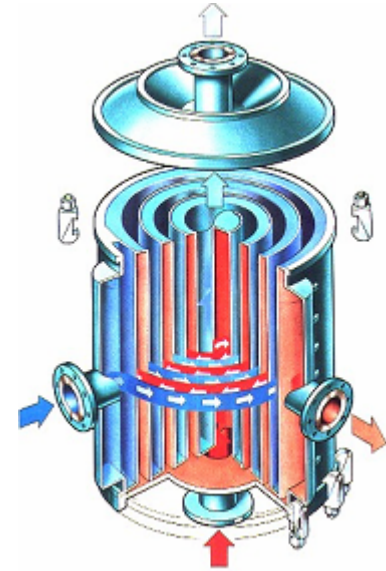
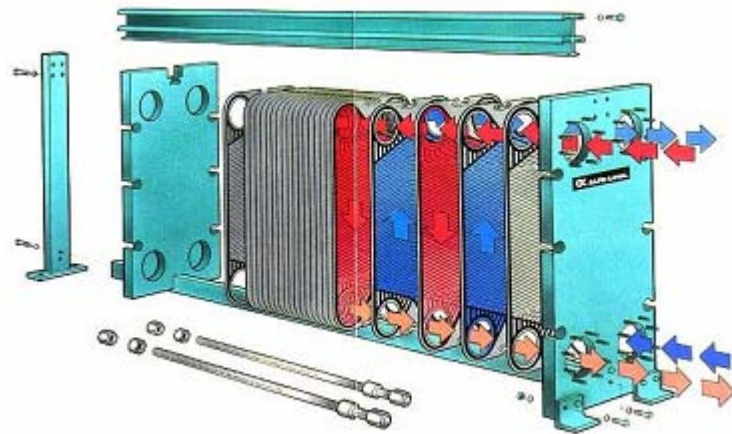


INTERCAMBIADORES DE CALOR



Mg. Amancio R. Rojas Flores

INTRODUCCIÓN

Los intercambiadores de calor son aparatos que facilitan el intercambio de calor entre dos fluidos que se encuentran a temperaturas diferentes y evitan al mismo tiempo que se mezclen entre sí.

En la práctica, los intercambiadores de calor son de uso común en una amplia variedad de aplicaciones, desde los sistemas domésticos de calefacción y acondicionamiento del aire hasta los procesos químicos y la producción de energía en las plantas grandes.

En un intercambiador la transferencia de calor suele comprender convección en cada fluido y conducción a través de la pared que los separa

En el análisis de los intercambiadores de calor resulta conveniente trabajar con un coeficiente de transferencia de calor total U que toma en cuenta la contribución de todos estos efectos sobre dicha transferencia

I - TIPOS DE INTERCAMBIADORES DE CALOR

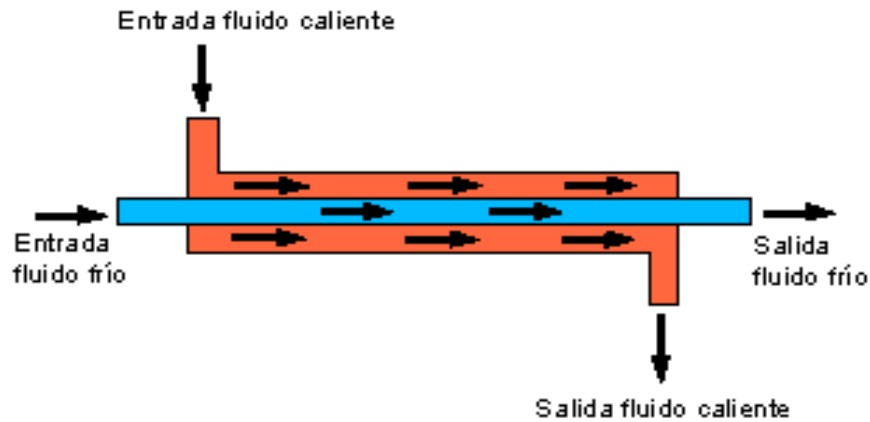
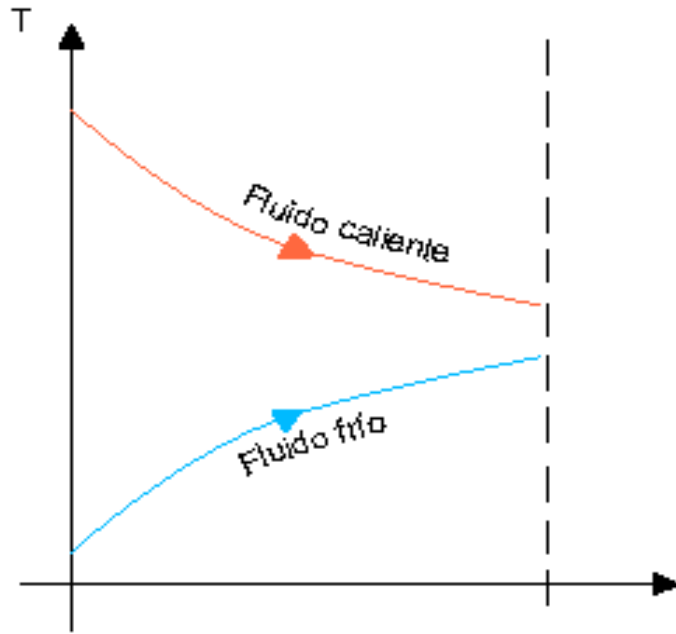
Las distintas aplicaciones de la transferencia de calor requieren diferentes tipos de accesorios y configuraciones del equipo para dicha transferencia

El intento de acoplar los accesorios para la transferencia de calor a cada tipo de necesidades, dentro de las restricciones específicas, ha conducido a numerosos tipos de diseños innovadores de intercambiadores de calor.

