

Capacitación para técnicos aspirantes a operadores de una refinería de petróleo

2023

Ing. Alfredo A Caballero

MÓDULO 6: INTERCAMBIADORES DE CALOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIVERSIDAD NACIONAL

DE CUYO

EQUIPO DOCENTE

Nombre y Apellido: Alfredo A Caballero

Ing Industrial – alfredo.caballero@ingenieria.uncuyo.edu.ar

Ing.

MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Prácticamente en todas las operaciones que se realizan en Refinería, interviene la producción o absorción de energía en forma de calor. Por lo tanto, las leyes que rigen la transferencia de calor y el tipo de aparatos, cuyo fin principal es el control del flujo de calor, tienen una gran importancia

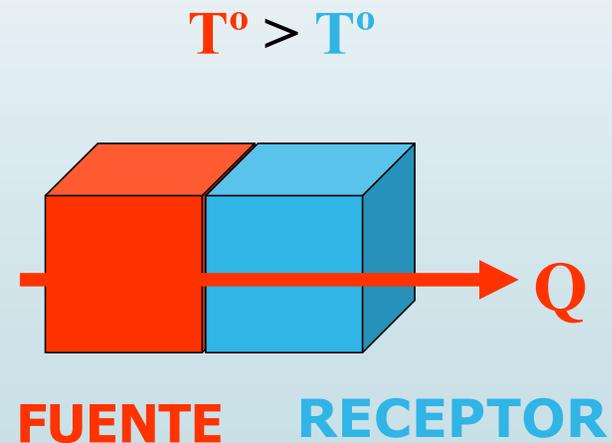
Cuando dos objetos que están a temperaturas diferentes se ponen en contacto térmico, el calor fluye desde el objeto de temperatura más elevada hacia el de temperatura más baja. El flujo neto se produce siempre en el sentido de la temperatura decreciente.

MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

INTERCAMBIO DE CALOR ENTRE CUERPOS CALIENTES Y FRIOS

- El calor, es una forma de transmisión de energía de un cuerpo a otro.
- Otra forma es el trabajo.
- El calor se puede definir como la energía en tránsito producida por una diferencia de temperaturas.

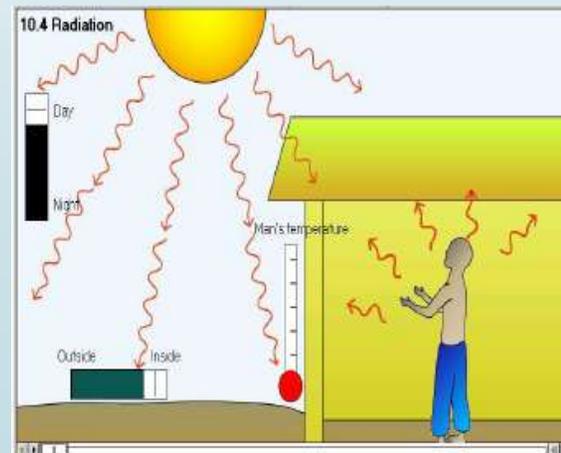
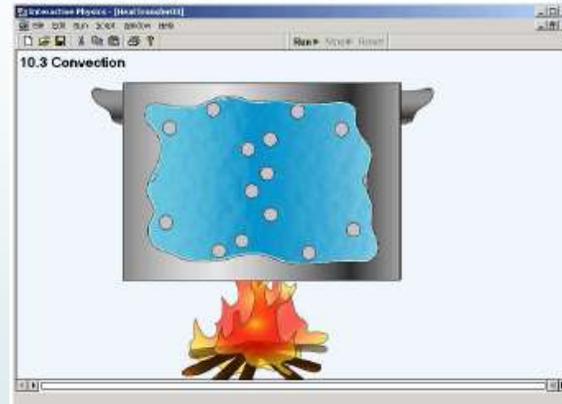
Es decir, la energía (el calor) se transferirá de un cuerpo a otro mientras las temperaturas sean diferentes. Si los cuerpos están a la misma temperatura, cesa la transferencia del calor.



MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

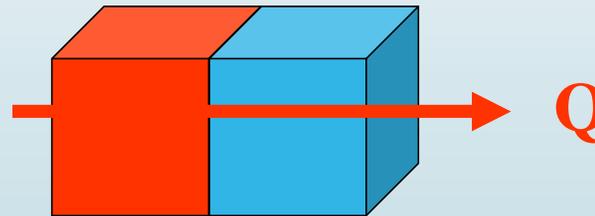
En cualquier industria de procesamiento de materia son numerosos los equipos que emplean la transferencia de calor.

Esos equipos pueden emplearse para calentar, enfriar, evaporar, condensar o para cambiar el estado físico de las corrientes líquidas o gaseosas que se emplean para procesarlos.



MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

ESTUDIO DE LAS VELOCIDADES A LAS QUE EL CALOR SE INTECAMBIA ENTRE FUENTES Y RECEPTORES DE CALOR



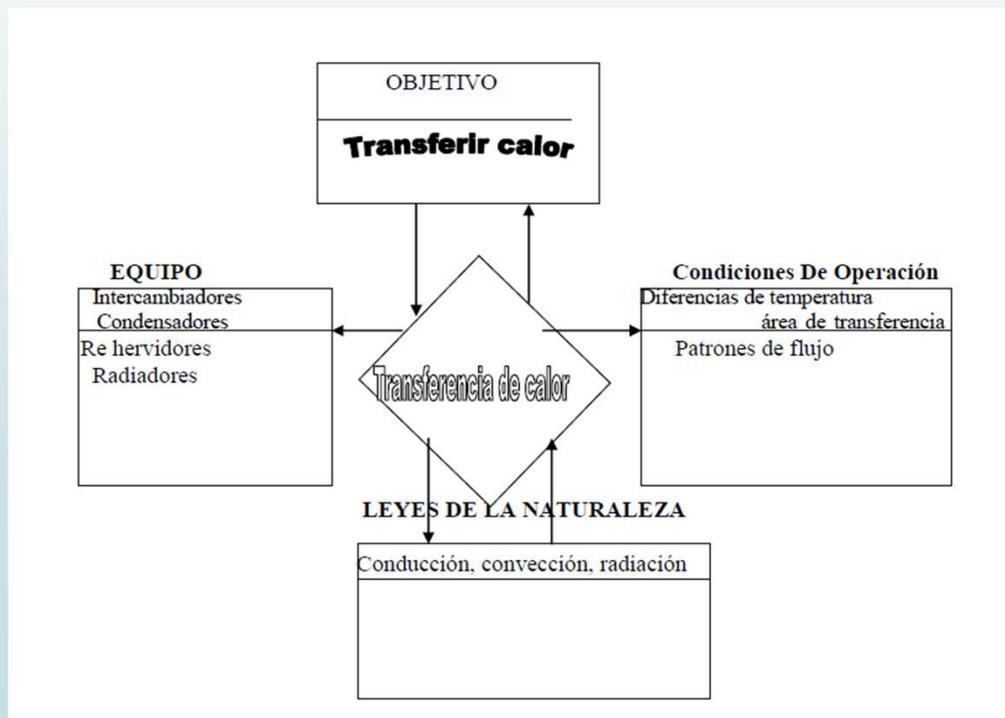
FUENTE

RECEPTOR

MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

El calor puede transferirse de un cuerpo a otro mediante tres mecanismos:

conducción, convección y radiación.



MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Objetivo

Mediante las operaciones de transferencia de calor se desea cambiar el contenido térmico de las corrientes de un proceso ya sea enfriando, calentando, evaporando, o condensando la corrientes.

Leyes de la naturaleza

Temperatura: se puede definir como una medida de la intensidad del calor. El calor y la temperatura están relacionados entre sí, pero son diferentes. La temperatura no es energía en tránsito, el calor sí.

