

LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS

APUNTES TEÓRICOS

EXPERIENCIA: INTERCAMBIADORES DE CALOR

Un intercambiador de calor es un equipo que permite la transferencia de calor entre dos fluidos que se encuentren a temperaturas diferentes, pudiendo haber cambios de fase durante la operación. Son dispositivos que cumplen un rol importante en operaciones de refrigeración, calentamiento, acondicionamiento de corrientes, producción de energía, procesamiento químico, entre otros.

Existen diferentes tipos de intercambiadores de calor, siendo los más comunes:

- Intercambiadores de doble tubo (o tubos concéntricos) (Fig. 1)
- Intercambiadores de tubos y coraza (o tubos y carcasa) (Fig. 2)
- Intercambiadores de placas (Fig. 3)



Figura 1. Intercambiador de tubos concéntricos
Fuente. HRS, Heat Exchangers



Figura 2. Intercambiador de tubo y coraza
Fuente. HRS, Heat Exchangers



Figura 3. Intercambiador de tubo y coraza
Fuente. GAB Neumann

TRANSFERENCIA DE CALOR

La ecuación de conservación de la energía para un intercambiador, independiente de su arreglo de flujo, es

$$q = C_f(t_{f,o} - t_{f,i}) = C_c(t_{h,i} - t_{h,o}) \quad \text{Ec. 1}$$

Y la ecuación de flujo de calor transferido de un fluido a otro es

$$q = UA\Delta t_M \quad \text{Ec. 2}$$

Donde Q es el calor transferido por unidad de tiempo, U es el coeficiente global de transferencia de calor, A es el área donde ocurre la transferencia de calor y Δt_M es la diferencia de temperatura media.

El calor transferido se calcula (generalmente) en base al calor absorbido por el fluido frío, el área de transferencia de calor se calcula en base a la geometría del intercambiador y el Δt_M es calculado normalmente a través del método de la temperatura media logarítmica, LMTD:

$$q = UA\Delta t_M = U \cdot A \cdot F \cdot LMTD \quad \text{Ec. 3}$$

Donde

$$LMTD = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)} \quad \text{Ec. 4}$$

A su vez, dentro de esta expresión se pueden presentar dos casos, los cuales son correspondientes a los tipos de arreglo de flujo que se pueden presentar, los cuales son contraflujo y flujo paralelo.

- Contraflujo

$$\Delta t_1 = t_{c,i} - t_{f,o}$$

$$\Delta t_2 = t_{c,o} - t_{f,i}$$

- Flujo paralelo

$$\Delta t_1 = t_{c,i} - t_{f,o}$$

$$\Delta t_2 = t_{c,o} - t_{f,o}$$

Por otro lado, el factor de corrección, F, es utilizado principalmente para el diseño de intercambiadores de placas, cuando este se diseña con múltiples arreglos. Para arreglos de único paso debe considerarse el cálculo del factor de corrección si $N_t < 20$.

El factor F, se estima a partir del NTU (Number of Transfer Units). Se debe seleccionar el valor más grande entre ambos fluidos:

$$NTU_c = \frac{t_{c,i} - t_{c,o}}{LMTD}$$

$$NTU_f = \frac{t_{f,o} - t_{f,i}}{LMTD}$$

Luego, leer el factor de corrección desde el gráfico NTU vs Factor de corrección, interceptando la curva con el arreglo determinado.

Además de este método de cálculo, en la literatura existen otros métodos para calcular el factor de corrección. Cual se aplique dependerá solo de los datos y parámetros que se dispongan para el cálculo.

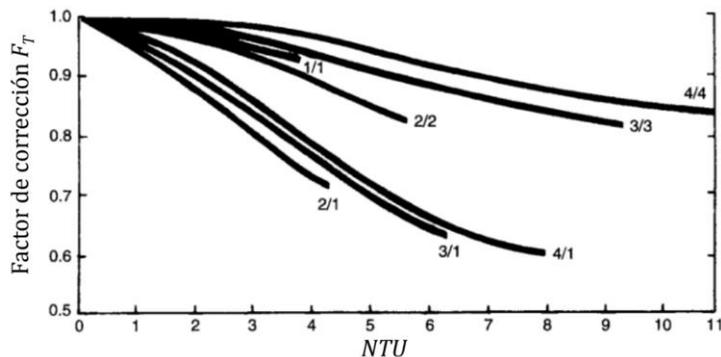


Figura 4. Factor de corrección

En el caso de ser un intercambiador de tubos concéntricos o de tubo y carcasa, utilizar $F=1$.