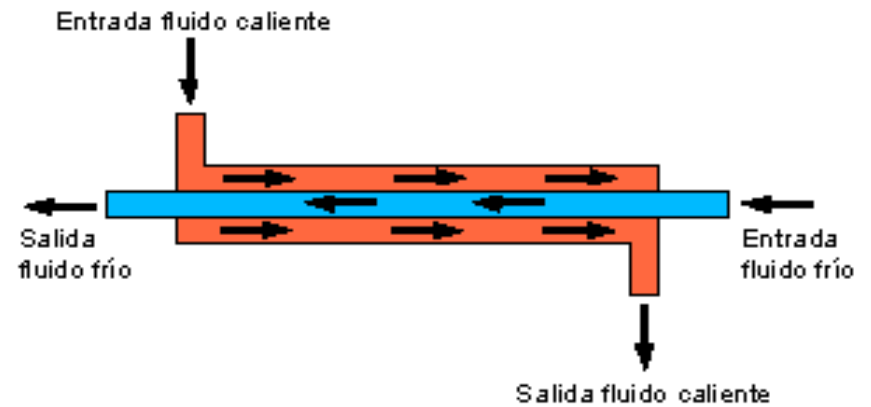
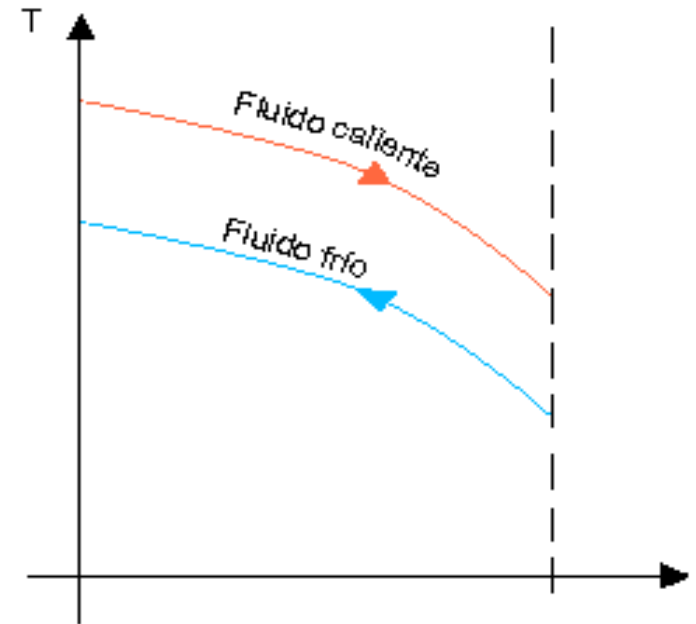
El tipo más simple de intercambiador de calor consta de dos tubos concéntricos de diámetros diferentes, como se muestra en la figura 1, llamado intercambiador de calor **de tubo doble**

En un intercambiador de este tipo uno de los fluidos pasa por el tubo más pequeño, en tanto que el otro lo hace por el espacio anular entre los dos tubos

Intercambiador de calor de tubo doble



a) Configuración en flujo paralelo



b) Configuración en contraflujo

Intercambiador de calor Compacto

Es diseñado específicamente para lograr una gran área superficial de transferencia de calor por unidad de volumen

La razón entre el área superficial de transferencia de calor de un intercambiador y su volumen se llama densidad de área β .

Un intercambiador de calor con $\beta > 700 \text{ m}^2 / \text{m}^3$ (o $200 \text{ ft}^2 / \text{ft}^3$) se clasifica como compacto.

Ejemplos: radiadores de automóviles ($\beta \approx 1000 \text{ m}^2 / \text{m}^3$),
el pulmón humano ($\beta \approx 20000 \text{ m}^2 / \text{m}^3$).

