

INTERCAMBIO DE CALOR ENTRE DOS FLUIDOS

Cap.1 Bases de diseño de intercambiadores de calor:

Intercambiadores de contacto indirecto (Fluidos separados por una pared metálica)

En general habrá

- 2 fluidos, uno caliente y uno frío
- Terminales de entrada y salida para cada uno de los fluidos

El calor transferido de un fluido a otro a través de una pared cilíndrica es:

$$Q = \frac{2\pi L(T_1 - T_2)}{\frac{1}{h_i r_i} + \frac{\ln(r_e/r_i)}{k} + \frac{1}{h_e r_e}} \quad (1)$$

Esta ecuación es la base del diseño de intercambiadores de calor tubulares. Si se define el coeficiente global de transferencia de calor, U, tal que:

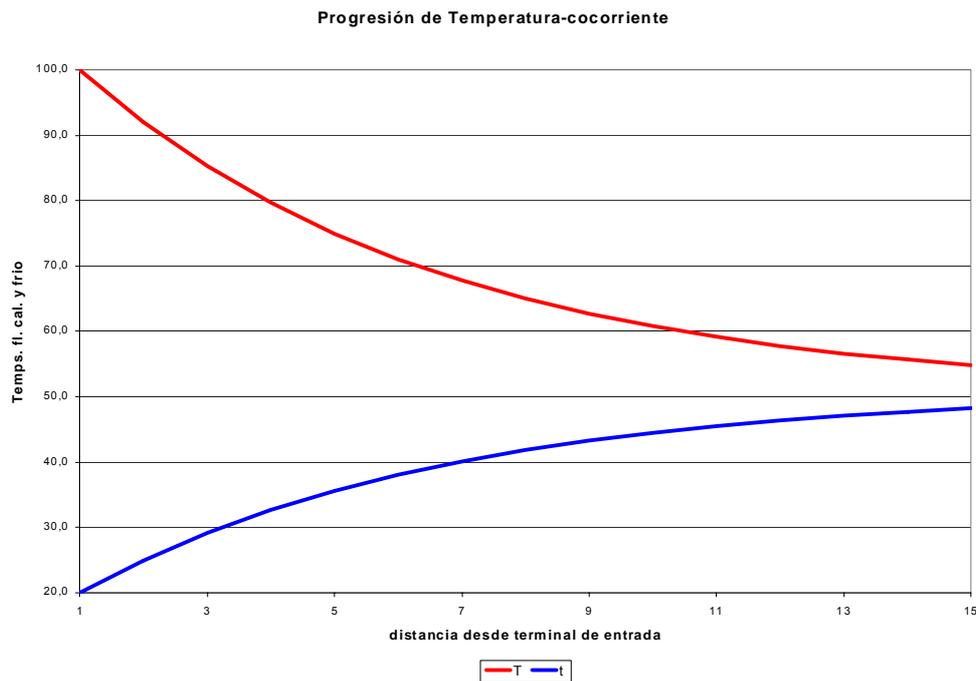
$$Q = UA \Delta T \quad (2)$$

Identificamos (1) con (2). Hay dos áreas de transferencia: la interna, $A_i = 2\pi r_1 L$, y la externa, $A_e = 2\pi r_2 L$. Los U basados en ambas áreas son:

$$\frac{1}{U_e} = \frac{r_e}{r_i h_i} + \frac{r_e \ln(r_e/r_i)}{k} + \frac{1}{h_e}$$
$$\frac{1}{U_i} = \frac{1}{h_i} + \frac{r_i \ln(r_e/r_i)}{k} + \frac{r_i}{r_e h_e}$$

Consideremos un intercambiador simple de tubos concéntricos:

Debido al intercambio de calor, los dos fluidos varían su temperatura a lo largo del



intercambiador.

En todo intercambiador habrá un “fluido caliente”, que entrega calor, y un “fluido frío” que lo recibe. Las disposiciones pueden ser:

- 1.- Flujo paralelo o cocorriente (ambos fluidos avanzan en el mismo sentido, disposición mostrada).
2. Flujo contracorriente (Fluidos fluyen en sentidos opuestos).

La diferencia de temperatura entre los dos fluidos también varía a lo largo. Por lo tanto, el flujo de calor varía.

