

# COEFICIENTE TOTAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN CAMBIADOR DE CALOR DE CORAZA Y TUBOS

FACULTAD DE QUÍMICA UNAM LABORATORIO DE INGENIERIA QUÍMICA

## OBJETIVO

El alumno aprenderá a obtener experimentalmente una correlación que permita estimar el coeficiente individual de transferencia de calor externo en un cambiador de calor de coraza y tubos.

## CONCEPTOS QUE DEBEN DISCUTIRSE DURANTE LA SESIÓN

### I. CARACTERÍSTICAS

Cuando en la industria se requiere una superficie de transferencia alta, el cambiador de calor por excelencia mas empleado es el de coraza y tubos. En la figura 1 se ilustra un cambiador de este tipo de un solo paso, en el , el fluido que fluye a través de los tubos entra al cabezal en donde se distribuye a través del banco de tubos siguiendo un flujo paralelo, y deja a la unidad a través del otro cabezal, para mejorar la transferencia de calor del fluido que va por los tubos se ponen desviadores de flujo en los cabezales tal que permiten que el fluido regrese al interior del cambiador repetidamente, el número de pasos del fluido por los tubos depende de factores económicos del diseño, de la operación y del espacio disponible.

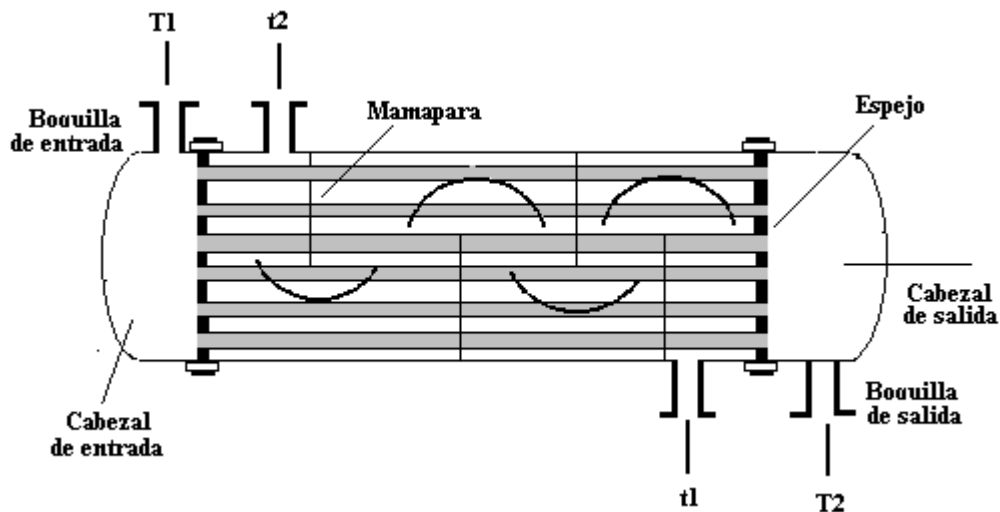
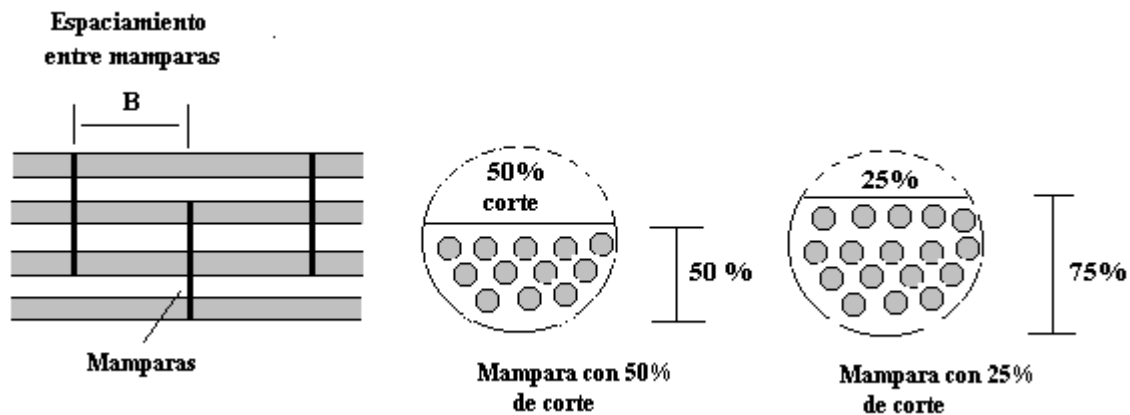


