

Laboratorio de Operaciones Unitarias

Experiencia: Intercambiadores de Calor

1.- Marco Teórico

Un intercambiador de calor es un equipo utilizado para extraer el calor de un fluido caliente para ser transferido a un fluido frío, 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 y procesamiento químico entre otros.

En términos termodinámicos simples se puede definir la eficiencia de un intercambiador de calor como la fracción del calor absorbido por el fluido frío sobre el calor emitido por el fluido caliente (Ec. 1).

$$\eta = \frac{Q_A}{Q_E} \cdot 100 \quad \text{Ec. 1}$$

Existen diferentes tipos de intercambiadores de calor, siendo los más comunes los de doble tubo (ó tubos concéntricos, Figura 1), los de tubos y coraza (ó tubos y carcasa, Figura 2) y los de placas (Figura 3).

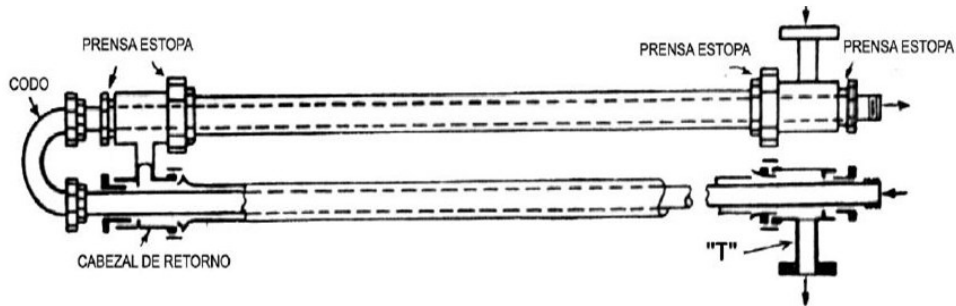


Figura 1: Intercambiador de Calor - Doble Tubo

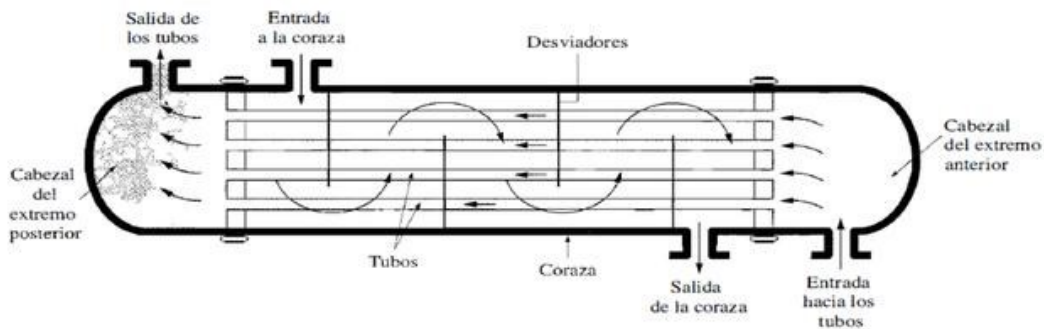


Figura 2: Intercambiador de Calor - Tubos y Coraza

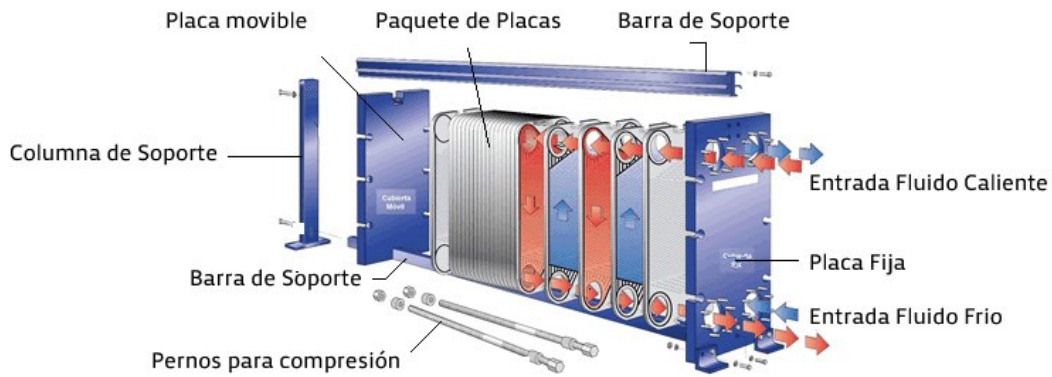


Figura 3: Intercambiador de Calor - Placas

Para todos los tipos de intercambiadores de calor existe una ecuación general que representa a su operación global, esta se representa en la Ec. 2.

$$Q = U A LMTD \quad \text{Ec. 2}$$

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 $LMTD$ es temperatura media logarítmica (*Log Mean Temperature Difference*). 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 $LMTD$ se calcula dependiendo si la operación es en co o contra corriente, la ecuación para calcularlo se muestra en la Ec. 3 y una ilustración para identificar las variables de la ecuación se muestra en la Figura 4.

$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad \text{Ec. 3}$$

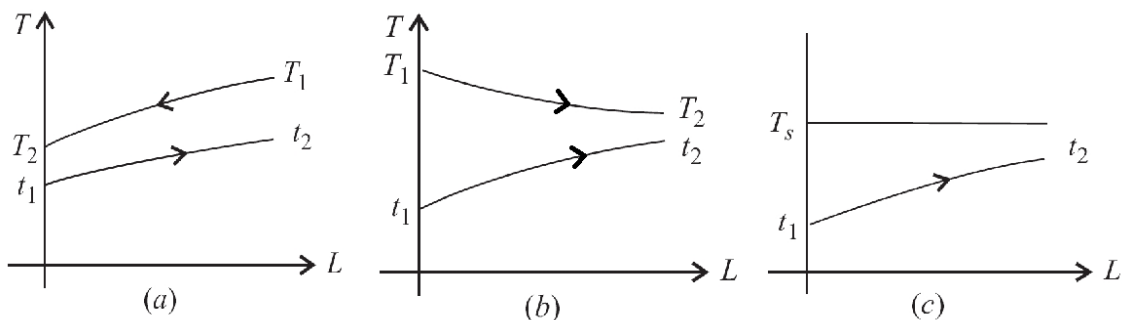


Figura 4: Formas de cálculo de LMTD

Refiriéndonos a la Figura 4, el término ΔT_1 corresponde a la diferencia de temperaturas que se produce a la izquierda de los gráficos y ΔT_2 corresponde a la