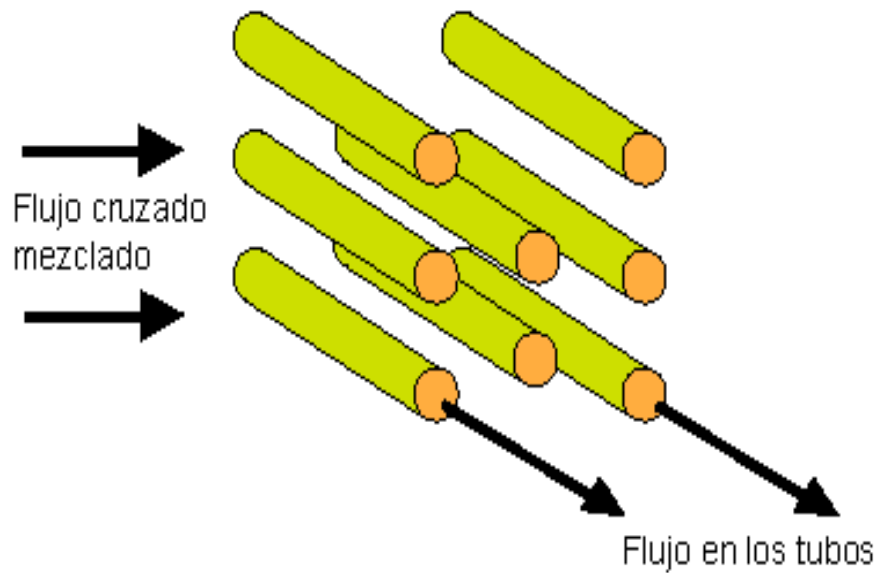
Los intercambiadores compactos permiten lograr razones elevadas de transferencia de calor entre dos fluidos en un volumen pequeño y son de uso común en aplicaciones con limitaciones estrictas con respecto al peso y el volumen de esos aparatos

los intercambiadores de calor compactos prevalecen en la industria automotriz, industria aéreo - espacial y en sistemas marinos.

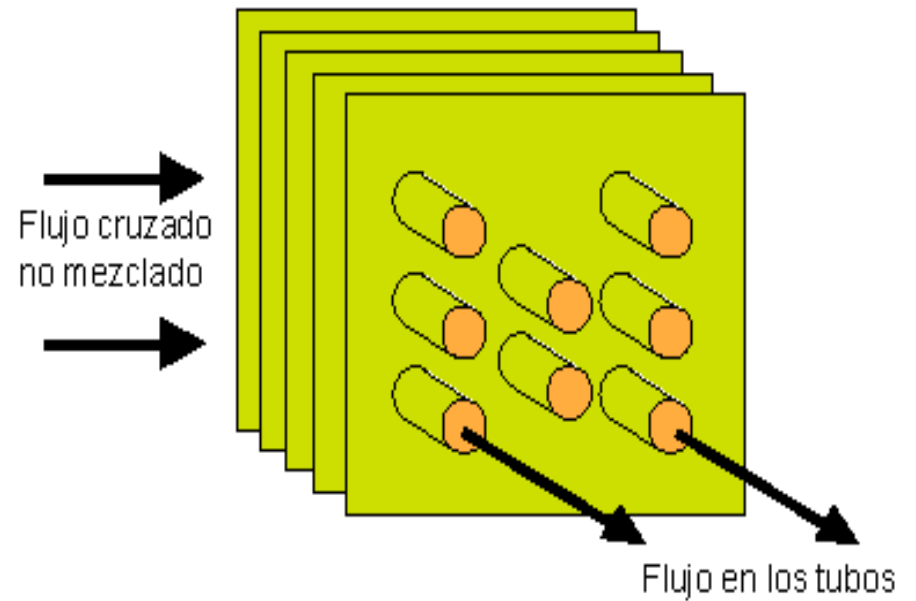
La gran área superficial en los intercambiadores compactos se obtiene sujetando placas delgadas o aletas corrugadas con poco espacio entre si a las paredes que separan los dos fluidos.

Los intercambiadores compactos son de uso común en la transferencia de calor de gas hacia gas y de gas hacia líquido (o líquido hacia gas), para contrarrestar el bajo coeficiente de transferencia de calor asociado con el flujo de gases mediante una mayor área superficial

En los intercambiadores compactos los dos fluidos suelen moverse de manera perpendicular entre sí y a esa configuración de flujo se le conoce como flujo cruzado, el cual todavía se clasifica más como flujo no mezclado o mezclado, dependiendo de su configuración, como se muestra en la figura 3.



a) FLUJO CRUZADO MEZCLADO



b) FLUJO CRUZADO NO MEZCLADO

En un radiador de automóvil los dos fluidos son no mezclados

Intercambiador de calor de tubos y coraza

Estos intercambiadores de calor contienen un gran número de tubos (a veces varios cientos) empacados en un casco con sus ejes paralelos al de éste.

La transferencia de calor tiene lugar a medida que uno de los fluidos se mueve por dentro de los tubos, en tanto que el otro se mueve por fuera de éstos, pasando por la coraza.

Es común la colocación de desviadores en la coraza para forzar al fluido a moverse en dirección transversal a dicha coraza con el fin de mejorar la transferencia de calor, y también para mantener un espaciado uniforme entre los tubos.