FIGURA 1  
CAMBIADOR DE CALOR DE  
CORAZA Y TUBOS DE UN SOLO PASO

El fluido externo o el que va por la coraza se alimenta por medio de boquillas tal que el fluido entra en dirección perpendicular a la dirección de los tubos y se distribuye a lo largo del cambiador en una forma de **S** debido a la presencia de mamparas que entre otras funciones se encuentran las siguientes:

1. Dar soporte a los tubos en un posición vertical.
2. Evitar la vibración de los tubos debido a la alta turbulencia causada por el fluido que va por la coraza.
3. Guiar al fluido que va por la coraza en dirección transversal en relación al banco de tubos, incrementando su velocidad y por lo tanto su coeficiente de transferencia de calor.

Hay varios tipos de deflectores o mamparas que se emplean en el diseño de los cambiadores de calor, pero los más comunes son los deflectores segmentados como se muestra en la figura 2, estos, son hojas de metal perforadas cuyas alturas son generalmente un 75 % del diámetro interior de la coraza y se conocen como deflectores o mamparas con 25% de corte. El corte puede variar dependiendo del cambiador de calor o las características viscosas del fluido que va por la coraza, como es el caso del módulo de cambiadores de calor del laboratorio de ingeniería química que presentan deflectores con un 50% de corte.



**FIGURA 2**

**DISTRIBUCIÓN DEL FLUIDO QUE VA POR LA CORAZA  
POR EFECTO DE LA PRESENCIA DE DEFLECTORES**

**II. COEFICIENTE TOTAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR**

La expresión del coeficiente total de transferencia de calor es igual para todos los cambiadores de calor y está dada por

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{io}} + R_{di} \left( \frac{A_o}{A_i} \right) + \frac{X_w}{K_w} \left( \frac{A_o}{A_{wm}} \right) + R_{do} + \frac{1}{h_o}} \quad \text{Ec.1}$$

### III. COEFICIENTES INDIVIDUALES DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Debido a las diferencias físicas en relación al cambiador de tubos concéntricos , la evaluación de los coeficientes individuales  $h_i$  y  $h_o$  resulta ser ligeramente diferente.

#### A) INTERIOR DE TUBOS

Para evaluar el coeficiente de transferencia de calor se pueden ocupar las correlaciones que para cambiadores de tubos concéntricos

##### Para régimen laminar ( $Re < 2100$ )

Ec. de Sieder y Tate

$$Nu_i = \frac{h_i d_i}{k_i} = 1.86 \left[ \left( \frac{d_i G_t}{\mu_i} \right) \left( \frac{Cp_i \mu_i}{k_i} \right) \left( \frac{d_i}{L} \right) \right]^{0.33} \left( \frac{\mu_i}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad \text{Ec.2}$$

##### Para régimen transicional ( $2100 < Re < 10,000$ )

$$Nu_i = \frac{h_i d_i}{k_i} = 0.116 \left[ \left( \frac{d_i G_t}{\mu_i} \right)^{\frac{2}{3}} - 125 \right] \left( \frac{Cp_i \mu_i}{k_i} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{\mu_i}{\mu_w} \right)^{0.14} \left[ 1 + \left( \frac{d_i}{L} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \quad \text{Ec.3}$$

