

INTERCAMBIO DE CALOR ENTRE DOS FLUIDOS

El calor transferido de un fluido a otro a través de la pared de un tubo es:

$$Q = \frac{2\pi L(T_1 - T_2)}{\frac{1}{h_1 r_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{k} + \frac{1}{h_2 r_2}} \quad (1)$$

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

$$Q = UA \Delta T = UA(T_1 - T_2) \quad (2)$$

Identificaremos (1) con (2).

Hay dos áreas posibles de transferencia: la interna, $A_i = 2\pi r_1 L$, y la externa, $A_e = 2\pi r_2 L$.

Para hacer aparecer estas áreas en el numerador de (1) basta amplificar la fracción por el radio correspondiente.

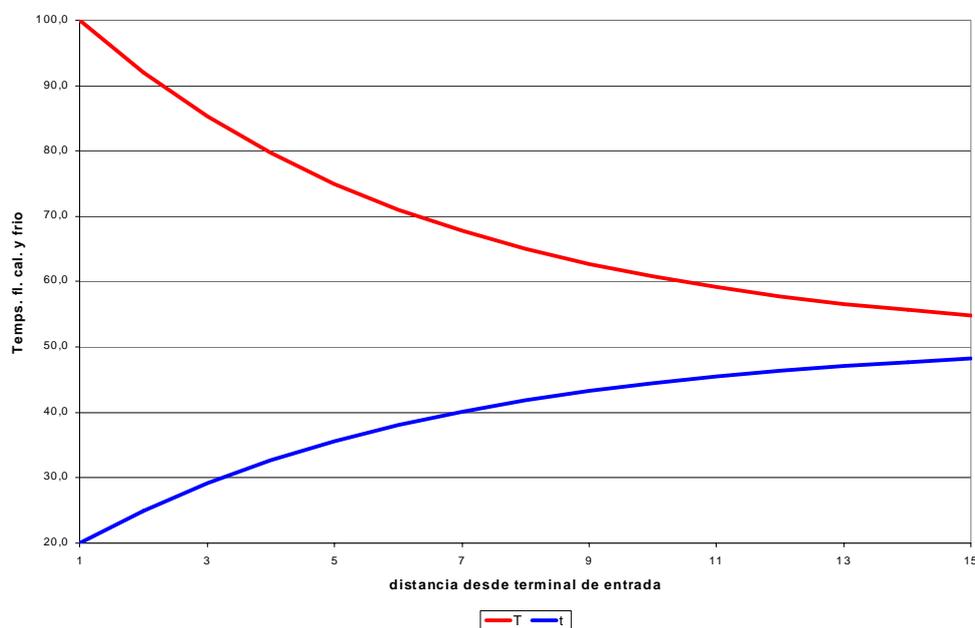
Habrán también coeficientes U interno y externo, basados en ambas áreas:

$$\frac{1}{U_e} = \frac{r_2}{r_1 h_1} + \frac{r_2 \ln(r_2/r_1)}{k} + \frac{1}{h_2}$$

$$\frac{1}{U_i} = \frac{1}{h_1} + \frac{r_1 \ln(r_2/r_1)}{k} + \frac{r_1}{r_2 h_2}$$

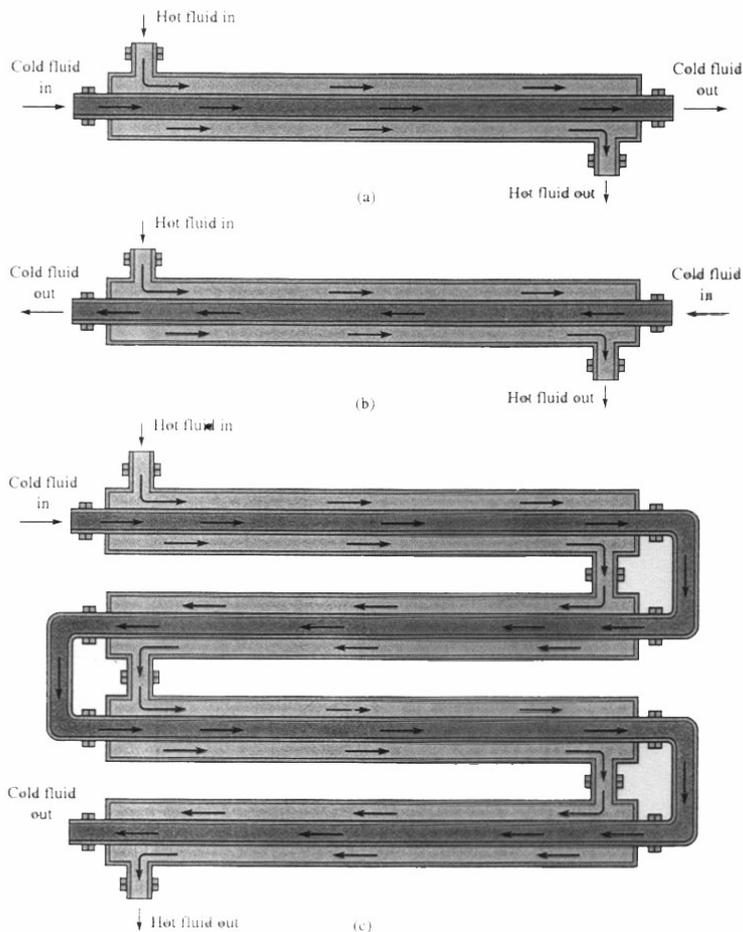
Consideremos un intercambiador simple de tubos concéntricos: Debido al intercambio de calor, los dos fluidos varían su temperatura a lo

Progresión de Temperatura-cocorriente



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.