Calor y trabajo: Son dos las formas en que se puede transmitir la energía a un objeto: el calor y el trabajo: El trabajo es la forma de transferir energía de un cuerpo a otro mediante una diferencia de presiones. El calor se transfiere a un objeto cuando existe una diferencia de temperaturas

Energía: es todo aquello capaz de producir movimiento en un cuerpo. La energía no se crea ni se destruye sólo se transforma. El calor se puede transferir mediante tres mecanismos: conducción, convección y radiación



MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

LA MATERIA SE PRESENTA EN TRES ESTADOS:

FASE SÓLIDA

FASE LIQUIDA

FASE GASEOSA

MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Mecanismos de transmisión de calor

Conducción: transferencia de energía desde cada porción de materia a la materia adyacente por contacto directo, sin intercambio, mezcla o flujo de cualquier material.

Convección: transferencia de energía mediante la mezcla íntima de distintas partes del material: se produce mezclado e intercambio de materia.

Convección natural: el origen del mezclado es la diferencia de densidades que acarrea una diferencia de temperatura.

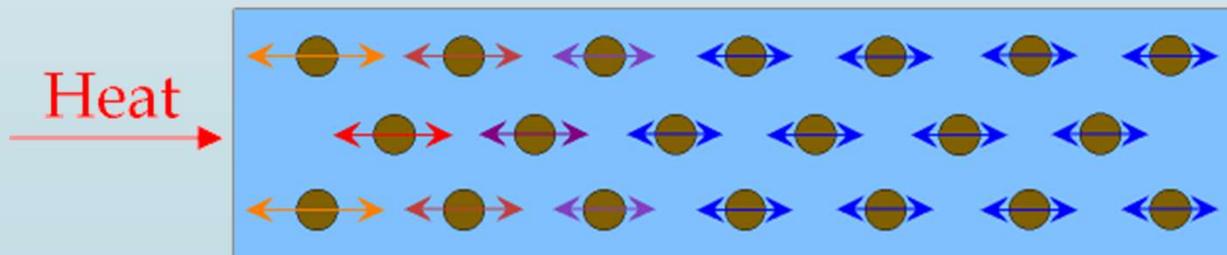
Convección forzada: la causa del mezclado es un agitador mecánico o una diferencia de presión (ventiladores, compresores...) impuesta externamente.

Radiación: transferencia de energía mediante ondas electromagnéticas, emanadas por los cuerpos calientes y absorbidas por los cuerpos fríos.

CONDUCCIÓN

La *conducción* es el único mecanismo de transmisión del calor posible en los medios sólidos opacos.

Cuando en tales medios existe un gradiente de temperatura, el calor se transmite de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura debido al contacto directo entre moléculas.