EFICIENCIA DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR

La eficiencia de un intercambiador de calor se define como la relación entre la tasa de transferencia de calor real, q , y la tasa de transferencia de calor máxima termodinámicamente posible, q_{\max} .

$$\eta = \frac{Q}{Q_{\max}} \quad \text{Ec. 5}$$

En términos termodinámicos simples, se puede definir la eficiencia de un intercambiador de calor como la fracción de calor absorbido por el fluido frío sobre el calor emitido por el fluido caliente:

$$\eta = \frac{Q_{\text{absorbido}}}{Q_{\text{emitido}}} \cdot 100$$

FACTOR DE ENSUCIAMIENTO Y COEFICIENTE GLOBAL

Cuando los aparatos de transferencia de calor han estado en servicio por algún tiempo, sin embargo, se les depositan incrustaciones y basura en la parte interior y exterior de las tuberías, añadiendo dos resistencias más de las que fueron incluidas en el cálculo de U . Para establecer cuando es necesario limpiar un intercambiador de calor se puede calcular el factor de ensuciamiento (R_D) del equipo:

$$R_D = \frac{1}{U_D} - \frac{1}{U_C} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde U_D corresponde al coeficiente de transferencia de calor del equipo, el sub índice D corresponde al denominado coeficiente de transferencia de calor de diseño, mientras que el sub índice C corresponde al coeficiente de transferencia de calor limpio y se calcula usando los coeficientes de película (h). Estos coeficientes tienen que ver con la velocidad a la que se transfiere el calor entre los fluidos, considerando solo a la pared de los tubos como el único

elemento que “merma” la transferencia de calor, es decir, cuando el equipo está completamente limpio.

U_c se calcula según:

$$\frac{1}{U_c} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} \quad \text{Ec. 7}$$

Donde h_o corresponde al coeficiente de película por el lado del tubo exterior (ánulo o carcasa, según el intercambiador que sea; solo aplica en IC de tubos) y, en operaciones industriales de calentamiento, es por donde pasa el vapor saturado. Si ese es el caso, el coeficiente de película es constante a un valor de $1500 \left[\frac{BTU}{h \cdot pie^2 \cdot ^\circ F} \right]$, esto porque se dice que el vapor es la fase controlante de la transferencia de calor. Por otro lado, h_{io} corresponde al coeficiente de película por el lado de tubo (ó tubos, según sea).

$$h_{io} = h_i \cdot \frac{D_i}{D_o} \quad \text{Ec. 8}$$

Donde D_i es el diámetro interno del tubo y D_o es el diámetro externo del tubo.

Para el cálculo de h_i se pueden usar ecuaciones empíricas cuando el fluido que va por tubo no sea el agua (en caso de intercambiadores de tubos concéntricos o de tubo y carcasa). Cuando se trata del agua, se puede usar la gráfica del ANEXO 2 para obtener el coeficiente de película basándose en la velocidad a la que fluye el agua por los tubos y la temperatura media del mismo. Es importante hacer notar que la gráfica se construye en base a tubos de $\frac{3}{4}$ ”, para diámetros diferentes se debe obtener el factor de corrección usando la gráfica superior que se muestra en el mismo apéndice.

Retomando el tema del factor de ensuciamiento, se dice que un intercambiador de calor necesita ser limpiado cuando el factor de ensuciamiento (R_D) calculado es mayor que el factor de ensuciamiento recomendado. Un listado de esto último se puede ver en el ANEXO 1 para diferentes tipos de operaciones.

DATOS ADICIONALES

Intercambiador de doble tubo

Diámetro Interno Tubo = 0.019 [m]

Diámetro Externo Tubo = 0.022 [m]

Largo = 3.6 [m]

Intercambiador de tubos y coraza

Diámetro Interno Tubos = 0.015 [m]

Diámetro Externo Tubos = 0.019 [m]

Número de Tubos = 7

Largo = 0.89 [m]

Intercambiador de placas

Número de placas: 22

REFERENCIAS

1. *Heat Exchanger Design Handbook*. **Kuppan Thulukkanam**. 2da Ed.
2. *Perry's Chemical Engineers Handbook*. **Robert Perry**. 7ma Ed.
3. *Procesos de transferencia de calor*. **Donald Kern**. 31ra Ed.