BALANCES TÉRMICOS:

Sean los siguientes datos para el fluido frío

w , caudal, kg/s

c , Calor específico, J/kg K

t_e , temperatura de entrada, °C

t_s temperatura de salida, °C

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:

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

Esta expresión supone que no hay cambios de fase, y que no hay intercambios con otros medios (pérdidas de calor). Las diferencias de temperatura representan el aumento o disminución de temperatura de cada fluido al pasar por el intercambiador.

Además el calor transferido puede expresarse 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 (que demostraremos después) es: La diferencia media logarítmica de temperatura, ΔT_{\log} .

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

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

Si hay 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 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 e i_e 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 conocidas las condiciones de entrada: 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

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

Se define entonces la "eficiencia" del intercambio como el calor real transferido dividido por el calor máximo que se puede transferir:

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

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.

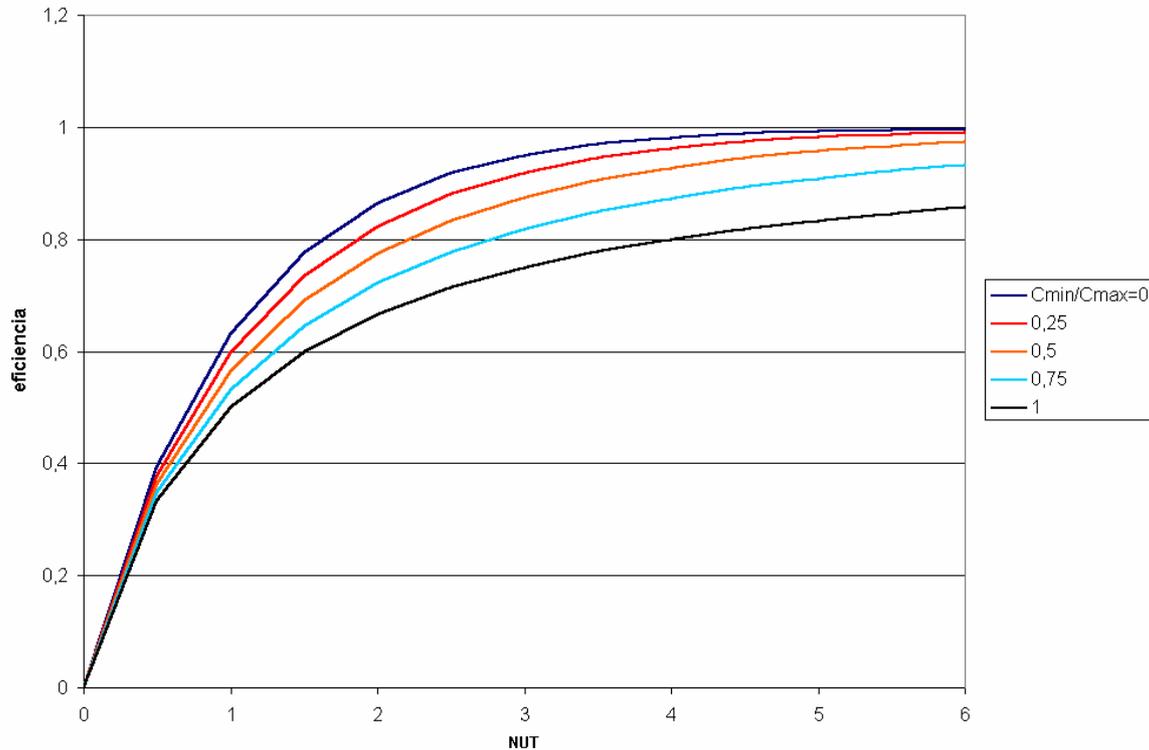
Entre los factores de mayor importancia en el cálculo del área de intercambiadores de calor está el coeficiente global de transferencia, U.

El factor UA/C_{min} se designa como "número de unidades de transferencia del intercambiador", NUT

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

$C_{min} = (WC)_{min}$ 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) se abordará en la próxima unidad.

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

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}.)

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: $d(T - t) = dQ \left(\frac{1}{WC} - \frac{1}{wc} \right) = dQ F$

o bien $d(\Delta T) = dQ F$

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

$$\Delta T_2 - \Delta T_1 = Q F \quad (2)$$

Si la ecuación $d(\Delta T) = dQ F$

se divide miembro a miembro por

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

$$\frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = \frac{dQ F \times U dA}{dQ} = F U dA$$

Lo cual se integra entre los dos terminales para dar:

$$\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1) = F U A$$

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

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

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.