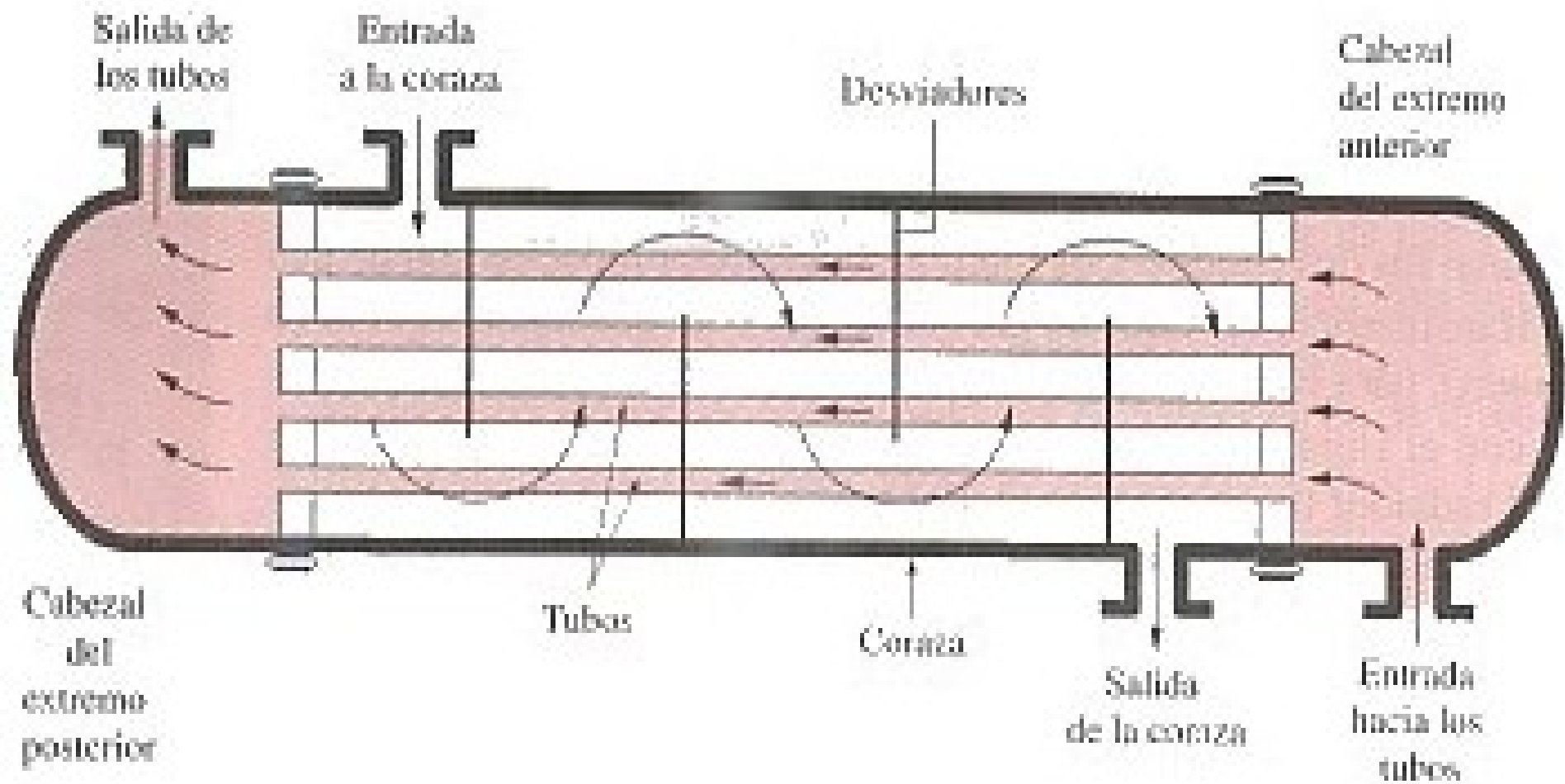


Fig.4 Esquema de un intercambiador de calor de coraza y tubos (un paso por la coraza y un paso por los tubos)

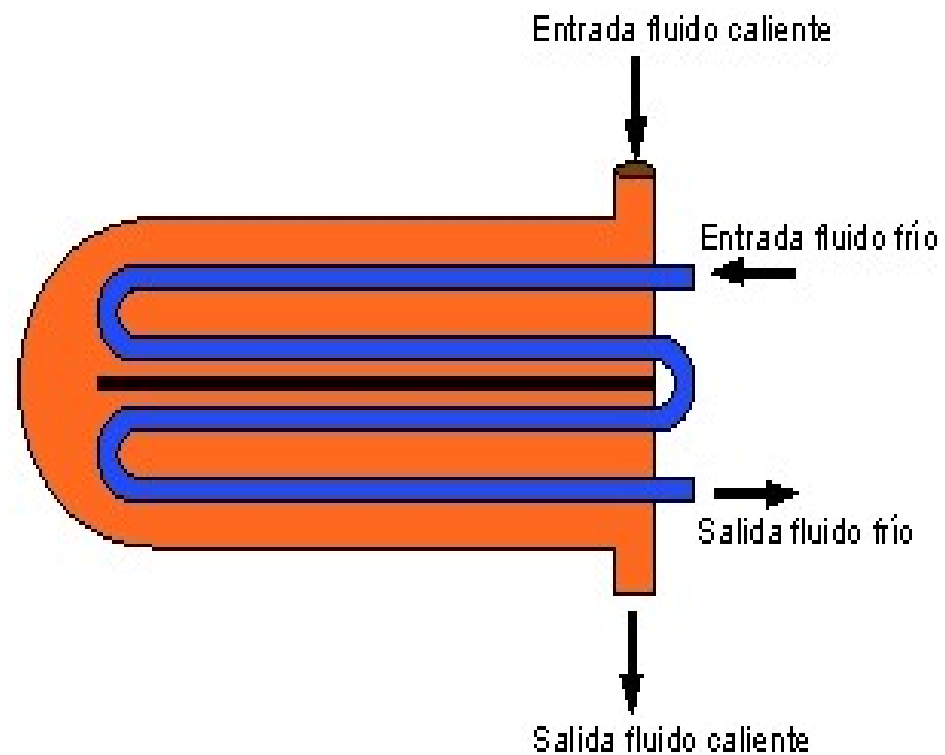
Los intercambiadores de tubos y coraza se clasifican todavía más según el número de pasos que se realizan por la coraza y por los tubos.

