a soportar presiones hasta de 360 kgf/m<sup>2</sup><sup>(8)</sup>.

### c.3) INTERCAMBIADORES DE PLACAS Y ALETAS

Este tipo de equipos se construyen casi siempre, a base de aluminio. Su tamaño compacto, su baja capacidad calorífica y la fortaleza que alcanzan las aleaciones de aluminio a bajas temperaturas han hecho que estos aparatos sean ampliamente utilizados en operaciones criogénicas.

Se puede dar el caso de un diseño en el que la lámina corrugada simplemente no exista.

Estas unidades generalmente tienen una relación superficie/volumen de aproximadamente 1200 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> cuando la altura del corrugado no exceda los .012 m y la densidad de aletas es de 230 a 700 aletas/m<sup>(8)</sup>.

El tamaño máximo llega a ser de a.2 m de ancho por 6.2 m de largo dando un área total de transferencia de 10,600 m<sup>2</sup>.

En algunos casos estos aparatos llegan a ser operados con presiones internas mayores a  $800 \text{ kgf/cm}^2$

Existen intercambiadores de este tipo en los que pueden manejar más de dos fluidos a la vez eligiendo correctamente el número de placas para cada uno de los fluidos y separándolos en el cabezal de salida. Esto es muy apreciado en la industria criogénica.

#### c.4) INTERCAMBIADORES DE BLOQUES DE GRAFITO

El uso del grafito como material de construcción para intercambiadores de calor se debe a lo inertes que son sus propiedades químicas así como a su elevada conductividad térmica (tres veces mayor que la del acero).

El concepto de diseño de estos aparatos está basado en la perforación de orificios en bloques de carbón. Debido a la naturaleza de este tipo de construcción, estos intercambiadores tienen una relación superficie/volumen bastante baja en relación a la de los intercambiadores compactos en general. Sin embargo, son más compactos que los de tubos y coraza, llegando a presentar relaciones de  $85 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . La resistencia mecánica de este tipo de aparatos es mucho mayor a la de los equipos tradicionales como los de tubos y coraza antes mencionados.

El grafito que se usa en la construcción debe ser impregnado previamente con ciertos productos químicos que mejoran su resistencia a la corrosión y a la temperatura. Es importante que el producto utilizado en la impregnación sea químicamente estable y que

tenga una viscosidad razonablemente baja a la hora de ser aplicado con el fin de que penetre en los poros del grafito.

Los impregnantes utilizados comunmente se preparan a base de resinas fenólicas y furánicas.

La impregnación del grafito es un paso muy importante en la construcción ya que, determina la calidad del equipo. El proceso de impregnación se lleva a cabo en un autoclave en el que se hace vacío y se introduce la resina impregnante que se evapora por la baja presión y se deposita (condensándose) sobre las paredes del bloque de grafito en capas perfectamente uniformes. Luego se retiran los restos de resina y se eleva la temperatura por períodos muy prolongados con el fin de promover la polimerización de la resina.

En la construcción, es importante considerar la naturaleza anisotrópica del grafito; esto es que su conductividad térmica es mayor en una dirección (a lo largo de los planos de cristalización) que en la dirección perpendicular a los planos. De este modo, los bloques de grafito deben ser perforados de manera tal que se aproveche al máximo esta característica térmica del grafito.

Los intercambiadores de calor de este tipo son utilizados para calentamiento, enfriamiento, evaporación, condensación parcial y total, los fluidos que en ellos se pueden manejar incluyen fluidos inorgánicos como algunos ácidos, solventes orgánicos y muchas otras sustancias que no pueden ser manejadas en aparatos de

construcción metálica.

A causa de que no son atacados por el ácido clorhídrico, estos sistemas encuentran grandes aplicaciones en las plantas de absorción de ácido clorhídrico en las que la evolución de calor durante el proceso es muy grande.

El coeficiente de transferencia de calor que encontramos en este tipo de equipos es para vapor de agua condensando a 100 °C entre 2000 y 2500 W/m<sup>2</sup> °K.

#### d) INTERCAMBIADORES ESPECIALES

En los lugares del mundo en los que el agua es muy escasa, se utiliza como fluido de enfriamiento de los procesos exotérmicos al aire. Estos equipos tienden a utilizarse cada vez más debido a las crecientes disposiciones anticontaminantes de los gobiernos de todo el mundo y debido también, al aumento incesante en el precio del agua. Uno de los diseños más usuales es el que podemos observar en la figura 2.6 en el cual el aire atmosférico es forzado a través de un banco de tubos aletados mediante un ventilador eléctrico.

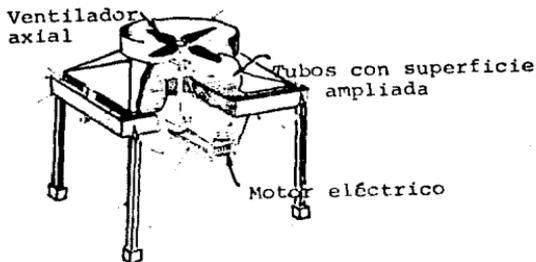


fig. 2.6 Intercambiador de calor enfriado por aire

El banco de tubos aletados generalmente está construido - con tubos de 1 pulgada de diámetro exterior y la altura de las aletas más comunmente encontrada es de .5 pulgadas. La densidad de las aletas es de 7 a 11 por pulgada lineal y el acomodo de los tubos comunmente se prefiere en forma triangular con separación entre centros de tubos de 2 a - 2.5 pulgadas.

La longitud de los tubos nunca pasa de 10 m y el espesor del banco varía entre 1 m y 4 m. El ancho del banco varía entre 3 y 30 líneas de tubos.

Para aplicaciones en las que no se requieren temperaturas mayores a los 300 °C el material más económico para fabricar las aletas es el aluminio, para temperaturas mayores lo más conveniente es utilizar acero.

Los tubos más baratos llevan las aletas sujetas por medio de simple presión; esto funciona a temperaturas no mayores a 120 °C en proceso en los que las vibraciones pueden ser minimizadas.

Existen otros tipos de tubos como los llamados "bimetálicos" que están formados por dos tubos concéntricos; el tubo interno resiste la corrosión y las condiciones extremas ya que está constituido a base de materiales resistentes y caros, y el tubo externo es un tubo de aluminio con aletas que no han sido soldados sino que han sido extrufidas en frío al momento de fabricar el tubo. Este tipo de tubería puede operar a 300 °C en el fluido de proceso sin ningún problema.

Cuando las temperaturas pasan de los 300 °C es conveniente utilizar tubos en los que las aletas han sido insertadas

a presión en pequeños canales grabados en las paredes del tubo. Este tipo de sistemas son muy resistentes a los es fuerzos mecánicos producidos por las diferencias de dilatación a muy altas temperaturas.

Los extremos de los tubos nunca llevan aletas con el fin de poder ser insertados en los cabezales. La inserción en dichos cabezales se lleva a cabo por los mismos procedimientos descritos para insertar los tubos de un intercambiador de tubos y coraza en el espejo.

El área de flujo que el banco de tubos deja libre para el paso del aire, generalmente es igual a 50 por ciento del área total que presenta el banco.

Por lo general, la velocidad del aire impulsado por el ven tilador oscila entre los 1.5 y 4 m/s. El diámetro del ven tilador axial es, casi siempre igual al ancho del banco de tubos.

Uno de los problemas de estos aparatos es el ruido que desarrollan; cuando la velocidad de las puntas de la hélice del ventilador es muy grande, se producen sonidos muy fuertes que están relacionados con dicha velocidad elevada a la sexta potencia.

Para mover la hélice del ventilador generalmente es utilizado un motor eléctrico, sin embargo, existen casos en los que se requiere de tanta potencia que se llegan a utilizar turbinas de vapor,

#### EL INTERCAMBIADOR DE TUBOS Y CORAZA

Este tipo de intercambiadores pueden ser clasificados de la

siguiente manera (según su función):

Rehervidores de marmita (Kettle)  
Rehervidores de termosifón (verticales y horizontales)  
Rehervidores de circulación forzada (verticales y horizont.)  
Evaporadores de circulación forzada  
Evaporadores de tubos verticales largos  
Condensadores horizontales  
Condensadores verticales  
Intercambiadores en una sola fase

#### GENERALIDADES SOBRE REHERVIDORES

Se da el nombre de rehervidores a los intercambiadores de calor que tienen como función la de hacer hervir los líquidos de la base de una columna de destilación. Todos los rehervidores manejan un fluido de proceso que está en ebullición, los diferentes tipos de rehervidores difieren entonces en la manera en la cual promueven el flujo (circulación forzada o natural), en el lado del intercambiador en el que sucede la ebullición.

#### REHERVIDORES DE MARMITA (Kettle)

Estos rehervidores consisten de un haz de tubos situados dentro de una coraza cuyo tamaño es mucho mayor al tamaño del haz.

Usualmente se utiliza una coraza de tipo K (ver tabla 2.1).

Una instalación típica de un rehervidor de este tipo en los fondos de una torre de destilación es la que se muestra en la figura 2.7a. La alimentación al rehervidor se hace a una velocidad mas grande que la velocidad de vaporización

para evitar el almacenamiento de materiales de baja volatilidad dentro de la coraza.

El exceso de líquido fluye por encima de una pared situada al final del haz de tubos. La altura de esta pared, es típicamente de 5 a 15 cm mayor al diámetro del haz de tubos. Hay ocasiones en las que el producto de los fondos de la torre se produce a una velocidad menor a la velocidad de vaporización, en estos casos el líquido que sobrepasa de la pared y derrama se regresa a la torre.

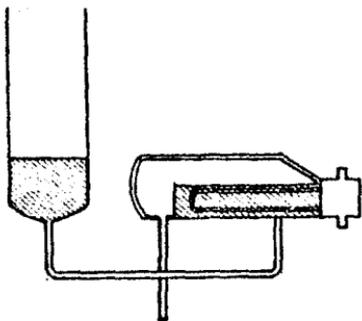
Una circulación natural se forma dentro del intercambiador de modo que el líquido fluye por fuera de los tubos debido a una diferencia entre la densidad del líquido que rodea a los tubos y la densidad de la mezcla de dos fases generada dentro de la alberca de ebullición.

Existe en una marcada diferencia entre la fracción de vapor en la mezcla de dos fases en las regiones cercanas a la superficie del líquido y las regiones de mayor profundidad. Esto da origen a una desigual distribución de los coeficientes de transferencia de calor dentro del líquido. Podemos apreciar esto en la figura 2.8 en la que no observamos simetría alguna en el reparto de los coeficientes.



Detalle de un rehevador de marmita

fig. 2.7 b



Rehevador de marmita  
instalado en la base  
de una torre de desti-  
lación

fig. 2.7 a

Uno de los problemas que presentan los rehervidores Kettle es el arrastre de líquido por las burbujas de vapor que emergen.

Generalmente este problema se resuelve colocando un separador líquido-vapor en forma de rejilla a la salida del vapor. Por esta misma razón, no se recomienda el uso de estos equipos cuando las mezclas que se manejan tienden a generar espuma.

Es obvio mencionar que el uso de los rehervidores de marmita en procesos de alta presión es muy reducido debido al gran tamaño de la coraza.

Los rehervidores de marmita nunca se usan para manejar fluidos sensibles a las altas temperaturas, ya que el tiempo de residencia es muy grande en comparación a otro tipo de equipos.