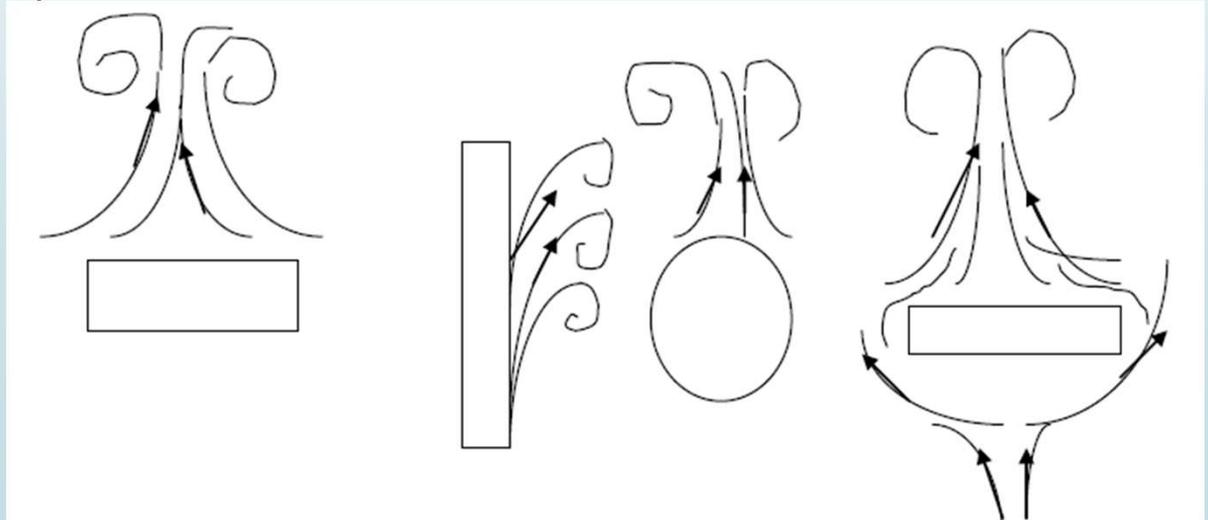
CONVECCION DEL CALOR

- La convección, es la transferencia de calor mediante el movimiento de un fluido.
- La convección se lleva a cabo porque un fluido en movimiento recoge energía de un cuerpo caliente o lleva energía a un cuerpo frío

CONVECCION DEL CALOR

Convección natural

- un vaso con agua sobre una parrilla.
- el agua del fondo se calienta más que en la superficie.
- La δ agua caliente es menor que la δ agua fría.
- El agua del fondo asciende y transmite su calor por convección natural.
- De manera semejante, ocurre con el aire que se pone en contacto con una superficie.





CONVECCION DEL CALOR

Convección forzada

- En la convección forzada las corrientes se producen por medio de una bomba, un agitador, un compresor o un ventilador.
- La magnitud de la transferencia de calor por convección forzada es de decenas a cientos de veces más grande que la que se logra por convección natural.

RADIACION TERMICA

MECANISMO DE TRANSFERENCIA

- **PROBABLEMENTE ES EL MECANISMO PRIMARIO DE TRANSMISION DE ENERGIA ENTRE MOLECULAS.**
- **LA FUENTE CALORICA NO NECESITA UN MEDIO PARA TRASMITIR SU ENERGIA.**
- **L A ENERGÍA PUEDE TRANSMITIRSE POR RADIACIÓN ENTRE UN EMISOR Y OTRO RECEPTOR A TRAVÉS DEL VACIO.**
- **L A RADIACION ES UNA FORMA DE ENERGIA QUE SE PROPAGA MEDIANTE ONDAS ELECTROMAGNETICAS**



EFEECTO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR

EFFECTO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR

Calor sensible

Se denomina calor sensible a aquella forma de energía que recibe un cuerpo sin cambiar su estado físico, mientras cambia su temperatura.

$$Q_s = (\Delta H) M = M C_{p_{\text{medio}}} (T_1 - T_2)$$

$C_{p_{\text{medio}}}$ es la capacidad calorífica media a presión constante

Capacidad Calorífica específica:

$$C_{p_{\text{medio}}} = \frac{C_{p \text{ a la temperatura } T_1} + C_{p \text{ a la temperatura } T_2}}{2}$$

ENTALPIA: Es una magnitud termodinámica, definida como , el flujo de energía en los procesos efectuados a presión constante, es decir, la cantidad de energía que un sistema intercambia con su entorno.

EFFECTO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR

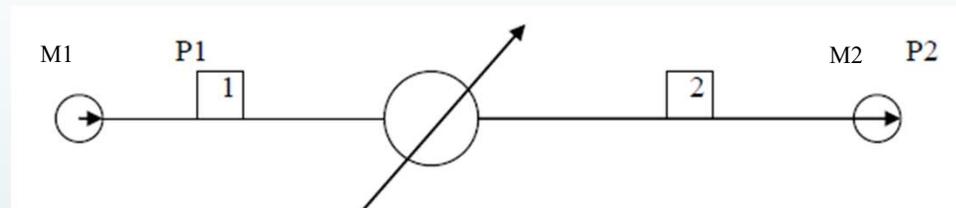
Calor latente

Un cuerpo recibe calor latente cuando al hacerlo cambia de estado físico. Este cambio se hace a temperatura constante.

$$Q_{\lambda} = \Delta H M = M \lambda$$

En donde λ es el calor latente del cambio de estado de la sustancia en cuestión. Los calores latentes varían con el estado físico y con la presión.