Por ejemplo, los intercambiadores en los que todos los tubos forman una U en la coraza se dice que son de un paso por la coraza y dos pasos por los tubos.

De modo semejante, a un intercambiador que comprende dos pasos en la coraza y cuatro pasos en los tubos se le llama de dos pasos por la coraza y cuatro pasos por los tubos (figura 5).



**a) 1 PASO POR EL CASCO -
2 PASOS POR LOS TUBOS**



**b) 2 PASOS POR EL CASCO -
4 PASOS POR LOS TUBOS**

Fig. 5 Disposiciones del flujo en pasos múltiples en los intercambiadores de calor de coraza y tubos

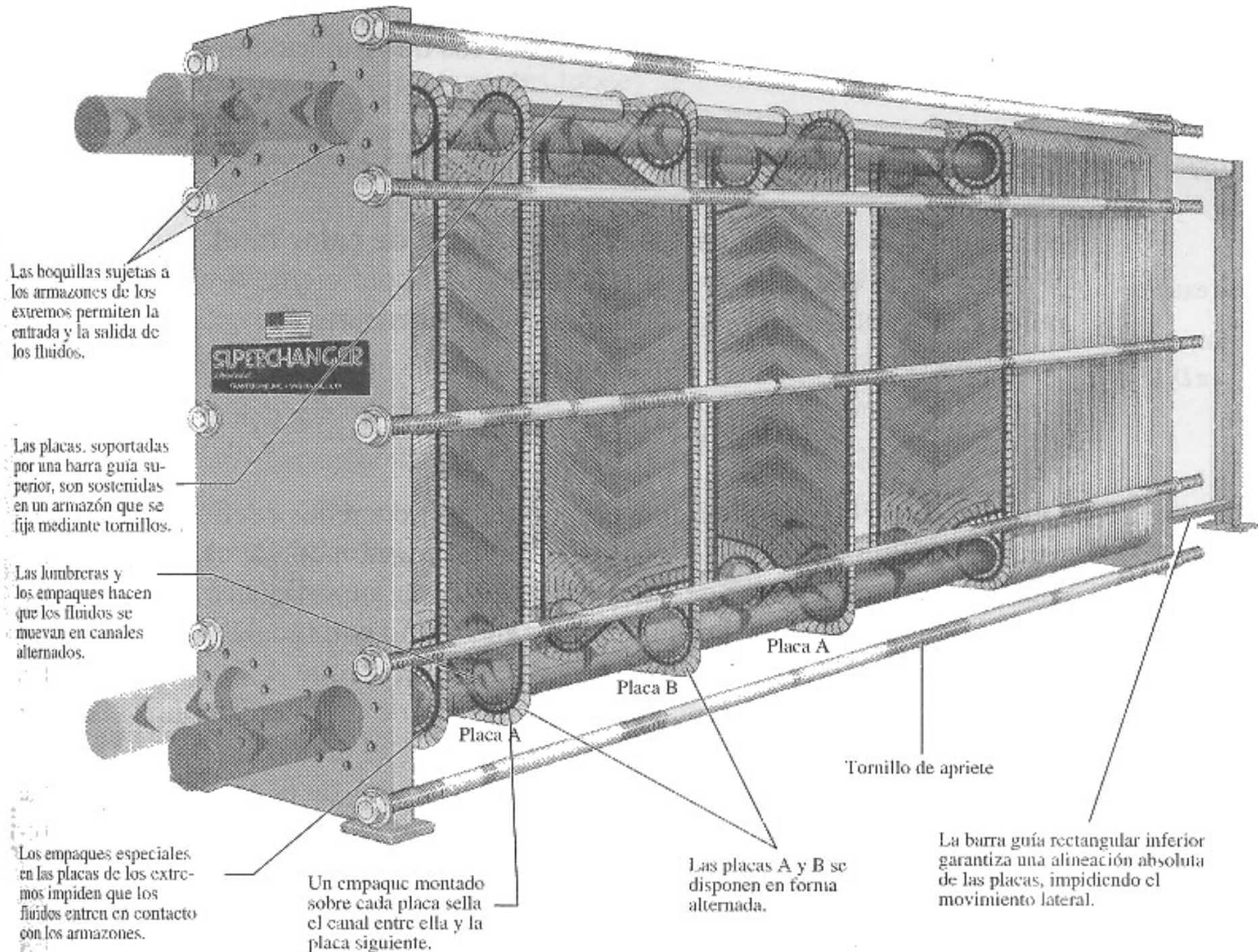
Intercambiador de Carcaza y tubo.- Es el intercambiador más ampliamente usado en la industria.

En este intercambiador un fluido fluye por el interior de los tubos, mientras el otro es forzado a través de la carcaza y sobre el exterior de los tubos.