ANEXO 1

Tablas con Valores representativos de los coeficientes totales de transferencia de calor y Factores de obstrucción.

Tipo de intercambiador de calor	$U, \text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}^*$
Agua hacia agua	850-1 700
Agua hacia aceite	100-350
Agua hacia gasolina o queroseno	300-1 000
Calentadores de agua de alimentación	1 000-8 500
Vapor de agua hacia combustóleo ligero	200-400
Vapor de agua hacia combustóleo pesado	50-200
Condensador de vapor de agua	1 000-6 000
Condensador de freón (agua enfriada)	300-1 000
Condensador de amoniaco (agua enfriada)	800-1 400
Condensadores de alcohol (agua enfriada)	250-700
Gas hacia gas	10-40
Agua hacia aire en tubos con aletas (agua en los tubos)	30-60 [†] 400-850 [†]
Vapor de agua hacia aire en tubos con aletas (vapor de agua en los tubos)	30-300 [†] 400-4 000 [‡]

Fluido	$R_f, \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$
Agua destilada, agua de mar, agua de río, agua de alimentación para calderas:	
Por debajo de 50°C	0.0001
Arriba de 50°C	0.0002
Combustóleo	0.0009
Vapor de agua (libre de aceite)	0.0001
Refrigerantes (líquido)	0.0002
Refrigerantes (vapor)	0.0004
Vapores de alcohol	0.0001
Aire	0.0004

(Fuente: Tubular Exchange Manufacturers Association.)

LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS

Temperatura del medio calefactor	Hasta 240°F		240-400°F †	
Temperatura del agua	125°F o menos		Más de 125°F	
Agua	Velocidad del agua, pps		Velocidad del agua, pps	
	3 pies o menos	Más de 3 pies	3 pies o menos	Más de 3 pies
Agua de mar	0.0005	0.0005	0.001	0.001
Salmuera natural	0.002	0.001	0.003	0.002
Torre de enfriamiento y tanque con rocío artificial :				
Agua de compensación tratada	0.001	0.001	0.002	10.002
Sin tratar	0.003	0.003	0.005	jo.004
Agua de la ciudad o de pozo (como Grandes Lagos)	0.001	0.001	0.002	0.002
Grandes Lagos	0.001	0.001	0.002	0.002
Agua de río:				
Mínimo	0.002	0.001	0.003	0.022
Mississippi	0.003	0.002	0.004	0.003
Delaware, Schykill	0.003	0.002	0.004	0.003
East River y New York Bay	0.003	0.002	0.004	0.003
Canal sanitario de Chicago	0.008	0.006	0.010	0.008
Lodosa o turbia	0.003	0.002	0.004	0.003
Dura (más de 15 granos/gal)	0.003	0.003	0.005	0.005
Enfriamiento de máquinas	0.001	0.001	0.001	0.001
Destilada	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
Alimentación tratada para calderas	0.001	0.0005	0.001	0.001
Purga de calderas	0.002	0.002	0.002	0.002

† Las cifras de las últimas dos columnas se basan en una temperatura del medio calefactor de 240 a 400°F. Si la temperatura de este medio es mayor de 400°F. y si se sabe que el medio enfriador forma depósitos, estas cifras deben modificarse convenientemente.

ANEXO 2

Diagrama de coeficientes de película para Agua.