##### Para régimen turbulento ( $Re > 10,000$ )

Ec. de Sieder y Tate

$$Nu_i = \frac{h_i d_i}{k_i} = 0.027 \left( \frac{d_i G_t}{\mu_i} \right)^{0.8} \left( \frac{Cp_i \mu_i}{k_i} \right)^{0.33} \left( \frac{\mu_i}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad \text{Ec.4}$$

Donde la masa velocidad del fluido que va por los tubos está dada por:

$$G_t = \frac{W_t}{a_t} = \frac{\text{Gasto másico del fluido que va por los tubos}}{\text{área de flujo por los tubos}} \quad \text{Ec.5}$$

y el área de flujo por los tubos se calcula como :

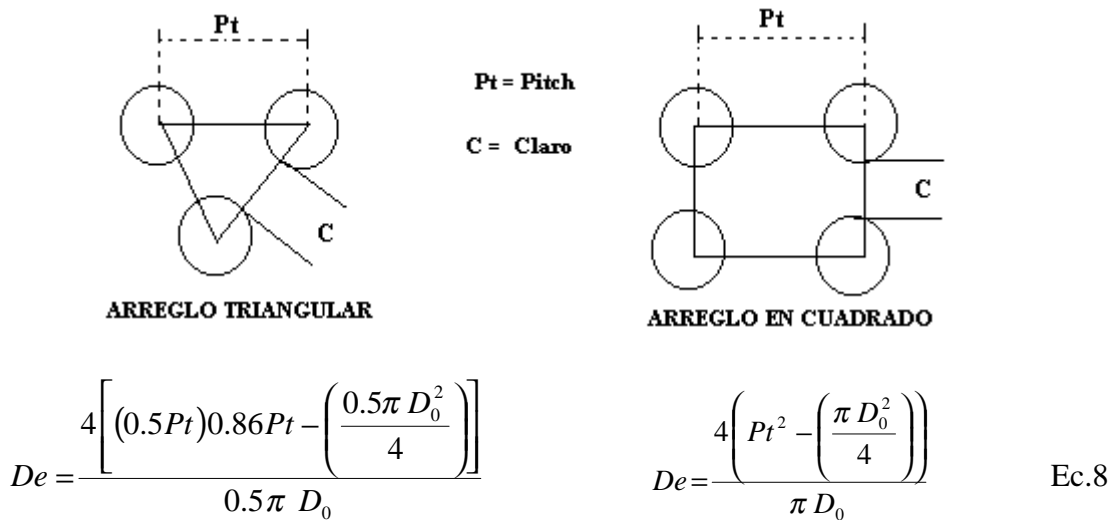
$$a_t = \frac{N_t a_f}{N} \quad \text{Ec.6}$$

**B) LADO DE LA CORAZA**

La información para evaluar el coeficiente del lado de la coraza aún está muy restringida. Kern propone una correlación para amplio rango de número de Reynolds que oscila entre 2000 y 1,000,000.

$$Nu = \frac{h_o De}{k} = 0.36 \left( \frac{De G_s}{\mu} \right)^{0.55} \left( \frac{Cp \mu}{k} \right)^{0.33} \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad \text{Ec.7}$$

El diámetro equivalente  $De$  debe estimarse de acuerdo al arreglo que tiene la tubería dentro de la coraza, la figura 3 muestra dos de los arreglos mas comunes usados en el diseño de cambiadores de calor



La masa velocidad del lado de la coraza  $G_s$  se puede calcular como:

$$G_s = \frac{\text{Gasto másico que va por la coraza}}{\text{Área de flujo por la coraza}} = \frac{W_s}{a_s} \quad \text{Ec.9}$$

Mientras que el área de flujo por la coraza estará determinada por :

$$a_s = \frac{D_s C B}{P t} \quad \text{Ec.10}$$

El rango de aplicación de la ecuación 7 , prácticamente abarca la mayoría de regimenes de flujo en los que puede operar un cambiador de calor convencional, sin embargo únicamente es aplicable para cambiadores de calor con deflectores con 25% de corte. La aplicación de esta condición debe respetarse estrictamente ya que puede conducir a considerables errores en la estimación del coeficiente del lado de la coraza  $h_o$  .