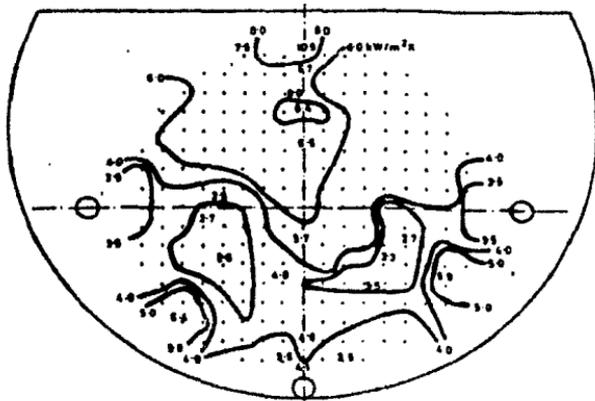


fig. 2.8 Distribución irregular de los coeficientes (8)

### REHERVIDORES VERTICALES DE TERMOSIFON

Estos aparatos funcionan utilizando el principio de que la generación de vapor dentro del equipo promueve una circulación.

Para su construcción, generalmente se utilizan intercambiadores de tipo E (ver tabla 2.1) en los que la ebullición sucede dentro de los tubos. Una instalación típica se muestra en la figura 2.7b. El nivel de líquido en el recipiente es siempre más alto que el espejo inferior del rehervidor y, frecuentemente está alineado con el nivel del espejo superior. Estos aparatos se diseñan para que la velocidad de recirculación sea mayor a la velocidad de ebullición. Las relaciones de recirculación (circulación/generación de vapor) son generalmente mayores a tres.

Los rehervidores de termosifón no pueden ser diseñados - sin considerar simultáneamente el sistema en el que habrán de ser incluidos, ya que las tuberías de salida deben de estar exentas, de ser posible, de restricciones puesto que estas restricciones no solo reducen la recirculación, sino que pueden inducir inestabilidades en el flujo. Es sumamente común dimensionar el área seccional del tubo de salida igualándola al área seccional de todos los tubos sumados. Las tuberías de entrada, sin embargo, se diseñan con restricciones deliberadamente colocadas, ya que éstas estabilizan el patrón de flujo.

Los rehervidores de termosifón colocados en forma vertical, son en promedio económicos en términos de espacio (área de terreno ocupada) y de estructura de soporte. No obstante, esto no significa que estos aparatos no aumenten su costo en otros renglones, por ejemplo: en la necesidad de que la

columna de destilación se encuentra elevada y en lo costoso que es su mantenimiento.

Estos intercambiadores se caracterizan por tener un tiempo de residencia relativamente bajo.

#### REHERVIDORES HORIZONTALES DE TERMOSIFON

En los rehervidores horizontales de termosifón, la ebullición ocurre del lado de la coraza. Una instalación típica se muestra en la figura 2.7b. La construcción generalmente se hace con corazas de tipo G o H (ver tabla 2.1). La salida se reemplaza a veces, por un domo que se eleva a cierta distancia de la parte superior de la coraza. En muchos diseños, se utilizan baffles pequeños que solo cubren la mitad inferior de la coraza. Al igual que en los rehervidores antes mencionados la circulación a través de la coraza es mayor que la vaporización.

La selección de la posición del rehervidor de termosifón (verticales u horizontales) depende de varios factores. Entre más grande sea el área de calentamiento requerida, más se favorece la selección del modelo horizontal (por las limitaciones de peso y altura). Si el líquido que se hierve tiene tendencia a incrustar los tubos se prefiere el tipo vertical por la facilidad de limpieza y de igual modo, si el medio de calentamiento tiene tendencia a incrustar la utilización de unidades horizontales es más frecuente.

#### REHERVIDORES DE CIRCULACION FORZADA

Estos aparatos son muy similares a los rehervidores de termosifón con la diferencia de que en este caso, el li-

quido se bombea dentro del intercambiador. Por esta razón, el diseño de los rehervidores de circulación forzada es mucho más fácil que el de los de termosifón.

En muchas ocasiones se utiliza la bomba que extrae los fondos de la columna para proporcionar al fluido la presión necesaria para fluir a través del rehervidor. El uso de estos aparatos es menor que el de los termosifones, sin embargo, son muy útiles cuando se manejan fluidos muy viscosos o cuando la velocidad de evaporación es muy baja.

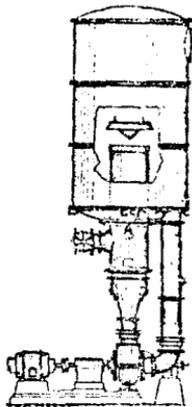
#### EVAPORADORES DE CIRCULACION FORZADA

Los evaporadores son usados generalmente con el fin de concentrar soluciones ricas en sólidos cristalizables. Hace mucho tiempo los evaporadores se construían en diseños horizontales cuya eficiencia era muy baja y que han sido sustituidos por otros más modernos y eficientes contruidos con tubos verticales.

Los evaporadores de circulación forzada son menos económicos que aquellos en los que la circulación se realiza de manera natural no obstante, son necesarios cuando la viscosidad de la solución que ha de evaporarse es muy grande. Existe un límite bien definido de viscosidad a partir del cual la circulación natural se vuelve imposible.

De igual manera, este tipo de aparatos es recomendable - cuando existe la tendencia a formar depósitos de sales. Este efecto es disminuido de manera importante cuando la velocidad del fluido es suficientemente alta como sucede cuando se utilizan bombas para impulsar los fluidos.

Un típico evaporador de circulación forzada es el que se muestra en la figura 2.9.



Evaporador vertical  
de circulación for-  
zada

fig. 2.9

#### EVAPORADORES VERTICALES DE TUBOS LARGOS

Estos equipos consisten de un elemento de calentamiento - (dispuesto en forma de haz de tubos) diseñado para que la solución pase por dentro de los tubos por circulación natural.

La entrada del vapor lleva un "cinturón de vapor", con el fin de reducir la caída de presión del mismo y el haz de tubos está provisto de baffles.

El espejo superior es flotante y por encima del mismo, se coloca un deflector que evita el arrastre de gotas de líquido por el vapor. Este tipo de evaporadores es bueno para manejar líquidos espumosos. La velocidad del vapor es parecida a la de los otros tipos de evaporadores.

Los tubos que se emplean usualmente tienen un diámetro externo de entre 3 y 5 cm. y una longitud de entre 3 y 7 m.. Un típico evaporador vertical es el que se muestra en la fig. 2.10.

Evaporador  
vertical

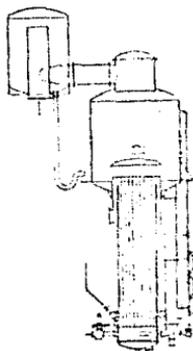


fig. 2.10

Existen algunos tipos de evaporadores arreglados en posición vertical, sin embargo, el que hemos mencionado es el de uso más frecuente.

#### CONDENSADORES HORIZONTALES Y VERTICALES

El aparato que ha de diseñarse en este proyecto es un condensador, de manera que hablaremos con más detalle sobre este tipo de intercambiadores.

Los condensadores son ampliamente utilizados en la industria; ya sea que hablemos de un proceso de generación de energía o de un proceso químico. En la generación de energía se utilizan estos equipos como paso final de un ciclo

termodinámico, y en la industria de los procesos químicos se les utiliza generalmente para condensar las corrientes de las partes superiores de las torres de destilación. No obstante, ocurren condensaciones en muchos otros tipos de procesos en los que se utiliza un vapor de agua condensante como medio de calentamiento.

Los condensadores juegan un papel muy importante en la industria de la generación de energía, ya que en esta industria se obtiene una máxima eficiencia cuando el calor es transferido en el condensador a una temperatura tan baja como sea posible. Consecuentemente, el condensador debe ser diseñado para operar con una diferencia de temperaturas relativamente baja. En la condensación de los domos de una columna de destilación, la presión de operación determina la temperatura de condensación. Se debe diseñar entonces para una diferencia de temperaturas igual a la existente entre la temperatura de saturación de la mezcla de proceso y la temperatura promedio del medio enfriante. Todo esto está, además, limitado por la caída permisible de presión a lo largo del condensador. El valor de esta caída de presión es generalmente bajo, de modo que dificulta el diseño.

Para la industria de generación de energía, se prefieren condensadores de superficie, es decir, condensadores en los que el vapor pasa por fuera de los tubos horizontales por dentro de los cuales fluye agua de enfriamiento.

Para la industria química, se prefieren condensadores en forma de intercambiadores de calor de tubos y coraza en los que la condensación puede llevarse a cabo por dentro o fuera de los tubos que puedan ser verticales y horizontales.

La superficie de condensación de los condensadores parciales puede tener cualquier orientación. La decisión de - construirlos en posición horizontal o vertical o la decisión de cuál de los flúidos irá por dentro o por fuera de los tubos, depende de la naturaleza de dichos flúidos, de su presión u de su tendencia a la corrosión.

En los condensadores verticales en los que la condensación sucede dentro o fuera de los tubos, se forma siempre una pelcula de líquido condensado que, bajo la acción de la gravedad, va aumentando en su grosor a medida que desciende a lo largo de la superficie tubular de condensa-ción. El régimen de flujo de esta capa, será laminar en las zonas superiores de los tubos en donde aun no alcanza un espesor considerable pero, a medida que aumenta su grosor y su velocidad, el régimen tiende a la turbulencia y la transferencia de calor en esa capa que originalmente se comportaba como un aislante aumenta de manera sorprendente. Lo anterior puede ser apreciado en la figura 2.11a En la sección "b" de la misma figura, podemos ver como el grosor de la capa condensada depende también de la dirección del flujo del vapor. Un flujo en cocorriente favorecerá una capa delgada y, por ende, una alta transferencia de calor. Un flujo de vapor de alta velocidad en contracorriente, favorecerá el estancamiento de la capa perdiéndose así, gran parte del proceso de transferencia de calor.



a

Condensación vertical  
con control de la gr  
avedad



b

Condensación vertical  
con control del flujo  
fase gas

fig. 2.11

Puede llegar a suceder el caso extremo que vemos en la fi  
gura 2.11 b. en la que la velocidad del vapor es tan gran  
de que el condensado asciende la superficie de condensa  
ción. Cuando un vapor condensa sobre la superficie ex  
terna de un banco de tubos horizontales puede suceder que  
el flujo del vapor sea vertical (debido a los baffles) u  
horizontal (en ausencia de baffles). Por lo general en los  
condensadores horizontales se colocan los baffles verti  
camente con el fin de no crear zonas de estancamiento. Cuan  
do los tubos se colocan en una posición perfectamente hori  
zontal (casi imposible) el condensado gotea verticalmente  
y se acumula sobre los tubos inferiores en los que forma  
capas mucho más gruesas que dificultan la transferencia de  
calor. Si los tubos se inclinan (aunque sea una inclina  
ción de  $1^\circ$ ) el condensado tiende a fluir siguiendo la pen  
diente hasta toparse con un baffle que lo hace caer. De  
este modo vemos que la existencia de baffles en los conden

sadores en los que el vapor fluye por el lado de la coraza también tiene gran importancia térmica y no solo mecánica. Lo anterior puede observarse en la fig. 2.12.



a) Condensación horizontal  
dentro de tubos con gra  
vedad controlante

b) Condensación horizontal  
dentro de tubos con flu  
jo controlante

fig. 2.12

La condensación también puede ocurrir por dentro de los tu  
bos horizontales. A bajas velocidades del vapor, los efectu  
os de la gravedad determinarán el tipo de condensación.

Una película de condensado de espesor variable se forma al  
rededor del perímetro del tubo y escurre al fondo del mismo  
para formar un estrato (fig. 2.12 a). A mayores veloci  
dades de vapor, la capa de condensado tiene un grosor -  
casi constante debido a que la fuerza de gravedad pierde  
impertancia. En este caso se forman pequeñas gotas que  
son arrastradas por el vapor (fig. 2.12 b).