diferencia de temperaturas que se produce a la derecha de los gráficos. Los tres gráficos representan tres tipos de operaciones diferentes. (a) representa a una operación en contra corriente con fluidos distintos al vapor, (b) representa una operación en co corriente con fluidos distintos al vapor y (c) representa una operación en donde el fluido caliente es vapor saturado y el fluido frío algún fluido distinto de vapor.

En términos de operación de estos equipos, con el tiempo estos se ensucian, generando capas de escoria e incrustaciones que merman la transferencia de calor. Para establecer cuando es necesario limpiar un intercambiador de calor se puede calcular el *factor de ensuciamiento* (R_D) del equipo, tal como se muestra la Ec. 4.

$$R_D = \frac{1}{U_D} - \frac{1}{U_C} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde U_i corresponde al coeficiente de transferencia de calor del equipo, el sub índice D corresponde al denominado coeficiente de transferencia de calor de diseño (*design*) y que se calcula mediante la Ec. 2. Por otro lado, el sub índice C corresponde al coeficiente de transferencia de calor limpio (*clean*) 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 la Ec. 5.

$$\frac{1}{U_C} = \frac{1}{h_{io}} - \frac{1}{h_o} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde h_o corresponde al coeficiente de película por el lado del tubo exterior (ánulo o carcasa según el intercambiador que sea) 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 [BTU / h pie² °F] 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) corregido según la Ec. 6.

$$h_{io} = h_i \frac{DI}{DO} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde h_i es el coeficiente de película por el lado de tubo (sin corregir), DI es el diámetro interno del tubo y DO 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. Cuando se trata del agua, se puede usar la gráfica del APÉNDICE B 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 notas que la gráfica se construye en base a tubos de ¾”, 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 APÉNDICE A para diferentes tipos de operaciones.