#### IV DIFERENCIA DE TEMPERATURA MEDIA LOGARÍTMICA

En los cambiadores de calor de coraza y tubos suele presentarse mas de un paso por los tubos, lo que ocasiona que se rompa el arreglo contracorriente o paralelo puro como se aprendió en la practica anterior , por lo que si se trata de un cambiador con más de un paso de cualquiera de los dos fluidos , la aplicación de las ecuaciones convencionales para evaluar la diferencia de temperaturas media logarítmica resulta un error.

Bowman , Mueller y Tagle ( ) han propuesto para cambiadores de calor con mas de un paso, una corrección  $F_t$  a la diferencia de temperaturas media logarítmica en contracorriente , tal que el calor intercambiado puede estimarse como :

$$Q = U A F_t \left[ \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \left( \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)} \right)} \right] \quad \text{Ec.11}$$

Para un cambiador de calor con un paso por la coraza y dos pasos por los tubos el factor de corrección  $F_t$  puede estimarse a partir de la siguiente relación :

$$F_t = \frac{\sqrt{R^2 + 1} \ln \left( \frac{(1 - S)}{1 - RS} \right)}{(R - 1) \ln \left[ \frac{2 - S \left( R + 1 - \sqrt{R^2 + 1} \right)}{2 - S \left( R + 1 + \sqrt{R^2 + 1} \right)} \right]} \quad \text{Ec.12}$$

Siendo :

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \quad \text{y} \quad S = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$$

Es importante aclarar que si se trata de un cambiador de calor con un paso por coraza y un paso por los tubos, el factor de corrección  $F_t$  toma el valor de 1.

## **EQUIPO EXPERIMENTAL**

El equipo experimental con que cuenta el laboratorio se puede observar en la Figura 4, es un modulo de transferencia de calor diseñado especialmente para la enseñanza, que consta de las siguientes partes:

3 intercambiadores de calor de coraza y tubos, de los cuales uno de ellos está construido con tubos de cobre y los dos restantes con tubos de acero inoxidable, la coraza en todos los cambiadores está hecha de vidrio para permitir ver con claridad la distribución del fluido que va por la coraza.

1 intercambiador de placas con una superficie de calentamiento de  $0.1 \text{ m}^2$  construida de acero inoxidable.

Todos intercambiadores de coraza y tubos pueden conectarse en contracorriente o en paralelo , con la posibilidad de colocar el fluido caliente o frío por dentro o por fuera de tubos , a partir de mangueras desconectables según la decisión del arreglo.