Definición más general de U:

Coeficiente global de transferencia, U:

Representa la capacidad de la superficie para transferir calor.

Depende de los coeficientes convectivos individuales, (h_i y h_e , denotados así en la suposición de existir uno interno y otro externo), y de la resistencia conductiva de la superficie.

Para pared de un intercambiador, plana, lisa (sin aletas) y limpia, el producto UA es la cantidad de calor transferida por unidad de tiempo y por grado de diferencia de temperatura:

$$UA = I / R_t = \frac{I}{\frac{I}{h_i A_i} + \frac{t}{kA} + \frac{I}{h_e A_e}}$$

Para pared de un tubo, lisa (sin aletas) y limpia:

$$U_e A_e = U_i A_i = I / R_t = \frac{I}{\frac{I}{h_i A_i} + \frac{\ln(r_e / r_i)}{2\pi kL} + \frac{I}{h_e A_e}}$$

En tratamientos elementales del intercambio térmico se ignora que las superficies de un IC acumulan depósitos, cuyo espesor crece en el tiempo, así como la resistencia térmica de éstos.

Se incorporan los "coeficientes de ensuciamiento", empíricos, que alteran y reducen el valor de U, por la incorporación de estas resistencias adicionales.

$$R_t = \frac{I}{h_i A_i} + \frac{\ln(r_e / r_i)}{2\pi kL} + \frac{R_{fi}}{A_i} + \frac{R_{fe}}{A_e} + \frac{I}{h_e A_e}$$

Una pared de intercambiador puede estar aleteada en ambos lados, en uno o en ninguno.

Se agregan aletas para extender la superficie cuando el coeficiente convectivo individual es bajo, lo que ocurre cuando el fluido es gas.

Las aletas se caracterizan por una eficiencia ($\eta < 1$). Esta refleja el hecho de que la aleta es menos efectiva para transferir calor, que el área de base.

El calor intercambiado por una superficie aleteada se descompone en dos partes: el de las aletas y el de la superficie base, cuya eficiencia es unitaria.

$$Q = (\eta_a A_a h_a + A_b h_b) \Delta T$$

Considerando iguales los dos coeficientes convectivos:

$$Q = hA \left[1 - \frac{A_a}{A} (1 - \eta_a) \right] \Delta T = hA \eta_o \Delta T$$

η_o es la eficiencia global de la superficie total, $A = A_a + A_b$. Por lo tanto, la resistencia térmica global para la pared es:

$$R_t = \frac{1}{\eta_o h_i A_i} + \frac{\ln(r_e / r_i)}{2\pi k L} + \frac{R_{fi}}{\eta_o A_i} + \frac{R_{fe}}{\eta_o A_e} + \frac{1}{\eta_o h_e A_e}$$

Las resistencias pueden tener distintos órdenes de magnitud. Las mayores serán las resistencias controlantes y contribuyen más en la determinación de U.

BALANCES TÉRMICOS:

Sean los siguientes datos para el fluido frío

w, caudal

c, Calor específico

t_e , temperatura de entrada

t_s temperatura de salida.

Los valores correspondientes para el fluido caliente son: W, C, T_e , T_s .

Los balances térmicos expresan el calor transferido del fluido caliente al frío en todo el intercambiador de la siguiente manera:

$$Q = WC(T_e - T_s) = wc(t_s - t_e)$$

Suponiendo que no hay cambios de fase, y que no hay intercambios con otros medios. **Las diferencias de temperatura representan el aumento o disminución de temperatura de cada fluido** al pasar por el intercambiador.

Con cambios de fase los balances se escriben en forma diferente. Un líquido saturado se evapora a temperatura constante. Para evaporarse debe recibir calor, por lo tanto es un fluido frío.

Un vapor saturado también se condensa a temperatura constante. Como para condensarse entrega calor, se trata de un fluido caliente. Los balances para un fluido evaporándose y uno condensándose se escriben:

$$Q = W \lambda_c = w \lambda_e$$

en que λ son los calores latentes de evaporación/condensación.