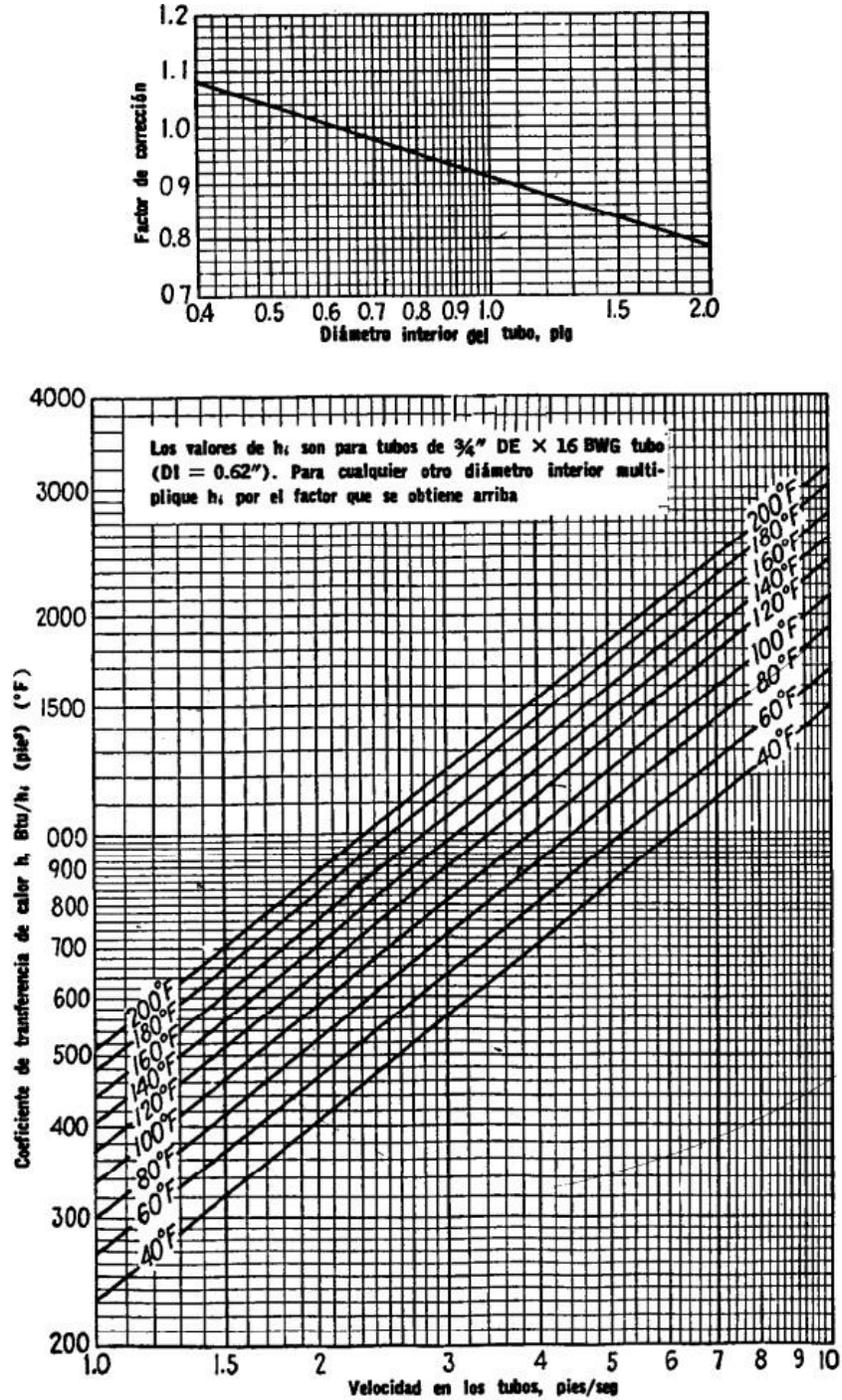


FIG. 25. Curva de transferencia de calor, agua en los tubos. [Adaptada de Eagle y Ferguson, Proc Roy., Soc. A127, 540 (1930)]

ANEXO 3

Data Sheet Intercambiador de placas.

CONDICIONES DE SERVICIO		CIRCUITO FRÍO		CIRCUITO CALIENTE	
Fluidos		Agua		Agua	
Caudales de entrada	l/min	20.00		15.00	l/min
Temperaturas de ENTRADA	°C	20.0		70.0	°C
Temperaturas de SALIDA	°C	53.6		25.0	°C
Pérdidas de carga (calc.)	mH ₂ O	0.022		0.013	mH ₂ O
Presión de servicio	bar G	10.000		10.000	bar G
Potencia	kW		46.52		
Sobredimens. total	%		0,04		

PROPIEDAD DE FLUIDOS

Densidad	kg/m ³	993.84	989.58
Calor específico	J/(kg K)	4177	4178
Conductividad térmica	W/(m K)	0.626	0.641
Viscosidad dinámica	cP	0.6943	0.5708

CONFIGURACIÓN DE PRODUCTO

Código de producto	SE#0070+041M95PNPV0JJ11	
Material de bastidor	Acero al carbono	
Placas (material / espesor)	AISI 316L (EN 1.4404) / 0.4 mm	
Juntas (material / tipo)	NBR / Plug-In® sin uso de pegamento	
Tamaño de la conexión	DN50	DN50
Tipo de conexiones	Roscados	Roscados
Materiales de conexiones	AISI 316	AISI 316
Posición de los fluidos (entrada -> salida)	F3 -> F4	F1 -> F2
N° de pasos	1	1
Dirección de flujos	Contracorriente	
Número máx. de placas instalables	41	