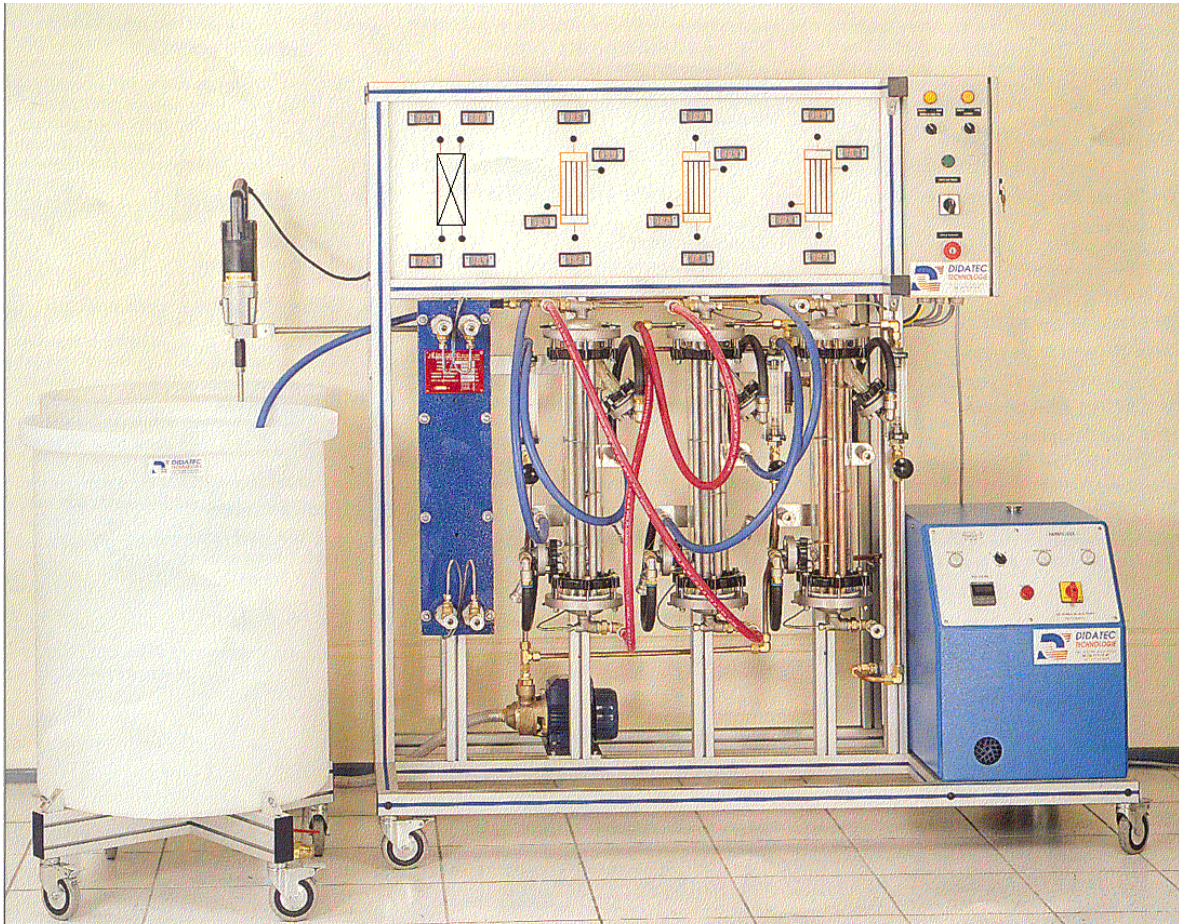
1 Termorregulador para suministrar agua caliente, tiene una potencia de calefacción de 4 Kw, con una temperatura máxima de calentamiento de  $95 \text{ }^\circ\text{C}$  ; El agua caliente se distribuye con una bomba centrífuga de 0.37 KW con una capacidad máxima de suministro del fluido de  $1.5 \text{ m}^3/\text{h}$  .

1 Sensor y 1 controlador de temperaturas que permiten programar la temperatura de suministro del agua caliente con la que trabajará el cambiador.

1 Bomba de suministro de agua fría con una potencia de 0.37 Kw y una capacidad máxima de suministro de agua de  $1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ .

4 Tanques de almacenamiento o preparación de soluciones, cada tanque tiene una capacidad de 200 l y está provisto de ruedas que permiten su transporte hacia la zona mas conveniente para su desalojo.

1 Tablero con 16 termopares para registro de las temperaturas de las corrientes caliente y fría de entrada y de salida.



**FIGURA 4**

**MODULO DE TRANSFERENCIA DE CALOR**

**ACTIVIDAD EXPERIMENTAL**

1. El equipo con el que se realizará la práctica puede ser el cambiador I, II o III
2. Alinear al cambiador de calor en contracorriente , de tal manera que el fluido caliente entre por la parte interna de los tubos y el fluido frío por el lado de la coraza.
3. En el calentador de agua , programe una temperatura del agua caliente de  $65^{\circ}\text{C}$  y fije con el rotámetro un gasto del agua caliente de 15 lpm, el cual deberá permanecer constante a lo largo de toda la experimentación.
4. Con el rotámetro que regula el gasto del agua fría, fije el gasto mas bajo que se indica en la tabla 1 , registre las cuatro temperaturas y realice el balance de energía en el cambiador, no continúe con el siguiente paso hasta que este balance se cumpla con un error menor al 10%.