En forma más general, los balances de energía se pueden escribir en función de las entalpías específicas de entrada y salida de los fluidos caliente y frío (I e i respectivamente) como:

$$Q = W(I_e - I_s) = w(i_s - i_e)$$

Se puede demostrar que:

Existen límites termodinámicos a la transferencia de calor en un intercambiador cualquiera:

Supongamos conocidos: W , C , T_e , w , c , t_e . Entonces, si disponemos de un intercambiador de área suficiente, el fluido que tenga el menor producto

Caudal × Calor específico

Se podrá llevar, desde su temperatura de entrada hasta la temperatura de entrada del otro fluido.

Ese fluido será el que controla el intercambio.

El segundo fluido no se podrá llevar hasta la temperatura de entrada del primero.

Esto se debe a que el balance implica:

$$\frac{t_s - t_e}{T_e - T_s} = \frac{WC}{wc}$$

Lo que significa que el número de grados en que se calienta o enfría un fluido es inversamente proporcional al producto WC .

Además el intervalo máximo en que puede variar la temperatura de un fluido está dado por el rango de temperatura en el intercambiador, que es

$$T_e - t_e$$

Entonces, el calor máximo que se puede transferir entre dos fluidos con condiciones de entrada dadas es

$$Q_{\max} = (WC)_{\min} (T_e - t_e)$$

ECUACION DE TRANSFERENCIA

El calor transferido en un intercambiador puede expresarse también por la ecuación de transferencia:

$$Q = UA\Delta T$$

En que $\Delta T = T - t$, es la diferencia de temperatura entre los dos fluidos. Pero, como ΔT no es uniforme a lo largo del intercambiador, ¿cuál es la diferencia de temperatura representativa?

La respuesta es: La diferencia media logarítmica de temperatura, ΔT_{\log} .

Si ΔT_1 y ΔT_2 son las diferencias de temperatura en los extremos (terminales) del intercambiador, el ΔT_{\log} se define por:

$$\Delta T_{\log} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$$

Deducción de la diferencia de temperatura media logarítmica.

Se trata de representar la ecuación de transferencia (que relaciona Q, U, A, y ΔT sobre la base de la diferencia de temperatura representativa para todo el intercambiador.

Ecuaciones de transferencia:

Para el intercambiador completo: $Q = UA\Delta T$

Para una franja dA: $dQ = U dA \Delta T$ (1)

Ecuaciones de balance para la franja: $dQ = WC dT = wc dt$

de donde: $dT = dQ / WC$ $dt = dQ / wc$

por lo tanto: $d(T - t) = dQ \left(\frac{1}{WC} - \frac{1}{wc} \right) = dQF$

o bien $d(\Delta T) = dQF$

Esta se integra para el intercambiador entre los terminales 1 y 2, dando.

$$\Delta T_2 - \Delta T_1 = QF \quad (2)$$

Si la ecuación $d(\Delta T) = dQF$

se divide miembro a miembro por

$\Delta T = dQ/(UdA)$ (1), se obtiene:

$$\frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = \frac{dQF \times UdA}{dQ} = F UdA$$

Lo cual se integra entre los dos terminales para dar:

$$\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1) = FUA$$

De aquí se despeja F, el cual se reemplaza en (2) dando:

$$Q = UA \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)}$$

Que es la "ecuación de transferencia" o "ecuación de diseño" de un intercambiador. Se llama así porque su uso permite determinar el área del intercambiador.

EFICIENCIA DEL INTERCAMBIO

Se define entonces la "eficiencia" del intercambio como el calor real transferido dividido por el calor máximo que se puede transferir (ver expresiones anteriores para el calor máximo):

$$\varepsilon = \frac{Q_{re}}{Q_{max}} = \frac{WC(T_e - T_s)}{(WC)_{min}(T_e - t_e)} = \frac{wc(t_s - t_e)}{(WC)_{min}(T_e - t_e)}$$

Se pueden deducir las siguientes expresiones para las eficiencias de los intercambios en cocorriente:

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp\left(-\left(1 + \frac{C_{min}}{C_{max}}\right) \frac{UA}{C_{min}}\right)}{1 + \frac{C_{min}}{C_{max}}}$$

y en contracorriente:

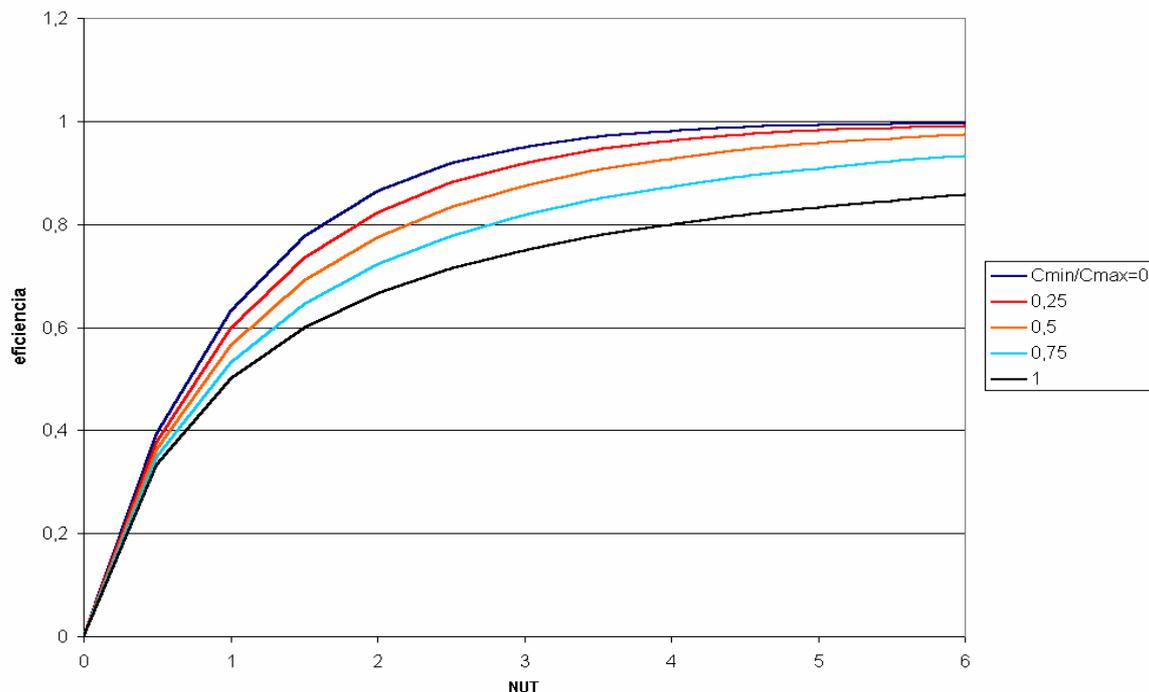
$$\varepsilon = \frac{1 - \exp\left(1 - \frac{C_{min}}{C_{max}}\right) \frac{UA}{C_{min}}}{1 - \frac{C_{min}}{C_{max}} \exp\left(1 - \frac{C_{min}}{C_{max}}\right) \frac{UA}{C_{min}}}$$

En las ecuaciones anteriores C representa el producto WC.

UA representa la capacidad de transferencia por grado de diferencia de temperatura entre los fluidos.

C_{mín} = (WC)_{min} representa la cantidad de calor que hay que transferir por grado de calentamiento o enfriamiento.

Eficiencia de intercambiadores en contracorriente



U debe ser conocido para cada aplicación, y se lo determina sobre la base de los conceptos sobre transferencia de calor por convección. La determinación de los coeficientes individuales (h) y el coeficiente global (U) es conocida del curso 43B.

El factor UA/C_{min} se designa como el “número de unidades de transferencia” del intercambiador, NUT.

Este parámetro representa el cociente entre la capacidad de transferencia de calor por grado de diferencia de temperatura entre los dos fluidos (representada por UA), y la cantidad de calor a transferir por grado de calentamiento o enfriamiento (representada por C_{mín}.)

NUT es una razón entre “la capacidad y la carga”, que en un intercambiador bien

diseñado no debe ser nunca mayor que 6.

En el gráfico de eficiencia vs. NTU para contracorriente con parámetro C_{min}/C_{max} , NUT está entre 0 y 6, C_{min}/C_{max} entre 0 y 1. Observará que las curvas de eficiencia se asintotizan a partir de $NTU = 4$, aproximadamente, lo cual indica que posteriores aumentos de área no contribuyen a aumentar la transferencia de calor.