2.- Objetivos

2.1.- Determinar e interpretar el coeficiente de transferencia de calor (U) de los intercambiadores de doble tubo y de tubos y coraza a distintas condiciones de operación.

2.2.- Determinar e interpretar el factor de ensuciamiento (R_D) de los intercambiadores de calor de doble tubo y de tubos y coraza.

2.3.- Determinar la eficiencia de los equipos en términos del calor emitido por el vapor y el calor absorbido por el agua.

3.- Procedimiento Experimental

3.1.- Intercambiador de calor de doble tubo

El intercambiador de calor de doble tubo disponible en el laboratorio opera en co-corriente. Por el lado del tubo pasa el agua y por el lado del ánulo pasa el vapor saturado. En la línea de salida el vapor se dispone de una trampa de vapor que hace que el vapor condense y salga solo como líquido saturado.

Adicionalmente, antes de comenzar la experiencia es necesario colocar termocuplas en los termopozos ubicados después del rotámetro para el agua fría y a la salida del intercambiador.

Procedimiento:

- Abrir la llave de paso del agua fría hasta un caudal indicado por el profesor.
- Verificar visualmente que el agua está descargando a la canaleta.
- Abrir la válvula reguladora de vapor hasta que el manómetro alcance una presión de 10 [psi]. Esta presión debe mantenerse estable durante toda la operación. Verificar que por la trampa de vapor esté saliendo líquido saturado en pulsos.
- Esperar hasta llegar a un estado pseudoestacionario, esto se verifica cuando la temperatura de salida del intercambiador no varía significativamente.
- Comenzar la carrera a esas condiciones de operación. La carrera durará 3 minutos y al final de esta se deben apuntar las temperaturas de entrada y

salida del intercambiador de calor y también la masa de condensado que salió por la trampa de vapor.

- Repetir los pasos anteriores para los diferentes flujos de agua fría que indique el profesor.
- Luego de realizar todas las carreras, dar de baja el equipo cortando el flujo de vapor y enfriando el intercambiador de calor con abundante flujo de agua.

3.2.- Intercambiador de calor de tubo y coraza

Procedimiento similar al anterior. Solo tener cuidado con la ubicación del termopozo para colocar la termocupla, el manómetro para ver la presión de vapor también es otro y la salida de la trampa de vapor también cambia.

4.- Datos Adicionales

Intercambiador de calor de doble tubo

Diámetro Interno Tubo = 0.019 [m]
Diámetro Externo Tubo = 0.022 [m]
Largo = 3.6 [m]

Intercambiador de calor de tubos y coraza

Diámetro Interno Tubos = 0.015 [m]
Diámetro Externo Tubos = 0.019 [m]
Número de Tubos = 7
Largo = 0.89 [m]

5.- Referencias

Warren L. McCabe, Julian C. Smith and Peter Harriot. 1993. *Unit Operations in Chemical Engineering*. McGraw-Hill, Fifth Edition.

Donald Q. Kern. 2005. *Procesos de Transferencia de Calor*. Compañía Editorial Continental.

Apéndice A: Factores de ensuciamiento permitidos para ciertos procesos

TABLA 12. FACTORES DE OBSTRUCCION *

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	0.002
Sin tratar	0.003	0.003	0.005	0.004
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	0.002
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.