5. Repita la operación del punto anterior para los siguientes gastos del fluido frío indicados en la tabla 1.
6. Calcule el coeficiente total de transferencia de calor para cada una de las tres corridas empleando la ecuación 11 y regístrelo en la tabla 2.
7. Estime el valor del coeficiente individual de transferencia de calor hio, ocupando las ecuaciones 2,3 o 4 ,teniendo en cuenta el régimen de flujo en el que se encuentra el gasto del fluido caliente que se fijó anteriormente, regístrelo en la tabla 2.

## ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO

CONCEPTO	SISTEMA INGLES	SISTEMA INTERNACIONAL
LONGITUD DE LOS TUBOS	1.875 ft	0.5715 m
NO. DE TUBOS	6	6
NO. DE MAMPARAS Y CORTE	4 mamparas Con 50 % de corte	4 mamparas Con 50 % de corte
DISTANCIA ENTRE MAMPARAS	B = 0.3772 ft	B = 0.115 m
DIÁMETRO INTERNO Y EXTERNO DE LOS TUBOS	Di = 0.03645 ft Do = 0.04592 ft	Di = 0.01110996 m Do = 0.0139964 m
DIÁMETRO INTERNO DE LA CORAZA	D <sub>s</sub> = 0.2591 ft	D <sub>s</sub> = 0.079 m
MATERIAL DE LOS TUBOS	Acero inoxidable	Acero inoxidable
ARREGLO DE LOS TUBOS	Triangular	Triangular
PITCH	0.08854 ft	0.02698 m
CLARO	0.03645 ft	0.0111125 m



## TRABAJO POSTERIOR A LA PRÁCTICA

1. Empleando el modelo teórico del coeficiente total de transferencia de calor dado por la ecuación 1, sustituya en ella el valor de coeficiente total de transferencia de calor experimental y despeje el coeficiente parcial  $h_o$  para las tres corridas experimentales, para esto puede considerar que las resistencias por incrustación son despreciables.
2. Para obtener una correlación que permita obtener el coeficiente de transferencia de calor del lado de la coraza  $h_o$ , será necesario ocupar el esquema de la ecuación 7 de la siguiente manera:

$$Nu = \frac{h_o De}{k} = a Re^b Pr^c$$

de manera que para las tres corridas que se hicieron se puede plantear el siguiente sistema de ecuaciones que debe resolverse simultáneamente

$$\frac{h_{o1} De}{k_1} = a \left( \frac{De Gs_1}{\mu_1} \right)^b \left( \frac{CP_1 \mu_1}{k_1} \right)^c \dots\dots\dots(a)$$

$$\frac{h_{o2} De}{k_2} = a \left( \frac{De Gs_2}{\mu_2} \right)^b \left( \frac{CP_2 \mu_2}{k_2} \right)^c \dots\dots\dots(b)$$

$$\frac{h_{o3} De}{k_3} = a \left( \frac{De Gs_3}{\mu_3} \right)^b \left( \frac{CP_3 \mu_3}{k_3} \right)^c \dots\dots\dots(c)$$

Para obtener las constantes a, b y c

3. Estime el valor del coeficiente individual de transferencia de calor  $h_o$  ocupando la correlación de Kern dada por la ecuación 7 y la correlación que usted obtuvo y reporte el porcentaje de error en la tabla 2
4. Estime el calor intercambiado a partir de la ecuación 11 empleando los 2 coeficientes totales del punto anterior y calcule el porcentaje de error en relación al calor intercambiado estimado con el balance de energía, reporte sus resultados en la tabla 3