Para asegurar que el fluido por el lado de la carcaza fluya a través de los tubos e induzca una mayor transferencia de calor, se colocan, deflectores ó placas verticales.

Es corriente encontrar intercambiadores de calor de 2,4,8,etc. pasos de tubos. De la misma manera existe la posibilidad que exista varios pasos de carcaza.

Resultan muy apropiados para aplicaciones de intercambio de calor de líquido hacia líquido, siempre que las corrientes de los fluidos caliente y frío se encuentren más o menos a la misma presión.



Otro tipo de intercambiador de calor que se relaciona con el paso alternado de las corrientes de los fluidos caliente y frío a través de la misma área de flujo es el **regenerativo**.

El intercambiador regenerativo del tipo estático básicamente es una masa porosa que tiene una gran capacidad de almacenamiento de calor, como la malla de alambre de cerámica

Los fluidos caliente y frío fluyen a través de esta masa porosa de manera alternada.

El calor se transfiere del fluido caliente hacia la matriz del regenerador durante el flujo del mismo, y de la matriz hacia el fluido frío durante el paso de éste

Por tanto, la matriz sirve como un medio de almacenamiento temporal de calor.

El regenerador del tipo dinámico consta de un tambor giratorio y se establece un flujo continuo del fluido caliente y del frío a través de partes diferentes de ese tambor, de modo que diversas partes de este último pasan periódicamente a través de la corriente caliente, almacenando calor, y después a través de la corriente fría, rechazando este calor almacenado.

Una vez más, el tambor sirve como el medio de transporte del calor de la corriente del fluido caliente hacia la del frío.

A menudo a los intercambiadores se les da nombres específicos que reflejen la aplicación para la cual se usan

- un condensador es un intercambiador de calor en el cual uno de los fluidos se enfría y se condensa conforme fluye a través de ese intercambiador
- Una caldera es otro intercambiador en el cual uno de los fluidos absorbe calor y se vaporiza.
- Un radiador de espacio es un intercambiador que transfiere calor del fluido caliente hacia el espacio circundante por radiación.

2. COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR TOTAL U

Por lo común un intercambiador de calor está relacionado con dos fluidos que fluyen separados por una pared sólida

En primer lugar, el calor se transfiere del fluido caliente hacia la pared por convección, después a través de la pared por conducción y, por último, de la pared hacia el fluido frío de nuevo por convección

Cualesquiera efectos de radiación suelen incluirse en los coeficientes de transferencia de calor por convección

La red de resistencias térmicas asociada con este proceso de transferencia de calor comprende dos resistencias por convección y una por conducción, como se muestra en la figura 7