Como es de esperarse, las altas velocidades del vapor favore  
cecen la transferencia de calor debido a que la capa de  
condensado formada tiene un espesor mucho menor.

## CAPITULO III

### SELECCION DEL INTERCAMBIADOR Y DE SUS DIMENSIONES

Los requerimientos del intercambiador que ha de diseñarse en este proyecto son muy distintos a los que se tienen cuando se diseña un equipo industrial, ya que en el caso que nos ocupa, no tenemos definida ninguna carga térmica. No tenemos tampoco que cumplir con requerimientos de área de transferencia.

Por los motivos anteriores, el tipo de aparato y sus dimensiones serán elegidas utilizando criterios adecuados a los fines didácticos que persigue esta investigación.

De los flúidos existentes en el laboratorio elegiremos agua y vapor de agua para la alimentación del equipo por ser, estos flúidos, fáciles de manejar y baratos, sin contar que sus propiedades pueden ser encontradas en la bibliografía ordinaria, lo que los convierte en los flúidos ideales para estudios de laboratorio. De esta manera, la operación que se ha elegido es una condensación que podrá ir acompañada, si se quiere, de una transferencia de calor sensible (cuando el vapor esté por arriba de sus condiciones de saturación a la entrada del proceso).

Elegiremos que el vapor fluya y condense por dentro de los tubos por las siguientes razones:

- El vapor de agua es más corrosivo que el agua y es menos caro comprar tubos de un material resistente a la corrosión que comprar toda la coraza del mismo material.
- La condensación por dentro de los tubos nos ofrece un interesante problema de flujo en dos fases.

- Los equipos en los que el fluido condensante pasa por dentro de los tubos están cobrando importancia en la industria moderna. Como ejemplo de esto podemos mencionar el aumento en el uso de condensadores enfriados por aire en los que el fluido condensante forzosamente tiene que pasar por dentro de los tubos.

De este modo queda completamente definida la operación que se llevará a cabo y podemos, ya, seleccionar las dimensiones del equipo.

Para elegir las dimensiones del equipo debemos de analizar, - nuevamente, los servicios del laboratorio, pero esta vez, de manera cuantitativa. El vapor que podemos obtener de la caldera, ordinariamente se halla casi saturado a unos  $5 \text{ kgf/cm}^2$  absolutos y a  $155 \text{ }^\circ\text{C}$  aproximadamente. El agua de enfriamiento es casi ilimitada y su temperatura varía entre  $15$  y  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  dependiendo de la época del año.

De esta manera, propondremos ahora un diseño que será corroborado posteriormente y que estará sujeto a los siguientes criterios de diseño:

- Compatibilidad con los servicios mencionados
- Costo
- Facilidad de construcción y de operación.

Propongamos las siguientes dimensiones:

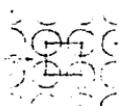
PIEZA	DIAMETRO EXTERNO	LONGITUD	ESPESOR
coraza	11.5 cm.	82.0 cm.	0.5 cm.
cabezales	11.5 cm.	15.0 cm.	0.5 cm.
espejo 1	14.0 cm.	- - -	1.3 cm.*
espejo 2	10.5 cm.	- - -	1.3 cm.*
mamparas	75% de la coraza	- - -	0.16cm.*
tubos	1.27 cm.	82.0 cm.	0.1 cm.
boquillas agua	1.90 cm.	15.0 cm.	0.3 cm.
boquilla vapor	3.3 cm.	15.0 cm.	0.3 cm.

Ahora veamos qué arreglo de tubos podríamos tener. Con el fin de no debilitar demasiado la pieza que hará las veces de espejo, propondremos que los tubos estén separados por una distancia de 0.5 cm. ya que no existen estándares definidos por las asociaciones de fabricantes para diámetros de coraza tan pequeños como el que habrá de usarse. De este modo podríamos tener, arreglados en geometría cuadrada, 21 tubos de las dimensiones mencionadas en la tabla anterior. Se ha escogido la geometría cuadrada debido a la facilidad de construcción y de mantenimiento pero cabe mencionar que existen tres tipos de arreglos geométricos para los tubos:

- a) Cuadrado. Aparece en la fig. 3.1a. Presenta grandes ventajas para el mantenimiento cuando se manejan flujos incrustantes. Ofrece una baja caída de presión pero genera un patrón de flujo de turbulencia muy pobre debido a la formación de canalizaciones.

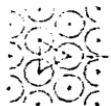
\* NOTA: En las piezas planas el espesor se refiere al espesor de la pieza y no al espesor de la pared como sucede en las piezas cilíndricas. Por eso, al tratarse de piezas planas, no se menciona la longitud.

- b) Triangular. Genera un patrón de flujo muy turbulento a costa de una gran caída de presión, sin embargo, - solo puede ser usado cuando se manejan fluidos poco incrustantes debido a lo difícil que es su limpieza (fig. 3.1b).
- c) Cuadrado rotado. Aparece en la figura 3.1c y da una turbulencia y una caída de presión intermedias entre los dos modelos anteriores.



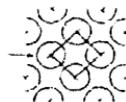
Distribución  
cuadrangular

a



Distribución  
triangular

b



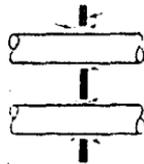
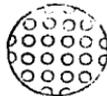
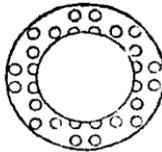
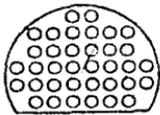
Distribución  
cuadrangular  
girada 90 ° C

c

fig. 3.1

La posición de las mampara y su cantidad dependen del tipo de intercambiador en el que vayan a ser utilizados. Cuando el fluido que pasa por la coraza es un gas, las mamparas no son necesarias en cuanto a lo que a flujo de fluidos se refiere, sin embargo, se utilizan, en estos casos, mamparas con fines mecánicos. los cuales tienen un corte mucho menor al de las mamparas normales sin que este corte llegue a pasar del 50% del diámetro de la coraza, ya que de suceder esto, los tubos del centro quedarían sujetos a doblarse por no tener soportes. Cuando el fluido que pasa por la coraza es un líquido, entonces las mamparas cumplen con la función de crear un patrón de

flujo 'cruzado' con mayor turbulencia y que genera una mayor transferencia de calor. En estos casos, se prefiere que el corte de las mamparas esté entre 0.6 y 0.8 del diámetro interno de la coraza cuando se trata de mamparas de forma tradicional ya que se han introducido en el mercado una multitud de formas geométricas que pueden hacer las veces de mamparas. En el caso del equipo que nos ocupa elegiremos las mamparas tradicionales cortados en segmento de círculo y colocándolos con el corte de manera horizontal como se puede ver en la figura 4.2a.



a) Baffles de sección cortada

b) Baffles tipo dona

c) Baffles de orificio

fig. 3.2

Esta misma posición de mamparas no podría ser utilizada si hubiésemos elegido que el fluido condensante pasara por la coraza, ya que quedaría atrapado entre los baffles de la parte inferior. En dicho caso podríamos utilizar el mismo tipo de baffle pero con el corte horizontal colocado verticalmente como se aprecia en la fig. 3.2. En muchos casos en los que el corte se coloca de manera horizontal, se perfora un orificio en la base de la mampara con fines de drenado cuando el equipo deja de funcionar. En el caso del intercambiador diseñado en este proyecto el orificio de drenado no será necesario ya que el sellado de la mampara con la coraza no será muy bueno, y de esta manera, permitirá el drenado de manera natural. Es obvio que si las mamparas no son colocadas de manera horizontal, no requieren del orificio de drenado.

Es interesante señalar que el flujo cruzado es mucho más eficiente, en cuanto a lo que a transferencia de calor se refiere, que el flujo en paralelo o en contracorriente. Este fenómeno es tan notable que algunos intercambiadores no llevan tubos en las 'ventanas' de la mampara ya que se considera que esa parte del flujo (que no está en flujo cruzado) proporciona una transferencia de calor tan pobre en comparación con la otra sección de flujo que es más económico suprimirla. En esta clase de intercambiadores, el flujo es 100% cruzado.

Existe otro tipo singular de mamparas llamadas "de dona" construidos como se indica en la figura 3.2b. Su utilización no es muy frecuente ya que su efectividad es menor que la de los baffles tradicionales mencionados anteriormente.

Las mamparas se sostienen con varillas a las que pueden ir soldadas o pueden quedar fijas mediante separadores hechos con trozos de tubo colocados sobre el exterior de las varillas en forma concéntrica. En nuestro caso no pondremos varillas sino -

que las mamparas irán directamente soldadas a los tubos. Esto se puede hacer solo en diámetros pequeños con servicios no muy violentos.

La figura 3.2 hace notar que las irregularidades en la construcción de la coraza y de las mamparas pueden crear espacios a través de los cuales parte del fluido puede tomar el camino más directo y disminuir, así, el flujo cruzado que tan importante es para el funcionamiento eficiente de estos aparatos - con el de evitar este fenómeno, se pueden colocar sellos de algún material que resiste las condiciones de operación.

El espaciamiento entre las mamparas se elige según los requerimientos de transferencia de calor y de caídas de presión. Sin embargo, se ha determinado que el óptimo espaciamiento oscila entre 1 y 1/5 veces diámetro de la coraza. Aquí elijeremos una separación intermedia entre las dos anteriores que genere caídas de presión moderadas ya que la presión disponible en el agua de enfriamiento del laboratorio es variable de un día a otro. Escogeremos entonces, colocar 9 mamparas con una separación de 8 cm.

El condensador será horizontal debido a las siguientes razones:

- Los condensadores verticales no convienen para ser usados esporádicamente ya que presentan algunos problemas de drenado, sobre todo, del lado de la coraza.
- La eficiencia de los condensadores horizontales es mayor que la de los verticales llegando a ser, en ocasiones, - tres veces más grande.
- El uso de condensadores horizontales es industrialmente más frecuente que el de los verticales, sobre todo, en la industria de generación de electricidad mediante vapor y en condensadores para la parte superior de las torres de destilación.

Elegiremos la operación de un solo paso por los tubos y un solo paso por la coraza debido a lo siguiente:

- Facilidad en la construcción
- Versatilidad para que el equipo pueda ser operado en paralelo o en contracorriente. Por ejemplo, si tuviese dos pasos por los tubos, lo mismo daría si se operara en paralelo que en contracorriente.

Esto sería de utilidad solo en el caso de que el intercambiador se usara con fines distintos a los de una simple condensación.

a) Selección de los materiales de construcción

Un buen diseño puede arruinarse completamente cuando la selección de los materiales de construcción no se hace cuidadosamente. Estos materiales deben ser adecuados a los requerimientos específicos de cada proceso.

En el diseño del equipo que nos ocupa analizaremos, para cada material, las siguientes características:

- Resistencia a la corrosión
- Resistencia al esfuerzo mecánico
- Coeficiente de conductividad térmica
- Precio y disponibilidad en el mercado

Puede ocurrir que un material que tiene una muy alta conductividad térmica vaya a utilizarse en un lugar donde dicha propiedad no sea de gran utilidad; como las propiedades van a ser analizadas por medio de valores numéricos, ese material se vería favorecido numéricamente por una propiedad que en la realidad

no es útil. Para evitar esto, introduciremos un factor de ponderación 'F' para cada propiedad en cada pieza del equipo.

a.1) Coraza y bridas

La coraza y las bridas serán del mismo material con el fin de facilitar el trabajo de soldadura.