## TABLAS DE DATOS EXPERIMENTALES

### TABLA 1

#### BALANCE DE ENERGÍA

$W_c$ l/h	$W_f$ l/h	$T_1$ °C	$T_2$ °C	$t_1$ °C	$t_2$ °C	$Q_c$ Btu/h	$Q_f$ Btu/h
15	10	55					
15	30	55					
15	40	55					

### TABLA 2

#### ESTIMACIÓN DE COEFICIENTES INDIVIDUALES

$W_c$ l/h	$W_f$ l/h	$U_{exp}$ BTU/h ft <sup>2</sup> °F	$h_{io}$ BTU/h ft <sup>2</sup> °F	$(h_o)_{Exp}$ BTU/h ft <sup>2</sup> °F	$(h_o)_{Kern}$ BTU/h ft <sup>2</sup> °F	$(h_o)_{Correlación\ nueva}$ BTU/h ft <sup>2</sup> °F	% de Error
15	10						
15	30						
15	40						

### TABLA 3

#### ESTIMACIÓN DEL ERROR EN EL CALOR TRANSFERIDO CON LA NUEVA CORRELACIÓN

$W_c$ l/h	$W_f$ l/h	$Q_{KERN}$ Btu / h	$Q_{Correlación\ ueva}$ Btu / h	% Error
15	10			
15	30			
15	40			

## CONTENIDO DEL INFORME

1. La correlación que permite evaluar el coeficiente individual de transferencia calor del lado de la coraza
2. El porcentaje de error que hay entre el coeficiente individual del lado de la coraza evaluado con la ecuación propuesta por Kern y la correlación obtenido experimentalmente
3. El porcentaje de error que hay entre el calor obtenido con la correlación de Kern y el calor obtenido a partir del balance de energía
4. El porcentaje de error que hay entre el calor obtenido con la correlación obtenida experimentalmente y el calor obtenido a partir del balance de energía

## NOMENCLATURA

- $U$  = Coeficiente total de transferencia de calor  
 $h_i$  = Coeficiente parcial en la parte interna del tubo interno  
 $A_i$  = Área superficial de la incrustación interna del tubo interno  
 $X_w$  = Espesor del tubo  
 $k_w$  = Conductividad térmica del tubo  
 $A_{wm}$  = Área superficial promedio del tubo  
 $h_o$  = Coeficiente parcial en la parte del tubo interno  
 $A_o$  = Área superficial externa de la incrustación externa  
 $R_{di}$  = Factor de incrustación en la parte interna  
 $R_{do}$  = Factor de incrustación en la parte externa  
 $Re$  = Número de Reynolds  
 $Pr$  = Número de Prantl  
 $\mu_i$  = Viscosidad del fluido que va por los tubos  
 $\mu$  = Viscosidad del fluido que va por la coraza  
 $\mu_w$  = Viscosidad del fluido evaluada a la temperatura de la pared  
 $k_i$  = Conductividad térmica del fluido que va por los tubos  
 $k_a$  = Conductividad térmica del fluido externo que va por la coraza  
 $L$  = Longitud de los tubos  
 $D_e$  = Diámetro equivalente de transferencia de calor  
 $D_o$  = Diámetro externo de uno de los tubos  
 $D_s$  = Diámetro interno de la coraza  
 $G_s$  = Masa velocidad del fluido en la zona de la coraza  
 $G_i$  = Masa velocidad del fluido en la zona de los tubos  
 $A_t$  = área de flujo del lado de los tubos  
 $A_s$  = área de flujo por la coraza  
 $A$  = área total de transferencia

$P_t$  = Pitch  
C = Claro  
B = Espaciamiento entre mamparas  
 $F_t$  = Factor de corrección de la diferencia de temperaturas media logarítmica.

## **BIBLIOGRAFÍA**

DONALD K. KERN  
PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR. ED. CECSA 1965

ANTONIO VALIENTE BARDERAS  
FUNDAMENTOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR. TEORÍA Y PROBLEMAS ED. CECSA 1988