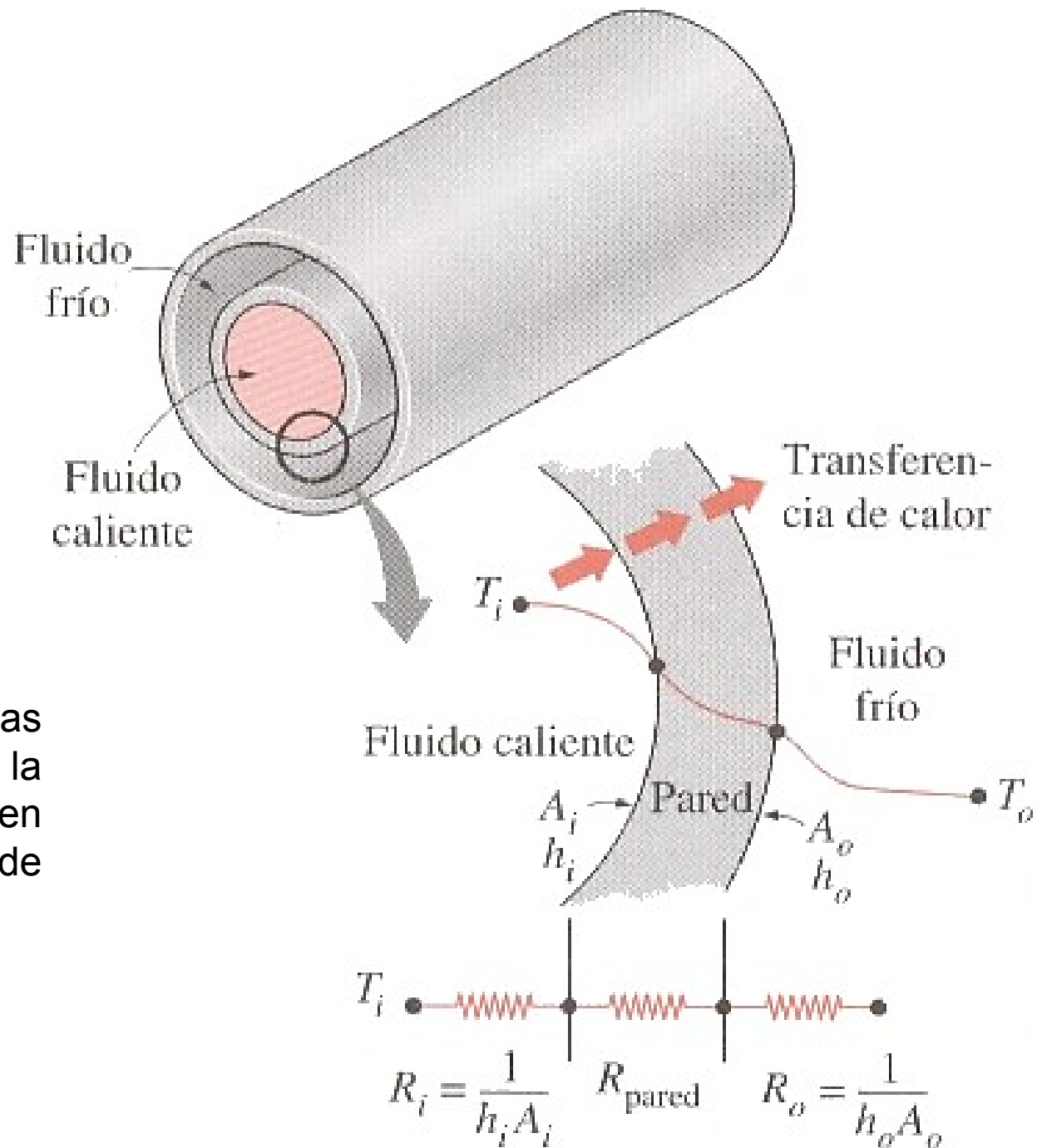


Fig.7 Red de resistencias térmicas asociada con la transferencia de calor en un intercambiador de calor de tubos doble

En este caso, los subíndices *i* y *o* representan las superficies interior y exterior del tubo interior. Para un intercambiador de calor de tubo doble, la resistencia térmica de la pared del tubo es:

$$R_{pared} = \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k L} \quad \dots(1)$$

Donde:

k es la conductividad térmica del material de la pared

L es la longitud del tubo.

Entonces la resistencia térmica total queda:

$$R = R_{total} = R_i + R_{pared} + R_o = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o A_o} \quad \dots(2)$$

A_i es el área de la superficie interior de la pared que separa los dos fluidos y A_o es el área de la superficie exterior de esa misma pared

En otras palabras, A_i y A_o son las áreas superficiales de la pared de separación mojada por los fluidos interior y exterior, respectivamente.

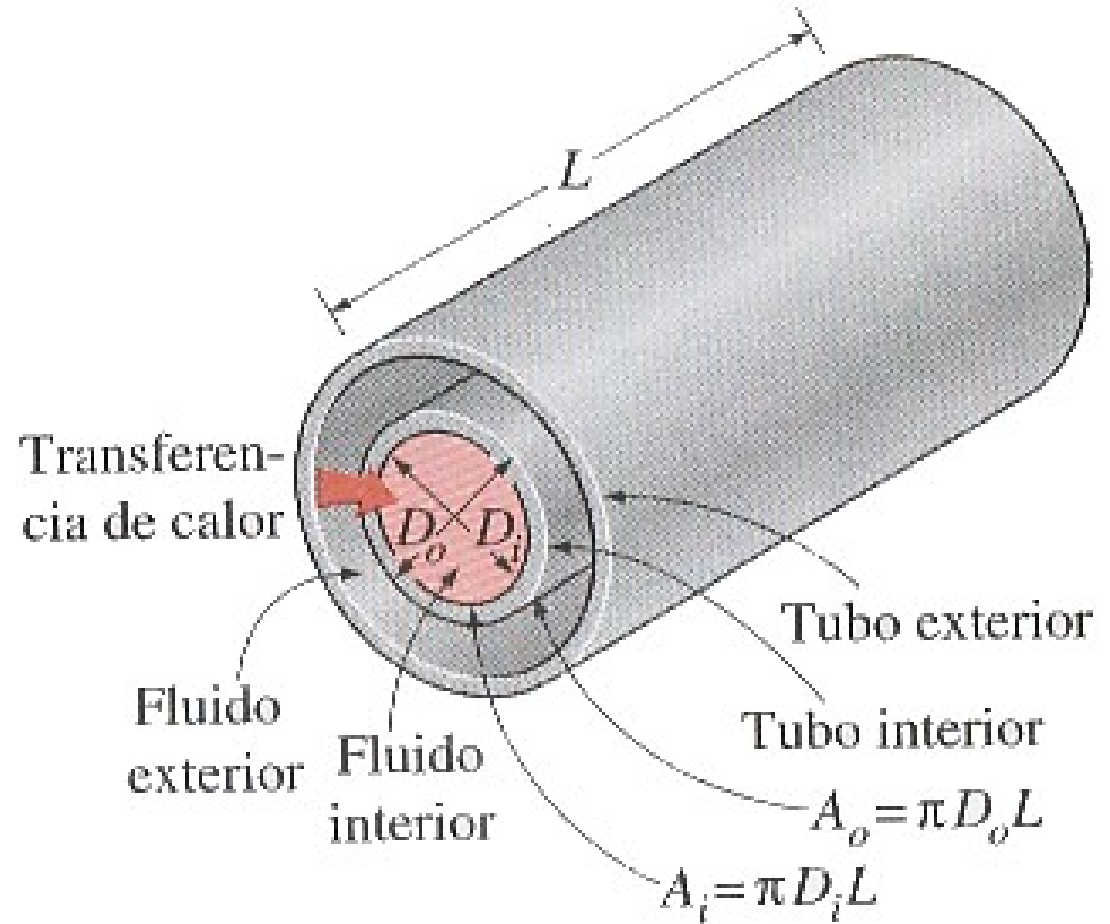


Fig. 8 las dos áreas superficiales de transferencia de calor asociadas con un intercambiador de calor de tubo doble