- Resistencia a la corrosión: esta resistencia no debe ser muy alta, ya que por la coraza, pasará agua. El agua no es un fluido corrosivo cuando se encuentra en estado líquido. Por lo anterior, elegiremos que el factor de ponderación 'F' igual a 0.5 para esta propiedad.
- Resistencia al esfuerzo mecánico: este punto tampoco es muy importante ya la presión que tendrá que resistir la coraza no es muy grande y su diámetro es relativamente pequeño. Elegimos  $F = 0.4$ .
- Coeficiente de conductividad térmica: en este caso el coeficiente no tiene ninguna importancia ya que el calor que pase por la coraza será aquel que el fluido de enfriamiento ceda a la atmósfera. Esta transferencia no afecta perceptiblemente la eficiencia del equipo.  $F = 0$ .
- Precio y disponibilidad en el mercado: el precio del material escogido para la coraza y para las bridas es muy importante ya que éstas son las piezas más grandes del aparato y la selección de un material demasiado caro para estas piezas repercutiría enormemente en el costo total del equipo.

En la siguiente tabla analizamos diversos materiales para la construcción de la coraza y de las bridas. Las propiedades analizadas se encuentran abreviadas. Para su identificación remítase a la lista de propiedades de la página anterior.

	cobre	vidrio	acero inox.	acero	hierro cromado
F=0.5 corr <sup>†</sup>	10	10	10	7	8
F=0.4 esfm.	7	2	10	9	8
F=0 ccte.	10	10	9	9	9
F=1.0 prec.	5	0	0	2	10
	12.8	5.8	9.0	9.1	17.2

Por lo anterior decidimos construir la coraza y las bridas en hierro colocando, posteriormente, un recubrimiento galvánico de cromo sobre las piezas ya soldadas y terminadas.

#### a.2) Tubos y espejos

- Resistencia a la corrosión: en lo que a los tubos se refiere, la resistencia a la corrosión debe ser algo mayor que la de la coraza ya que el vapor es más corrosivo que el agua líquida.  $F = 0.7$ .
- Resistencia al esfuerzo mecánico: cuando el diámetro es pequeño los cilindros se comportan como figuras altamente resistentes a la presión interna y externa. Por esta razón la importancia de esta propiedad no es muy grande en este caso.  $F = 0.2$ .
- Coeficiente de conductividad térmica: este coeficiente debe ser alto ya que las paredes de

los tubos constituyen la parte del sistema en la que sucede casi todo el intercambio de calor. Sin embargo, hemos visto ya que la conductividad térmica de los tubos se limita por la capa de condensado en su parte interna y por la película laminar del líquido de enfriamiento en su parte externa.  $F = 0.4$ .

- Precio y disponibilidad en el mercado: el precio también es importante en los tubos ya que éstos representan una buena fracción del total del costo del equipo.  $F = 1.0$ .

	cobre	latón	acero inox.	acero	alumi nio	hierro
F=0.7 corr.	10	10	10	7	1	1
F=0.2 esfm.	7	7	10	9	4	8
F=0.5 ccte.	10	9	9	9	10	8
F=1.0 prec.	5	4	0	2	5	10
	18.4	16.9	13.5	13.2	11.5	16.3

De esta manera, los tubos serán de cobre, al igual que los espejos.

La combinación de metales resultante, no presenta ningún problema de corrosión bimetalica. Es decir, el cromo y el cobre que habrán de estar en contacto con el agua caliente, no forman ningún tipo de par electrolítico.

### a.3) Tornillos

- Resistencia a la corrosión: en lo que a los tornillos se refiere, esta propiedad debe ser  $\delta p$ -

tima con el fin de que el equipo sea fácilmente desmontable.  $F = 1.0$ .

- Resistencia al esfuerzo mecánico: los tornillos tienen como fin mantener unido el equipo y dar la fuerza necesaria para los sellos.  $F = 0.8$ .
- Coeficiente de conductividad térmica: en este caso, esta propiedad no es importante.  $F = 0$ .
- Precio y disponibilidad en el mercado: como el equipo solo llevará 16 tornillos, no es indispensable que sean baratos.  $F = 0.4$ .

	acero inox.	acero	latón	aluminio
F=1.0	10	7	10	1
F=0.8	10	9	7	4
F=0	-	-	-	-
F=0.4	0	2	4	5
	18	15	17.2	6.2

Por lo tanto, aunque sean caros, los tornillos serán de acero inoxidable.

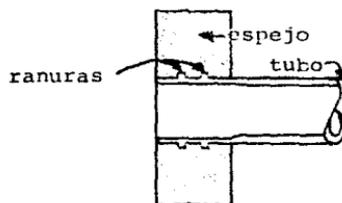
- \* CORR = RESISTENCIA A LA CORROSION
- ESFM = RESISTENCIA AL ESFUERZO MECANICO
- CCTE = COEFICIENTE DE CONDUCTIVIDAD TERMICA
- PREC = PRECIO Y DISPONIBILIDAD EN EL MERCADO

b) Detalles mecánicos de la construcción

b.1) Unión espejos-tubos

Comenzaremos esta sección hablando del tipo de unión seleccionada para los tubos y para los espejos; debemos mencionar, entonces, que existen comúnmente dos distintos tipos de mecanismos para lograr la resistencia y el sello requerido por estas uniones.

El primer tipo de unión se logra mediante un procedimiento conocido como "rolar los tubos" y que se lleva a cabo perforando los espejos con un diámetro de broca prácticamente igual al de los tubos. Después, se practican dos o tres ranuras internas en el orificio como se puede ver en la figura 3.4.



Tubos rolados

fig. 3.4

Una vez que las ranuras están hechas, se inserta el tubo dentro del orificio y se hace pasar por su interior un aparato llamado "avellanadora" que consiste en una broca cónica cuyo diámetro es ligeramente mayor al diámetro del tubo. Como consecuencia de este proceso, el tubo se calienta y se deforma, penetrando, así, dentro de las ranuras ya mencionadas.

Este tipo de unión es la que mas se utiliza en la industria ya que su sello y su resistencia mecánica son bastante buenos. En algunos casos en los que se requiere de un sello perfecto, se practican uniones de este tipo es mas sencillo de hacerse, mas barato pero su sello es menor y consiste en una simple unión soldada entre el espejo y los tubos.

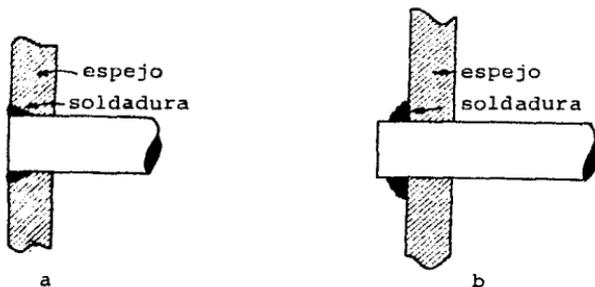


fig. 3.5 Uniones soldadas

Como puede verse en la figura 3.5, se puede soldar de dos maneras; una en la que los tubos son mas largos que lo necesario y otra en la que se practican ranuras que habrán de servir como canales en los que puede alojarse la soldadura.

Para nuestro intercambiador, hemos elegido el segundo tipo de unión (con canal) debido a que, con las presiones a las que habrá de estar sometido el aparato, no se requiere de un sello perfecto.

### b.2) Cabezales y bridas

Los cabezales de un intercambiador de calor pueden tener distintas formas, por lo general, se prefiere que las tapas de los cabezales no sean planas, para que no aumente demasiado el espesor del material con el que han de ser fabricadas.

Sin embargo, en nuestro caso, el diámetro de la coraza es pequeño y la presión interna es moderada, así que construiremos tapas planas ya que son mucho más fáciles de fabricar.

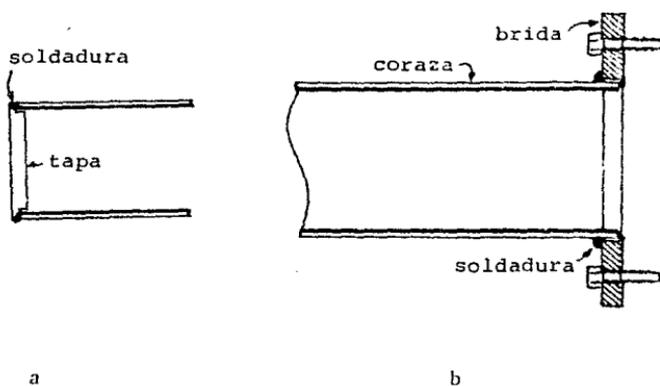


fig. 3.6

En la figura 3.6a podemos ver la forma con la que es conveniente construir este tipo de tapas. Nuevamente, como en el caso de la unión tubos-espejo, debemos dejar una ranura o canal en la que pueda alojarse una cierta cantidad de soldadura. Mediante este sistema, se logran uniones más fuertes y mejor acabadas.

El espesor de la placa con la que se harán las tapas de los cabezales será de 1.3 cm. con lo que queda asegurada una resistencia a una presión muy superior a la que habremos de manejar en las condiciones normales de operación del aparato. (V. Apéndices).

La unión del cabezal posterior con el haz de tubos se hará de una manera no convencional ya que las uniones tradicionales son de los dos tipos; las que son fijas y que no permiten retirar el haz de tubos del aparato, lo cual no es conveniente para nuestro intercambiador debido a que sus fines son didácticos y, el otro tipo de unión, es la que recibe el nombre de "cabezal flotante cuyo costo y complejidad de construcción son muy grandes además de la restricción de que un intercambiador de este tipo debe de tener, por lo menos, dos pasos por los tubos.

De modo que dicha unión se hará con un sello de neopreno entre el espejo posterior y una ceja con la que estará provista la brida. La presión que esta junto o sello requiere será proporcionada por los ocho tornillos que unen las bridas de los cabezales a las bridas de la coraza como puede observarse en la figura 3.7.

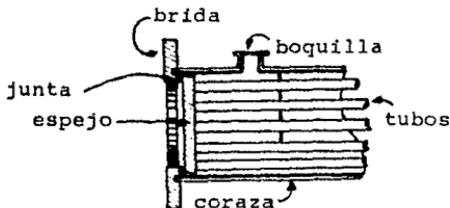


fig. 3.7

En cuanto a las bridas, hemos elegido un tipo de brida muy sencillo de forma plana que tiene necesidad de llevar un sello de asbesto a diferencia de las bridas acanaladas que no requieren de sello pero cuya construcción es mucho mas costosa. Nótese en la figura 3.6b la forma especial que tiene la brida para embonar con la coraza.

Hemos escogido un grosor de brida que excede los estándares del T.E.M.A. y un número de tornillos de cierre (8) por razones de seguridad.

### b.3) Soldadura

Las uniones que deben ser hechas con soldadura son las siguientes:

Tubos-espejos  
tapas-cabezales  
bafles-tubos

Hablemos entonces sobre las técnicas de soldadura utilizadas para la unión entre los tubos y los espejos.

Cualquier tipo de soldadura autógena requiere de - que las partes a soldar estén a una temperatura - tal que la soldadura, al ser aplicada, se funda y fluya fácilmente. Esto es algo muy difícil de lograr en el espejo del intercambiador ya que éste constituye una gran masa de cobre de tamaño mucho mayor al de los tubos cuyas pequeñas paredes se calientan mucho mas rápido que el espejo, existiendo así, el riesgo de que parte de los tubos sufra una

fusión que los dejaría inservibles. Por esto, la operación de soldado debe hacerse con precaución, tratando de que el calor de la flama del soplete de acetileno caliente mas el espejo que los tubos que ya se han incrustado en los orificios hechos previamente.