Apéndice B: Coeficiente de película – Agua

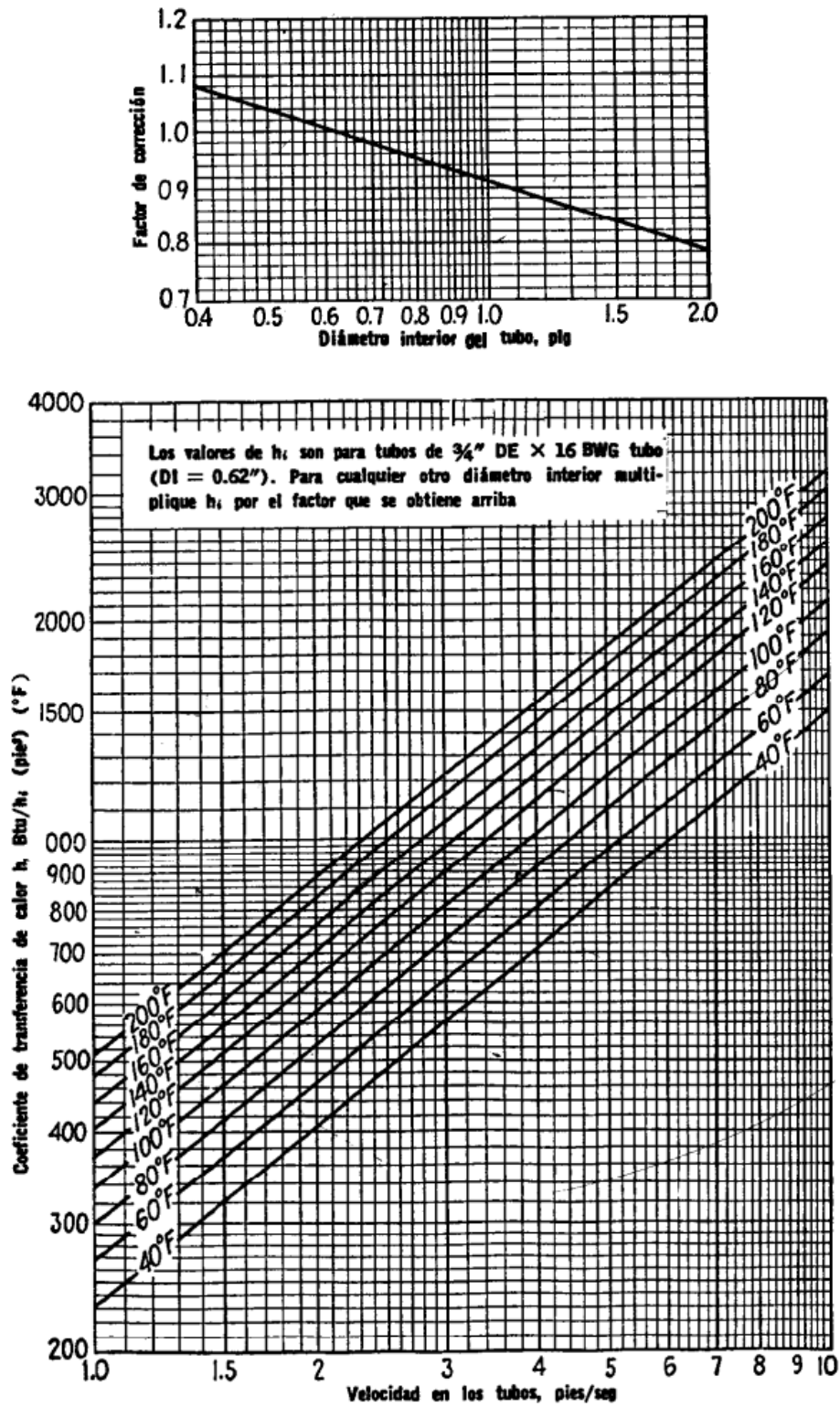


FIG. 25. Curva de transferencia de calor, agua en los tubos. [Adaptada de Eagle y Ferguson, Proc Roy., Soc. A127, 540 (1930)]

NOTA: Evaluar a temperatura media entre entrada y salida.