En el análisis de los intercambiadores de calor resulta conveniente combinar todas las resistencias térmicas que se encuentran en la trayectoria del flujo de calor del fluido caliente hacia el frío en una sola resistencia R y expresar la razón de la transferencia de calor entre los dos fluidos como:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} = UA \Delta T = U_i A_i \Delta T = U_o A_o \Delta T \quad \dots(3)$$

donde

U es el **coeficiente de transferencia de calor total**, ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

la cual es idéntica a la unidad del coeficiente de convección común, h .
Cancelando ΔT , la ecuación se convierte en

$$\frac{1}{U A_s} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} = R = \frac{1}{h_i A_i} + R_{pared} + \frac{1}{h_o A_o} \quad \dots(4)$$

El coeficiente de transferencia de calor total U de un intercambiador de calor no tiene significado a menos que se especifique el área sobre la cual se basa.

En especial, este es el caso cuando uno de los lados de la pared del tubo tiene aletas y la otra no, ya que el área superficial del lado con aletas es varias veces mayor que la que no las tiene.

Cuando la pared del tubo es pequeña y la conductividad térmica del material del mismo es alta, como suele ser el caso, la resistencia térmica de dicho tubo es despreciable ($R_{\text{pared}} \approx 0$) y las superficies interior y exterior del mismo son casi idénticas ($A_i \approx A_o \approx A_s$). Entonces la ecuación 4 para el coeficiente de transferencia de calor total se simplifica para quedar

$$\frac{1}{U} \approx \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} \quad \dots(5)$$

VALORES REPRESENTATIVOS DE LOS COEFICIENTES TOTALES DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR

TIPO DE INTERCAMBIADOR DE CALOR	U, W/m ² · °C
Agua hacia agua	850-1700
Agua hacia aceite	100-350
Agua hacia gasolina o queroseno	300-1000
Calentadores de agua de alimentación	1000-8500
Vapor de agua hacia combustóleo ligero	200-400
Vapor de agua hacia combustóleo pesado	50-200
Condensador de vapor de agua	1000-6000
Condensador de freón (agua enfriada)	300-1000
Condensador de amoníaco (agua enfriada)	800-1400
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 **

Multiplíquense los valores de la lista por 0.176 para convertirlos en Btu/h – ft² - °F.

* Con base en el área superficial M lado del agua.

** Con base en el área superficial del lado del agua o del vapor de agua.

Cuando el tubo tiene aletas en uno de los lados para mejorar la transferencia de calor, el área superficial para la transferencia de calor total en ese lado queda

$$A_S = A_{total} = A_{aleta} + A_{sin\ aleta}$$

Donde:

A_{aleta} es el área superficial de las aletas

$A_{sin\ aleta}$ es el área de la parte sin aletas de la superficie del tubo.

Para aletas cortas de alta conductividad térmica se puede usar esta área total en la relación de la resistencia a la convección $R_{conv} = 1/hA_S$ ya que, en este caso, las aletas serán con mucha aproximación isotérmicas.

De lo contrario, debemos determinar el área superficial efectiva A , a partir de

$$A_S = A_{\text{sin aletas}} + \eta_{\text{aleta}} A_{\text{aleta}}$$

Donde:

η_{aleta} es la eficiencia de la aleta

De esta manera, se toma en cuenta la caída de temperatura a lo largo de la aleta.

para las aletas isotérmicas

$$\eta_{\text{aleta}} = 1$$

FACTOR DE INCRUSTACIÓN

El rendimiento de los intercambiadores de calor suele deteriorarse con el paso del tiempo como resultado de la acumulación de depósitos sobre las superficies de transferencia de calor.

La capa de depósitos representa una resistencia adicional para esta transferencia y hace que disminuya la razón de la misma en un intercambiador.

El efecto neto de estas acumulaciones sobre la transferencia de calor se representa por un **factor de incrustación** R_f el cual es una medida de la resistencia térmica introducida por la incrustación.

El tipo más común de incrustación es la precipitación de depósitos sólidos que se encuentran en un fluido sobre las superficies de transferencia de calor.

El factor de incrustación depende de la temperatura de operación y de la velocidad de los fluidos, así como de la duración del servicio. La incrustación se incrementa al aumentar la temperatura y disminuir la velocidad.

La relación del coeficiente de transferencia de calor total dada con anterioridad es válida para superficies limpias y es necesario modificarla para tomar en cuenta los efectos de incrustación sobre las superficies interior y exterior del tubo. Para un intercambiador de calor de casco y tubos, sin aletas, se puede expresar como.

$$\frac{1}{UA_S} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} = R = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R_{f.i}}{A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k L} + \frac{R_{f.o}}{A_o} + \frac{1}{h_o A_o}$$

En donde $R_{f,i}$ y $R_{f,o}$ son los factores de incrustación en esas superficies.