Otro problema que se presenta comunmente en estos casos de soldadura es el siguiente: cuando comienza la operación de soldado, los espejos ya se hallan unidos a los tubos por simple presión de modo que todo el haz de tubos se encuentra ya en su posición definitiva, la cual es muy importante ya que si alguno de los espejos queda ligeramente desviado de su perpendicularidad a los tubos, no se puede asegurar una buen sello en la junta espejo brida. De este modo, al comenzar a soldar estamos seguros de que los tubos se hallan bien fijos ya que fueron introducidos a presión en los orificios de los espejos cuyo diámetro es ligeramente mas pequeño que el de los tubos, pero cuando el cobre comienza a calentarse bajo la acción del soplete, se dilata y los orificios se agrandan liberando, así, a los tubos. En ese momento el espejo el espejo puede moverse fácilmente y quedar soldado en mala posición.

Por la razón anteriormente explicada, debemos fijar el espejo a dos de los tubos de las orillas con la ayuda de un rolador de tubos y luego comenzar a soldar por los orificios que se encuentran en el centro del espejo y terminar por los de los bordes.

En cuanto al tipo de soldadura que habremos de utilizar, debemos mencionar que es una soldadura hecha

a base de plata. Utilizaremos este tipo de soldadura debido a su gran resistencia a las altas temperaturas, ya que si soldamos las uniones con bronce o estaño, tendríamos el riesgo de una ruptura si la temperatura del espejo llegara a rebasar los 160 °C lo cual es posible en caso de que suministro de agua llegara a fallar.

Este tipo de soldadura requiere, para su aplicación, de una substancia llamada fundente, la cual sirve para limpiar las superficies a soldar y dejarlas libres de óxidos y grasas que podrían debilitar las uniones.

La unión entre las tapas y los cabezales, al igual que la unión entre las bridas y la coraza, es mucho mas sencilla de soldar que los tubos, ya que puede efectuarse a la soldadura eléctrica con varillas para soldar que ya tienen integrada una pequeña capa de fundente. Esto es muy sencillo de hacer así que no requiere de mayor explicación.

#### b.4) Unión boquilla-coraza

Es conveniente que esta unión no sea soldada con el fin de aumentar la versatilidad del aparato, - permitiendo modificaciones en su posición y su patrón de flujo. Es por esto que el intercambiador llevará llevará estas uniones en forma roscada. - Esto es algo que no sería posible en un intercambiador de calor de gran tamaño, pero en este caso sí lo es ya que la boquilla mas grande (la de la entrada del vapor) no excederá los 4 cm. de diámetro.

Todas las uniones roscadas llevarán rosca cónica (1° de conicidad de cada lado). Esto permite que los sellos en las uniones sean mejores ya que entre mas penetra la rosca del tubo en la rosca de la coraza, mayor se va haciendo la presión entre las dos piezas.

b.5) Trampa de vapor

Es necesario que, a la salida del condensado, sea instalada una trampa de vapor para no dejar escapar el vapor que aun no ha condensado. De este modo, el aparato siempre funcionará como condensador total.

En general, se acostumbra comprar estas trampas - con una capacidad tres veces superior a la máxima cantidad de vapor condensado que el aparato pueda producir. Es decir que la trampa debe ser diseñada mecánicamente para que pueda desalojar una gran cantidad de líquido ya que se trata de un punto crítico en la cuestión de la seguridad con la que pueda ser operado el aparato. Si llegara un momento en el que la trampa de vapor no pudiera desalojar todo el líquido, el nivel de condensado aumentaría en el interior del equipo.

En este equipo, por razones de costo, instalaremos una trampa de vapor de las denominadas "Termo dinámica" que funcionan a base de un resorte que se expande o se contrae según la temperatura como se puede apreciar en la siguiente figura:

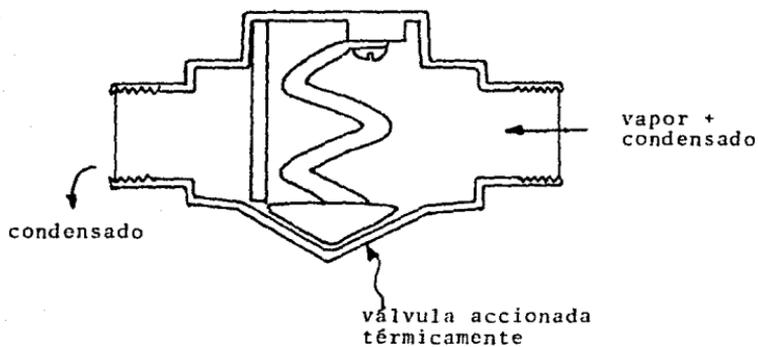


fig. 3.8 Trampa de vapor termodinámica

PRACTICAS

a) PROCEDIMIENTOS PREVIOS A LAS PRACTICAS

1) Verificación de los sellos del equipo.

Debe verificarse la junta que evita que el fluido frío entre en contacto directo con el vapor. Esta junta se localiza entre el espejo y la brida del lado del cabezal que recibe el suministro de vapor.

La siguiente figura muestra el funcionamiento de dicha junta:

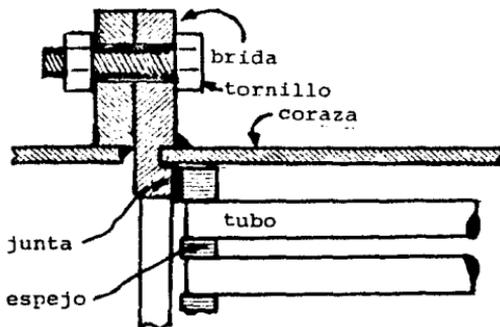


figura P 1

Como puede verse, si la junta se ha dañado con el tiempo que lleva el aparato de no ser utilizado, el vapor se filtrará y pasará del cabezal con lo que la operación de con

densación se verá alterada y, por lo tanto, los resultados de los cálculos de las prácticas serán erróneos. Cuando esta junta ha sufrido algún daño, puede verse cómo el vapor comienza a salir por donde sale el agua de enfriamiento. Cuando esto sucede, es urgente abrir el aparato y reemplazar la junta. Originalmente, esta junta será hecha con neopreno por razones de presupuesto, pero lo ideal sería que fuera de teflón. Sin embargo, el neopreno puede soportar fácilmente las condiciones de temperatura a las que será trabajado el aparato. El grosor ideal de esta junta es de 0.32 cm. (1/8 in) aunque a la vista parezca que es demasiado gruesa.

La presión necesaria para hacer el sello se logra al apretar los ocho tornillos de la brida opuesta. Por esta razón es muy importante que los tornillos lleven rondanas de presión.

Para verificar el estado de la junta debe seguirse el siguiente procedimiento:

- 1.a) Destornillar los 8 tornillos del cabezal en el que se encuentra la salida del condensado. (donde está instalada la trampa de vapor).
- 1.b) Retirar cuidadosamente el haz de tubos.
- 1.c) La junta deberá estar adherida al espejo menor. De no ser así, se debe introducir la mano dentro de la coraza para retirar la junta que pudiera estar atorada.
- 1.d) Verificar el estado en el que se encuentra la junta.
- 1.e) Cambiarla si es necesario.

Esta junta no es la única del aparato pero es la de mayor importancia ya que su buen funcionamiento es crítico por

las razones ya mencionadas. Además de esta junta existen otras dos que sirven para sellar el espejo mayor. Dichas juntas pueden verse desde que se retira el cabezal del lado de los condensados. Si se hallan deterioradas también deberán ser sustituidas. Originalmente estas juntas serán de asbesto y su grosor será de 0.16 cm. (1/16in).

Antes de proceder al uso del intercambiador, deberá verificarse que las salidas de condensado y agua caliente estén debidamente canalizadas hacia los desagües. De no ser así, pueden adaptarse rápidamente un par de mangueras flexibles para cumplir con dicha función.

## 2) Calibración del rotámetro.

El intercambiador cuenta con un rotámetro que puede ser calibrado antes de comenzar las prácticas para agilizar el desarrollo de las mismas.

Para esto, puede llevarse a cabo el siguiente procedimiento:

- 2.a) Abrir la válvula de alimentación de agua fría (V. pieza 8 en la fig. P2) hasta llenar toda la coraza del aparato.
- 2.b) Regular el flujo de agua hasta obtener 180 l/hr. - Esto puede medirse utilizando el sistema rudimentario de llenado de un recipiente de capacidad conocida en un tiempo determinado.
- 2.c) Cuando se ha obtenido este gasto de agua, puede controlarse la altura de la bala del rotámetro usando la válvula A (V. fig. P2).
- 2.d) Regúlese la altura de la válvula hasta que ésta quede a 1/4 de la altura del tubo aproximadamente. Enton-

ces, sabremos que el rotámetro en ese punto indica un gasto de 180 l/Hr.

- 2.e) Seguir el mismo procedimiento aumentando 10 l/Hr. a cada vez hasta llegar a tener un intervalo de medición adecuado para las prácticas que se piensen hacer. Puede hacerse una marca en la tablilla de acrílico C (fig. P2) en cada medición con el fin de tener una escala graduada para fijar cualquier gasto en cualquier momento de la práctica.

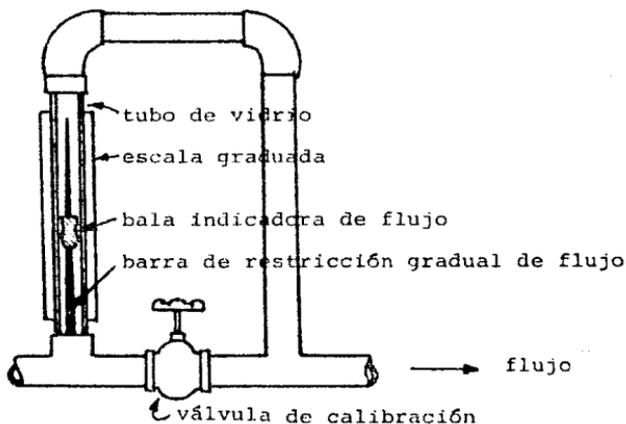


fig. P2 Rotámetro

Supondremos que la medición del gasto no será afectada por la temperatura del líquido, ya que la variación en la densidad y la viscosidad del agua dentro del intervalo de temperaturas que se van a manejar no es suficiente como para afectar apreciablemente el funcionamiento del instrumento. Por esta razón, el rotámetro fue ins-

talado antes del intercambiador ya que las variaciones de temperatura causadas por el mismo sí podrían ser lo suficientemente grandes como para causar irregularidades en la medición.

b) FUNDAMENTOS TEORICOS DE LAS PRACTICAS

Intercambio de calor en fluidos con cambio de fase.

El cambio de fase que ocurre durante el proceso de transferencia de calor en cuestión, complica de manera considerable los cálculos relacionados con el problema y la comprensión teórica del mismo.

Imaginemos brevemente lo que sucede cuando nuestro intercambiador entra en funcionamiento: el agua comienza a fluir dentro de la coraza hasta llenarla. En este momento, los tubos se encuentran ya rodeados de un medio frío, con alta conductividad térmica al que pueden transferir grandes cantidades de calor. Cuando el vapor comienza a fluir dentro de los tubos, comienza a condensarse inmediatamente sobre las paredes internas de los mismos por la simple razón de que el agua que enfría a los tubos se encuentra a una temperatura mucho menor que la temperatura de saturación del vapor.

Durante los 10 o 15 primeros centímetros de recorrido del vapor, el condensado se queda adherido a las paredes de los tubos en forma de pequeñas gotas cuya fuerza de adherencia a las paredes del tubo es mayor que la fuerza de gravedad (V. fig. P3a). Sin embargo, llega un punto en el que se acumulan tantas gotas que la fuerza de gravedad vence su inercia y comienzan a escurrir hasta formar un pequeño río en la base del tubo como se puede ver en la figura 3Pb.