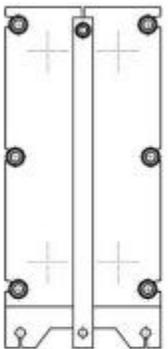
DISEÑO

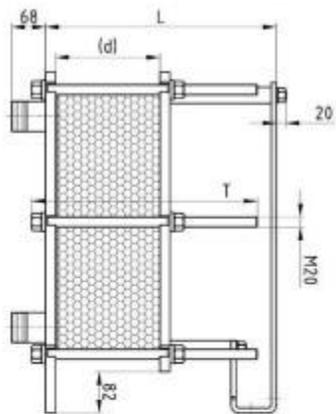
Diseño estándar	PED 2014/68/EU	
Categoría de riesgo PED	Art. 4.3 (Gr. 2 - L) / -	
Presión (proyecto / ensayo)	bar	10 / 15
Temperatura (mín. / diseño)	°C	0 / 70
Volumen interior de cada circuito	l	4.7
Conformidad	-	

DIMENSIONES Y PESO

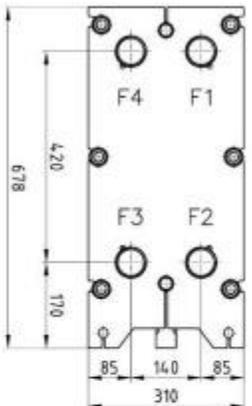
Dimensiones (ancho x alto x largo)	mm	310 x 678 x 408
Peso (vacío / en servicio)	kg	88 / 97

PRESSURE PLATE
Piastrone mobile / Plateau mobile
Bewegliche Platte / Persplaat
Bastidor móvil





FRAME PLATE
Piastrone fisso / Plateau fixe
Feste Platte / Vaste plaat
Bastidor fijo

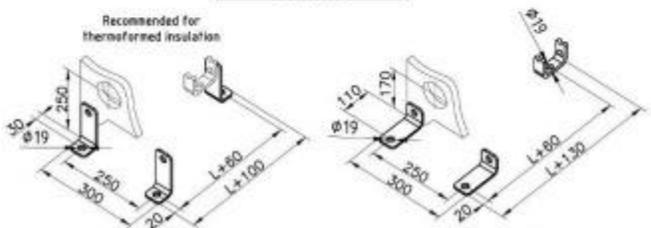


DIMENSIONS

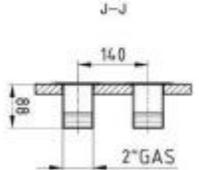
MAX No. plates	L	T
41	320	300
71	460	450
101	600	600
151	830	800

BRACKETS PLACEMENT

FEET / Piedini / Pieds
Füße / Pootjes / Pies
OPTIONAL



CONNECTIONS



DO NOT COPY OR OFFUSE THE DRAWING WITHOUT OUR AUTHORIZATION / Et' est'no reproduire o burlar'lo a l'no i' d'isegn' senza n'ost'ra autorizaz'one / Le document est' notre propri'et' et' ne peut' pas' et're r'eproduit sans n'ost'ra autorizaz'one / Este prohibido reproducir o burlar'lo a l'no i' d'isegn' sin n'ost'ra autorizaz'one / Ni se permite reproducir o burlar'lo a l'no i' d'isegn' sin n'ost'ra autorizaz'one / Nie wolno kopiowa'c ani ofiar'owa'c niniejszy rysunek bez n'ost'rogo zezwolenia / Nie wolno kopiowa'c ani ofiar'owa'c niniejszy rysunek bez n'ost'rogo zezwolenia / Nie wolno kopiowa'c ani ofiar'owa'c niniejszy rysunek bez n'ost'rogo zezwolenia / Nie wolno kopiowa'c ani ofiar'owa'c niniejszy rysunek bez n'ost'rogo zezwolenia

ALL DIMENSIONS IN MILLIMETRES / Tutte le dimensioni sono espresse in millimetri / Toutes les mesures sont exprim'ees en millim'etres / Alle Maße werden in Millimetern ausgedr'uckt / Alle afmettingen in millimeter / Todos los medidas son expresados en milimetros

	DESIGN PRESSURE PS 10	CONNECTIONS SIZE DN 50	CONNECTIONS TYPE J-J
CIRCUIT 1-1	FILE DRAWING SCH-MAN1801	DATE 15/04/14	