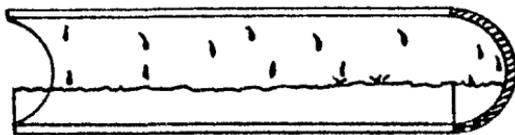
a



b

fig. P3

Entonces sucede lo que se denomina como flujo en dos fases. Tomando en cuenta que el calor se transfiere en las "frentes" de los sistemas, podemos ver que en el flujo en dos fases habrá dos distintos coeficientes de transferencia de calor; uno que se dará en la parte superior del tubo y otro que se dará en el pequeño "río" de condensados en la parte inferior del tubo. Es obvio pensar que el coeficiente de transferencia de la parte por la que fluye el vapor será - mucho mayor que aquel que se da en la parte en la que fluyen los condensados. Podemos entender mejor esto si vemos la siguiente figura:

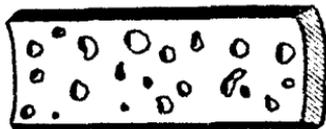


Corte longitudinal de un tubo con condensación y flujo estratificado.

fig. P4

En la parte superior del tubo el gradiente de temperatura entre el interior y el exterior del tubo es mucho mayor que en la parte inferior. Además, debido a que el agua es uno de los compuestos de la naturaleza cuya condensación se puede dar en gota o en película, el coeficiente de transferencia de calor puede verse incrementado por el hecho de que existan partes del tubo en las que el contacto entre el vapor y la pared del tubo es directo (V. fig. P5).

Sin embargo, lo mas frecuente es que el agua condense en forma de película. El líquido condensado forma entonces una capa continua que fluye sobre la superficie interna del tubo (fig. P6).



Vista interna de una sección de tubo.  
fig. P5

Esta capa de líquido interpuesta entre el vapor y la pared del tubo, es la que proporciona la mayor resistencia al flujo de calor y, por consiguiente, la que fija el valor del coeficiente de transmisión de calor.

La condensación en película ocurre en casi todos los procesos a nivel industrial. La condensación en gota, para el caso del vapor de agua, solo puede ser lograda bajo condiciones controladas mediante recubrimientos especiales en las paredes de los tubos o mediante ciertos aditivos en el vapor.



fig. P6

De este modo se va dando el proceso de transferencia de calor y condensación. Hay que hacer notar que, hasta ahora, no ha existido ningún cambio de temperatura en el interior de los tubos ya que el proceso de condensación, al igual que todo cambio de fase en sustancias puras, es isotérmico.

Ahora bien, todo lo anterior es cierto siempre y cuando la velocidad del vapor sea lo suficientemente baja como para no levantar por la base del tubo. De ser así, se puede dar lo que se llama flujo anular (fig. P7) en el que la velocidad del vapor es tal que todo el condensado se ve arrastrado por el vapor generándose, así, un flujo de vapor con gotas de condensado dispersas en el mismo. En estos casos, el cálculo del coeficiente de transferencia de calor tiene que ser calculado en otra forma.

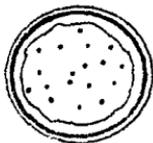


fig. P7

En este caso, entre mayor sea la velocidad del vapor, menor será el espesor de la capa de condensados adherida al interior del tubo y, por lo tanto, mayor será el coeficiente de transferencia de calor. Este efecto puede llegar a ser desconcertante para la realización de experimentos en los que se varía la carga de vapor.

Es en esta forma como se va dando el proceso de transferencia de calor cuando se realice alguna práctica en el aparato.

### Desarrollo de las ecuaciones del proceso

Los métodos de cálculo para condensadores se basan en una clara comprensión del proceso físico de transferencia de masa y de calor. Dicho proceso, como acabamos de ver, es sumamente complejo y, en el estado actual de desarrollo, los métodos prácticos de cálculo están basados en la burda consideración de que la transferencia de calor y de masa se ve impedida por una serie de resistencias, localizadas en varias capas. Dichas resistencias deben ser evaluadas individualmente y sumadas para obtener la resistencia total a la transferencia de calor.

Imaginemos el proceso de condensación como el siguiente diagrama:

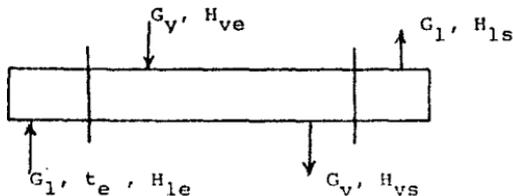


fig. P8

De aquí, podemos desarrollar el siguiente balance:

$$H_{1e} + H_{ve} = H_{1s} + H_{vs} + Q_p \dots\dots\dots 1$$

Si multiplicamos todas las entalpías por los respectivos gastos de líquido y vapor no alteramos la igualdad:

$$G_1 H_{1e} + G_v H_{ve} = G_1 H_{1s} + G_v H_{vs} + Q_p \dots\dots\dots 2$$

Reacomodando la expresión:

$$G_1 (H_{1e} + H_{1s}) = G_v (H_{vs} - H_{ve}) + Q_p \dots\dots\dots 3$$

Donde para el líquido:

$$H_{1e} = C_{p_{1e}} (t_e - t_o) \quad \Delta H = \bar{C}_p (t_s - t_e) \dots 4$$

$$H_{1s} = C_{p_{1s}} (t_s - t_o)$$

y para el vapor:

$$H_{ve} = C_{p_{tv}} (t_v - t_o) + \lambda_v$$

$$H_{vs} = C_{p_{tl}} (t_v - t_o) \quad \Delta H = \lambda_v \dots\dots\dots 5$$

Entonces la ecuación queda en la siguiente forma:

$$G_1 (C_p^- (t_s - t_e)) = G_v (\lambda_v) + Q_p \dots\dots\dots 6$$

Ahora podemos suponer, como ya dijimos, que la transferencia de calor del vapor condensante hacia el medio enfriante, se ve impedida por una serie de tres resistencias; concretamente las siguientes:

- 1) resistencia de la película de condensado (lado vapor)
- 2) resistencia del metal de la pared del tubo
- 3) resistencia de la película de flujo laminar (lado agua)

En el siguiente diagrama apreciamos dichas resistencias:

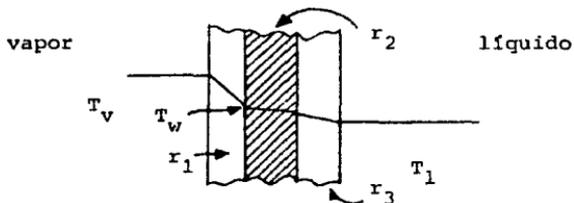


fig P9

Entonces, la resistencia total a la transferencia de calor, está dada por la suma de las tres resistencias parciales:

$$R = r_1 + r_2 + r_3 \quad \dots\dots\dots 7$$

Y las resistencias están dadas por el inverso del coeficiente de transferencia de calor:

$$r_1 = \frac{1}{h_1} \quad , \quad r_2 = \frac{1}{h_2} \quad , \quad \dots\dots \quad r_n = \frac{1}{h_n}$$

Entonces:

$$R = \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} + \dots\dots \frac{1}{h_n} \quad \dots\dots\dots 8$$

Y el coeficiente global de transferencia de calor estará dado por el inverso de la resistencia total como sigue:

$$U_o = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} + \dots \frac{1}{h_n}} \quad \dots\dots\dots 9$$

$U_o$  se refiere al coeficiente calculado en base a los datos en el exterior de los tubos; es decir, aquellas variables que han sido calculadas en base a los datos de area y diámetro interno de los tubos, deberán ser multiplicados por un factor que los corrija haciendolos equivalentes en area a los calculados en el area externa del tubo.

La segunda resistencia, es decir, la de la pared del tubo, generalmente se clacula simplemente utilizando el coeficiente de conductividad térmica del metal a la temperatura promedio del proceso que tambien debe ser multiplicado por una relación de areas.

De esta forma, la ecuación 9 se convierte en:

$$U_o = \frac{1}{\frac{1}{h_c D_i} + \frac{x}{k} \frac{D_o}{D_m} + \frac{1}{h_a}}$$

Donde  $D_o$ ,  $D_i$  y  $D_m$  son los diámetros exterior, interior y medio logarítmico del tubo.  $x$  es el espesor de la pared y  $k$  es el coeficiente de conductividad térmica del metal.

C) EJEMPLO DE CALCULO DE COEFICIENTES REAL Y TEORICO

---

1) Lectura de datos

Lado Coraza	Lado Tubos
$t_e = 18^\circ\text{C}$	$t_e = 110^\circ\text{C}$
$t_s = 60^\circ\text{C}$	$t_s = 55^\circ\text{C}$
$G_1 = 1 \text{ l/s}$	$G_v = 0.0833 \text{ l/s}$
	$P_e = 1.5 \text{ Kg/cm}^2$

2) Calculo de U real mediante la ecuación de Fourier

Tomaremos como base de calculo 1 segundo.

-Calculo del calor cedido por el vapor:

Q = gasto de vapor condensado (Kg/s) x calor latente (Kcal/Kg)

$$Q = G_v \times \lambda$$

Donde  $G = 0.0833 \text{ Kg/s}$

$$\lambda = 532.6 \text{ Kcal/Kg}$$

$$Q = 532 \text{ Kcal/kg} \times 0.0833 \text{ Kg/s} = 44.37 \text{ Kcal/s}$$

Despreciaremos el calor sensible cedido por el condensado en el proceso de subenfriamiento debido a que su magnitud es negligible.

-Calculo del calor ganado por el agua:

$$Q = C_p \times \Delta t \times G_1$$

Donde  $C_p = 1.08 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{C}$

$$\Delta t = t_s - t_e = 60^\circ\text{C} - 18^\circ\text{C} = 42^\circ\text{C}$$

$$G_1 = 1 \text{ l/s} = 1 \text{ Kg/s}$$

$$Q = 1.08 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{C} \times 1 \text{ Kg/s} \times 42^\circ\text{C} = 45.36 \text{ Kcal/s}$$

Con esto vemos que el calor cedido por el vapor es aproximadamente igual al calor ganado por el agua.

- Calculo del area disponible para la transferencia de calor

Area de un tubo =  $\pi$  x Diámetro externo x Longitud

Donde: Diámetro externo = 0.0127 m<sup>2</sup>

Longitud = 0.8 m

Area de un tubo = 0.0127 m x 0.8 m x  $\pi$  = 0.0319 m<sup>2</sup>

Area total = 21 tubos x 0.0319 m<sup>2</sup> = 0.67 m<sup>2</sup>

- Calculo del LMTD

$$LMTD = \frac{\Delta t_s - \Delta t_e}{LN \frac{\Delta t_s}{\Delta t_e}}$$

Donde  $t_e = 55^\circ\text{C} - 18^\circ\text{C} = 37^\circ\text{C}$

$t_s = 110^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C} = 50^\circ\text{C}$

$$LMTD = \frac{50^\circ\text{C} - 37^\circ\text{C}}{LN \frac{50^\circ\text{C}}{37^\circ\text{C}}} = 43.2^\circ\text{C}$$

- Calculo del coeficiente global U

$$U = \frac{Q}{A \times LMTD}$$

Donde  $Q = 44.36 \text{ Kcal/s}$

$A = 0.67 \text{ m}^2$

$LMTD = 30.6^\circ\text{C}$

$$U = \frac{44.36 \text{ Kcal/s}}{0.67 \text{ m}^2 (43.2^\circ\text{C})} = 1.53 \text{ Kcal/m}^2\text{ }^\circ\text{C s} \times \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ Hr}} = 5,522$$

$U = 5,522 \text{ Kcal/m}^2\text{ }^\circ\text{C Hr}$

## 3) Calculo de U teórica

-Calculo del coeficiente en la película de condensados

Para calcular dicho coeficiente, podemos usar la modificación que Kern ha hecho de la ecuación de Nusselt para tubos horizontales:

$$h_c = 0.761 \left( \frac{L \times K_1 \times \rho_1 (\rho_1 - \rho_v) \times g}{M \times \nu_1} \right)^{1/3}$$

Donde  $K_1$  es la conductividad térmica de la película de condensado.

Supondremos, para efectos prácticos, una temperatura promedio de película de:

$$\frac{100^\circ\text{C} + 50^\circ\text{C}}{2} = 75^\circ\text{C}$$

A esta temperatura, la conductividad térmica del agua es de

$$1.48 \text{ Kcal/Hr m}^2 (\text{°C/m})$$

Las densidades son las siguientes:

$$\rho_1 = 1000 \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho_v = 0.8 \text{ Kg/m}^3$$

$$\Delta t = t_{\text{sat}} - t_p$$

$$t_{\text{sat}} = 110^\circ\text{C}$$

Para la temperatura de la película, haremos un promedio aritmético entre la temperatura que suponemos tiene la película a la entrada y a la salida del condensador.

Supondremos que:

$$t_{p1} = 100^\circ\text{C} \quad \text{y} \quad t_{p2} = 40^\circ\text{C}$$

$$\text{De modo que } t_p = \frac{100^\circ\text{C} + 40^\circ\text{C}}{2} = 70^\circ\text{C}$$

El diámetro de los tubos es:

$$D_i = 1.07 \text{ cm} = .0107 \text{ m}$$

La viscosidad del líquido es:

$$\mu_1 \text{ a } 100 \text{ }^\circ\text{C} = 0.97 \text{ Kg/Hr m}$$

$$\mu_1 \text{ a } 40 \text{ }^\circ\text{C} = 2.63 \text{ Kg/Hr m}$$

Haciendo un promedio aritmetico para que el dato sea válido a todo lo largo del intercambiador:

$$\mu_1 = \frac{0.97 \text{ Kg/Hr m} + 2.63 \text{ Kg/Hr m}}{2} = 1.8 \text{ Kg/Hr m}$$

La fuerza de gravedad es la siguiente:

$$g = 127,202,400 \text{ m/Hr}^2$$

L es la longitud total del area de transferencia de calor

$$L = 0.8 \text{ m}$$

M es la masa de vapor condensada en un solo tubo

$$M = 0.0833 \text{ Kg/s} \times 1/21 \text{ tubos} \times 3600 \text{ s/1 Hr} = 14.28 \text{ Kg/Hr}$$

Finalmente aplicamos la ecuación de Nusselt modificada por Kern:

$$h_c = 0.761 \left( \frac{0.8(1.48) 1000(1000-0.8) 127,202,400}{14.28(1.8)} \right)^{1/3}$$

$$h_c = 17,760 \text{ Kcal/m}^2\text{ }^\circ\text{C Hr}$$

-Calculo del coeficiente del agua de enfriamiento (por fuera de los tubos)

Para calcular este coeficiente, utilizaremos el método de Bell. Lo primero que debemos conocer es el Número de Reynolds.

$$N_{Re} = \frac{D_i \times G}{\nu \times S}$$

Donde  $D_i$  es el diámetro interno de la coraza:

$$D_i = 0.105 \text{ m}$$

$G$  es el gasto de agua expresado en Kg/Hr

$$G = 1 \text{ lt/s} = 3600 \text{ Kg/Hr}$$

$\nu$  es una viscosidad calculada a una temperatura promedio de:

$$t_p = \frac{18^\circ\text{C} + 60^\circ\text{C}}{2} = 39^\circ\text{C}$$

La viscosidad del agua a esta temperatura es de:

$$\nu = 2.63 \text{ Kg/Hr m}$$

Por ultimo, el area seccional de flujo (perpendicular a los tubos) está dada por la siguiente ecuación que toma en cuenta la distribución cuadrada de los tubos:

$$S = ESP \left( D_i - D_{man} + \frac{D_{man} - D}{p} (p - D) \right)$$

Donde ESP es el espacio entre baffles: 0.08 m

$D_i$  es el diámetro interno de la coraza: 0.105 m

$D_{haz}$  es el diámetro externo del haz de tubos:

$$D_{haz} = 0.105 \text{ m} - 0.0127 \text{ m} = 0.0923 \text{ m}$$

D es el diámetro externo de los tubos: 0.0127 m

p es la distancia centro a centro de los tubos:

$$p = 0.016 \text{ m}$$

De modo que:

$$S = 0.08(0.105 - 0.0923) + \frac{0.0923 - 0.0127}{0.016} (0.016 - 0.0127)$$

$$S = 0.0023 \text{ m}^2$$

Entonces el Número de Reynolds estará dado por:

$$N_{Re} = \frac{(0.0127) 3600}{2.63(0.0023)} = 7,558$$

Utilizando el factor de correlación  $J_k^*$  leído de un diagrama a partir del Número de Reynolds:

$$J_k = 0.01$$

Con esto podemos calcular el coeficiente de transferencia de calor  $h_a$  para un banco de tubos en condiciones ideales, es decir, sin tomar en cuenta las fugas de agua que pasan por los claros que quedan entre los tubos y los bafles y entre la coraza y los bafles:

$$h_a = J_k \times C_p \times \frac{K_1}{S} (K_1 / C_p \times \mu)^{2/3} (\mu / \mu_p)^{0.14}$$

Donde  $K_1$  es la conductividad térmica del agua a 39°C:

$$K_1 = 1.43 \text{ Kcal/Hr m } (^\circ\text{C/m})$$

es la viscosidad a la misma temperatura:

$$= 2.63 \text{ Kg/Hr m}$$

\* Perry & Chilton, Chemical Engineer's Handbook, New York 1973 pag 10-27 fig. 10-19

y  $\mu_p$  es la viscosidad a la temperatura promedio de la película mas cercana a las paredes de los tubos. Asumiremos que esta temperatura es  $10^\circ\text{C}$  menor a la temperatura promedio de la película de condensado.

$$t_{pp} = 80^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C} = 70^\circ\text{C}$$

La viscosidad a esta temperatura es de:

$$\mu_p = 1.6 \text{ Kg/Hr m}$$

De modo que:

$$h_a = 0.01 \times 1 \times (3,600/0.0023) \times (1.43/(1 \times 2.63))^{2/3} \times (2.63/1.6)^{0.14}$$

$$h_a = 11,178 \text{ Kcal/Hr m } ^\circ\text{C}$$

Este resultado, como mencionabamos anteriormente, es un coeficiente que no toma en cuenta las fugas de agua que pasan entre tubos-coraza y coraza-mamparas. Estas fugas hacen que la transferencia de calor sea menor. Por lo tanto, es coeficiente que hemos obtenido,  $h_a$ , debe ser corregido mediante una serie de factores\* de corrección en los que se consideran dichas fugas. Estos factores se obtienen en forma gráfica y son los siguientes:

$J_c$  = Factor de corrección por efectos de la configuración de las mamparas.  $J_c = 1.06$

$J_1$  = Factor de corrección por fugas por espacios entre tubos y mamparas.  $J_1 = 0.65$

$J_b$  = Factor de corrección por fugas por espacios entre mamparas y coraza.  $J_b = 0.57$

Entonces, el coeficiente de transferencia real se reduce a:

\* Perry & Chilton, Chemical Engineer's Handbook, New York, 1973 pag 10-28

$$h_a = 11,178 \times 1.06 \times 0.65 \times 0.57 = 4,390 \text{ Kcal/Hr m } ^\circ\text{C}$$

Ahora finalmente ya tenemos los dos coeficientes necesarios para calcular el coeficiente global de transferencia de calor  $U_o$ . Para esto, supondremos que la resistencia de la pared del tubo es despreciable debido a la alta conductividad térmica del cobre.

$$\frac{1}{U_o} = \frac{1}{17,760} \times \frac{1.27}{1.07} + \frac{1}{4,390}$$

relación de diámetros  
tros

$$U_o = 3,520 \text{ Kcal/ Hr m}^2\text{ }^\circ\text{C}$$

De este modo, podemos ver que existen diferencias notables entre los coeficientes calculados en forma teórica y en forma práctica:

$$U_{\text{teórica}} = 3,520 \text{ Kcal/Hr m}^2\text{ }^\circ\text{C}$$

$$U_{\text{práctica}} = 5,522 \text{ Kcal/Hr m}^2\text{ }^\circ\text{C}$$

Esta diferencia puede deberse a las siguientes razones:

- los métodos de cálculo sencillos, como el que usamos aquí, no tienen una gran exactitud
- los instrumentos de medición en el intercambiador no son de gran precisión
- pueden existir errores de apreciación al tomar las lecturas durante la práctica.

Nota: para el cálculo de  $h_c$  supusimos que el flujo de vapor condensante es controlado por la gravedad debido a que la carga de vapor es relativamente pequeña.

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

d) TECNICA DE LA PRACTICA

El procedimiento a seguir, después de haber llevado a cabo los procedimientos previos a las prácticas mencionadas anteriormente, es éste:

- 1) Permitir que el agua comience a fluir por el intercambiador. Esperar a que se llene la coraza y fijar el gasto en 200 l/Hr. mediante alguno de los procedimientos ya mencionados.
- 2) Cuando el flujo de agua se ha estabilizado, abrir la válvula para permitir el paso del vapor por dentro de los tubos. Hacerlo lentamente hasta que quede completamente abierta.
- 3) Regular la presión de vapor mediante la válvula reguladora sobre la tubería. Fijar dicha presión en 2 Kg/cm<sup>2</sup> y dejar pasar vapor 10 o 15 minutos para que el sistema logre estabilizarse.
- 4) Tomar las lecturas de temperatura, gasto de agua y gasto de condensado. Para tomar el gasto de condensado, se debe recolectar en un recipiente de volumen conocido una cantidad suficientemente grande como para evitar errores de apreciación.
- 5) Proceder a variar el gasto de agua de enfriamiento a 250, 300 y 350 lt/Hr. para obtener un perfil de comportamiento del equipo.
- 6) Cerrar el suministro de vapor, permitiendo que el agua de enfriamiento continúe circulando con el fin de enfriar el aparato.
- 7) De ser posible, desarmar el intercambiador con el fin de eliminar el agua condensada que queda atrapada en algunas partes ya que el intercambiador tiene algunas piezas, como la coraza, que no están construídas en materiales inoxidables.

e) TRABAJO POSTERIOR A LA PRACTICA

- 1) Para cada corrida, se deberá hacer un cálculo de  $U$  experimental. (A partir de la ecuación  $Q = UALMTD$ ).
- 2) De igual forma, calcular la  $U$  en forma teórica utilizando los métodos mencionados anteriormente. Comparar  $U$  teórica contra  $U$  experimental para ver qué tan significativas son las diferencias. De ser muy significativas, proponer causas y sacar una conclusión.
- 3) Detectar en qué momento sucedió la transición de flujo estratificado a flujo anular utilizando los parámetros de Taitel y Duckler y de Martinelli.
- 4) Calcular el Número de Reynolds del lado de la coraza en cada uno de los distintos flujos mediante el método de Bell. Hacer una gráfica de  $U$  experimental contra Número de Reynolds. Estudiar la gráfica y explicar su fórmula basándose en la idea física del proceso y no en los procesos matemáticos.
- 5) Elaborar conclusiones.

f) CUESTIONARIO

- 1) Explique por qué se transfiere el calor.
- 2) ¿A qué se llama intercambiador de calor?
- 3) Mencione 3 tipos de intercambiadores de calor y explique en qué casos es común que se utilicen los mismos.
- 4) Indique gráficamente la variación de las temperaturas de los fluidos frío y caliente con respecto a la distancia para el caso de un condensador como el que se usó en la realización de la práctica.
- 5) Por qué la teoría de Nusselt no proporciona una solución completa a los cálculos que deben llevarse a cabo en un condensador como el de la práctica?
- 6) Mencione algunos casos en los que se utilicen condensa-

dores horizontales y diga por qué.

- 7) Mencione alguna mejora que se le ocurra para el mejor funcionamiento del condensador y de las prácticas.
- 8) Por lo general, ¿ entre qué valores deben estar comprendidos los coeficientes globales de transferencia de calor para el sistema agua-vapor de agua.
- 9) Mencione qué tipo de transferencia de calor se lleva a cabo en el interior de un horno de microondas.
- 10) Los habitantes de los desiertos más áridos del planeta utilizan gorros y abrigo de piel durante los días más calientes y soleados del año. Explique, en términos de transferencia de calor, por qué lo hacen.

## CONCLUSIONES

El aparato resultó tener las dimensiones y la capacidad adecuadas para el uso al que será destinado.

En cuanto a la instrumentación, los termómetros y el manómetro funcionan bien. Sin embargo, el rotámetro no funcionó con la precisión que se esperaba debido a las dificultades que se presentaron con los materiales en los que fue construido. El diseño y la idea en la que está basado el sistema de medición de dicho rotámetro parece ser bueno, pero los problemas que se han presentado no permiten que las piezas internas del instrumento se muevan con libertad. Por ejemplo, la bala que tiene la finalidad de medir el flujo, a pesar de haber sido torneada en latón, se ha cubierto de un depósito de color oscuro que la hace atorarse en el tubo de vidrio por el que habría de correr con absoluta libertad. Además, la válvula que fue colocada - con el fin de poder calibrar el instrumento es una válvula de tipo convencional que no resultó tener la precisión requerida para llevar a cabo una calibración exacta. Todo esto se agrava con el hecho de que la presión del agua de enfriamiento con la que se alimenta el intercambiador es muy variable con lo que resulta un poco tardado llegar a tener un flujo de agua estable y de cantidad conocida.

En cuanto a los materiales, estos han demostrado ser los más adecuados para el servicio que ha de dar el aparato y para el presupuesto con el que se contaba. En el tiempo en el que el aparato ha estado instalado en el laboratorio (1 año), no se ha presentado corrosión considerable. Fue muy acertado poner tornillos de acero inoxidable a pesar de que fueron muy caros ya que estos no han sufrido ningún deterioro y el aparato puede ser fácilmente desmontable en cualquier momento.

En lo que se refiere a las juntas, es evidente que éstas resultaron ser el punto débil del intercambiador. Sobre todo la junta que sella el espejo chico contra la ceja de la brida del cabezal de alimentación de vapor (fig. P1). Esta junta es crítica ya que, como se menciona en el capítulo IV, recibe toda la presión del vapor y solo dispone de la fuerza de cierre de los ocho tornillos de las bridas. Originalmente esta junta fue hecha de asbesto en un espesor muy pequeño (0.16 cm.) pero no fue suficiente el sello que proporcionaba y el vapor se mezclaba con el fluido de la coraza. El espesor se aumentó a 0.32 cm. y se hizo en neopreno, con lo que se pudo obtener un sello aceptable.

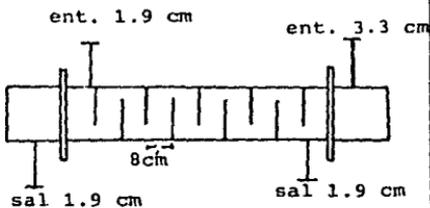
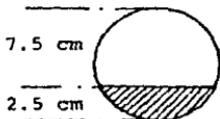
Finalmente, pienso que, en general, el aparato satisface ampliamente con los fines para los que fue diseñado. Obviamente, tiene ciertas limitaciones en su instrumentación que no pudieron ser evitadas por cuestiones del presupuesto con el que se contaba. Sin embargo, comprar un intercambiador de características similares hubiera costado seis veces mas sin contar la instrumentación que hubiera seguido siendo la limitante.

APENDICE I

HOJA DE DATOS DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBOS Y CORAZA		
DATOS DE DISEÑO		
DATO	Lado Coraza	Lado Tubos
Fluido	Agua	Vapor de Agua
Gasto	Variable	Variable
Temp. entrada	18°C	Variable
Temp. salida	Variable	Variable
DATOS DE CONSTRUCCION		
<b>TUBOS</b> Diámetro externo: 1.27 cm Diámetro interno: 1.07 cm Material: cobre Número 21 Longitud efectiva: 80 cm		
<b>CORAZA</b> Diámetro interno: 10.16 cm Material: hierro niquelado Tipo: E, con un solo paso		
<b>BAFLES</b> Corte: 25% del diámetro de la coraza Material: latón Espesor: 0.32 cm Numero: 9 Espaciamiento: 8 cm		
<b>CABEZALES</b> Diámetro interno: 10.16 cm, con tapas planas Material: hierro niquelado		
<b>CONEXIONES</b> Coraza: entrada 1.9 cm salida 1.9 cm roscadas Cabezales: entrada 3.3 cm salida 1.9 cm roscadas		
<b>OTROS DATOS</b> Pitch: 1.6 cm Tipo de Unidad: de espejo removible Presión máxima de operación: 5 Kg/cm <sup>2</sup> Temperatura máxima de operación: 180°C en el vapor		
<b>CLAROS DIAMETRALES</b> Baffles-Coraza: 0.32cm Haz de tubos-Coraza 1.27 cm Tubos-Orificios de Baffles: 0.08 cm		

HOJA DE DATOS DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBOS Y CORAZA

Los baffles están colocados con el corte en posición horizontal y el corte es de 25% del diámetro.



## APENDICE II

### CALCULOS DE RESISTENCIA MECANICA

Sabemos que la tensión en la dirección tangencial de un cilindro es:

$$\tau_t = \frac{P r}{h}$$

$$P = \frac{\tau_t h}{r}$$

Donde:

P = presión interna

r = radio interno

h = espesor de la pared

a) Coraza:

Tomaremos como la tensión permisible para el hierro  
= 2100 kgf/cm<sup>2</sup>

$$P = \frac{2100 \text{ kgf/cm}^2 (0.4 \text{ cm})}{5 \text{ cm}} = 168 \text{ kgf/cm}^2$$

Por lo tanto la coraza soportará una presión máxima de  
168 kgf/cm<sup>2</sup>

b) Tubos:

Tomaremos = 2040 kgf/cm<sup>2</sup> para el cobre

$$P = \frac{2040 \text{ kgf/cm}^2 (0.1 \text{ cm})}{0.53 \text{ cm}} = 385 \text{ kgf/cm}^2$$

Por lo tanto, los tubos tendrán una resistencia a presiones no mayores a  $385 \text{ kgf/cm}^2$

c) Soldaduras:

Longitud de la soldadura  $D = 5.1416 (10.16 \text{ cm}) = 31.2 \text{ cm}$

Sección de la soldadura (V. fig. A2) =  $31.2 (0.3) = 9.36 \text{ cm}$   
Del código de soldaduras por fusión. La tensión de trabajo admisible es de  $910 \text{ kgf/cm}^2$

Entonces, la unión soporta  $910 \text{ kgf/cm}^2 (9.36 \text{ cm}) = 8,517 \text{ kgf/cm}$  de tracción.

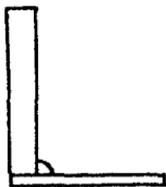


fig.A2 Sección transversal del cordón de soldadura

### APENDICE III

#### a) Variables

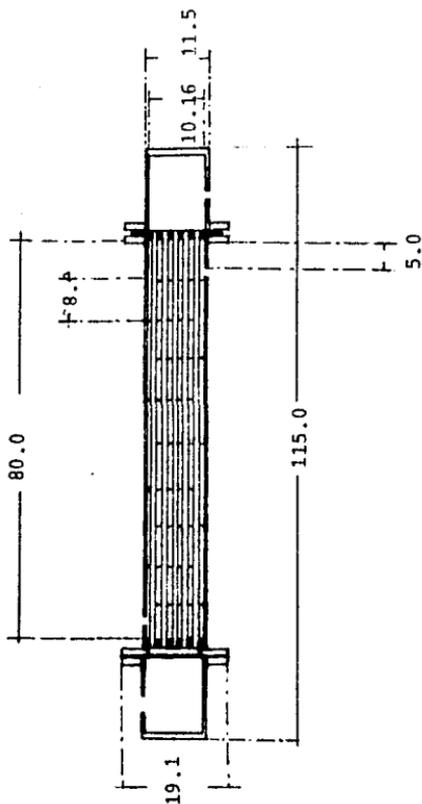
- T = Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )  
Q = flujo de calor (Kcal/S)  
h = coeficiente individual de transferencia de calor  
KCal/ $\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}\text{Hr}$   
A = área ( $\text{m}^2$ )  
U = coeficiente global de transferencia de calor KCal/ $\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}\text{Hr}$   
Cp = capacidad calorífica KCal/ $\text{kg}^{\circ}\text{C}$   
 $\rho$  = densidad ( $\text{kgf}/\text{m}^3$ )  
 $\mu$  = viscosidad dinámica (kgf/Hrm)  
 $\tau$  = esfuerzo cortante kgf/ $\text{cm}^2$   
G = Gasto (L/S)  
 $\lambda$  = Calor latente (KCal/kg)

#### b) Subíndices

- w = pared del tubo  
c = condensado  
m = medio  
T = total  
v = vapor  
e = entrada  
s = salida

APENDICE IV

DIMENSIONES FINALES DEL INTERCAMBIADOR (cm)



## BIBLIOGRAFIA

### I Fuentes Primarias

- 1) Donald Q. Kern  
Process Heat Transfer  
Mc. Graw-Hill  
New York 1950
- 2) Frank Kreith  
Principles of Heat Transfer  
Mc. Graw-Hill  
New York 1973
- 3) Welty J.R. et al.  
Fundamentos de Transferencia de Momento Calor y Masa  
Editorial LIMUSA  
México 1982
- 4) Foust A.S. et al.  
Principios de Operaciones Unitarias  
Cía. Editorial Continental, S.A. de C.V.  
México 1982
- 5) Engineering Division, Crane Company  
Flow of Fluids through Valve, Fittings and Pipes  
Chicago 1981
- 6) Perry Robert H., Chilton Cecil H.  
Chemical Engineer's Handbook  
Mc. Graw-Hill  
New York 1973
- 7) Rohsenow & Hartnett  
Handbook of Heat Transfer  
Mc. Graw-Hill
- 8) Chisholm D.  
Developments in Heat Exchanger Technology  
London 1980

## II Fuentes Secundarias

- a) Krishna R. & Standart G.L.A.  
A Multicomponent film model incorporating a general matrix method of solution to the Maxwell-Stefan equations A.I. Ch. E. J.  
1976, 22(2), 383
  
- b) Jaster, H & Kosky P.G.  
Condensation Heat Transfer in a Mixed Flow Regime  
Int. J. Heat Transfer  
1976, 19, 95-99
  
- c) Shreir L.L.  
Principles of Corrosion and Oxidation  
George Newnex Limited  
Londres 1963