EFECTO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR



Alrededor de todo equipo de transferencia de calor se pueden efectuar balances de materia y energía, en el equipo dado sería:

Si $M1 = M2$; La masa entrante es igual a la saliente.

$$M (\Delta E) = Q$$

En donde ΔE es el cambio de energía.

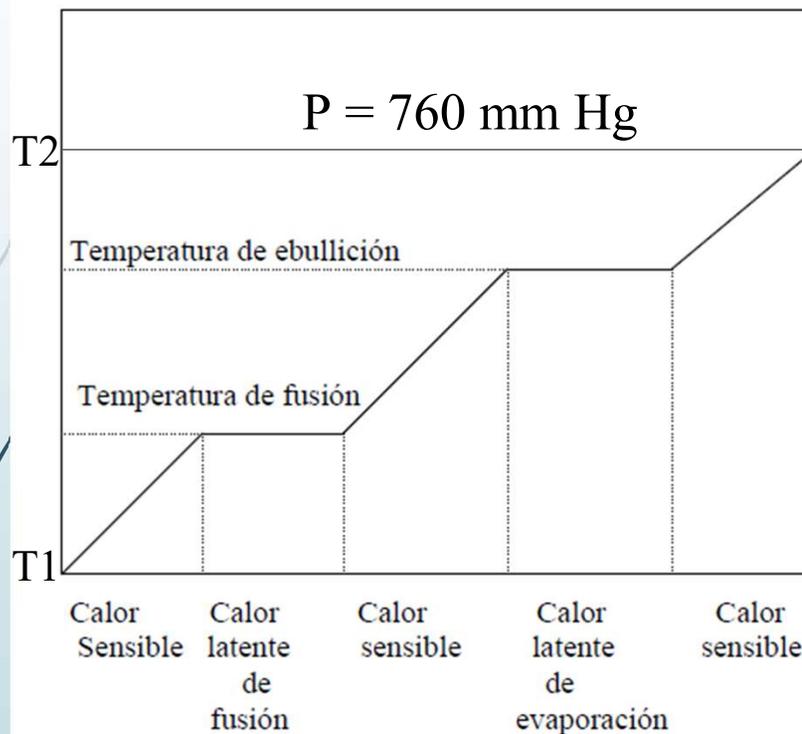
Para los equipos de transferencia de calor

$$\Delta E = \Delta H$$

Siendo H la entalpía, por lo tanto:

$$M (\Delta H) = Q$$

EFFECTO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR



Al sumarse calores latentes y calores sensibles, se obtiene la energía que se requiere para llevar a una sustancia de una temperatura a otra.

$$Q = M C_p \text{ solido} (T_f - T_1) + M \lambda_{\text{fusión}} + M C_p \text{ liquido} (T_e - T_f) + M \lambda_{\text{ebullición}} + M C_p \text{ vapor} (T_2 - T_e)$$

EFEECTO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR

EJEMPLOS PRACTICOS

Ejemplo 1

¿Qué cantidad de calor habrá que suministrarle a 1 Kg de agua, que esta a una temperatura de 10 °C y queremos que su temperatura sea de 350 °C

Capacidad calorífica específica del agua (c_p): 1 Kcal/Kg °C

$$Q_s = M c_p \Delta T$$

Calor latente de vaporización del agua (λ): 540 Kcal/Kg

$$Q_\lambda = M \lambda$$

EFFECTO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR

SOLUCION

$$Q_s = M c_p (T_2 - T_1)$$

$$Q_s = 1 \text{ Kg } 1 \text{ Kcal/Kg } ^\circ \text{C } (100 ^\circ \text{C} - 10 ^\circ \text{C})$$

$$Q_s = 90 \text{ Kcal}$$

$$Q_\lambda = M \lambda$$

$$Q_\lambda = 1 \text{ Kg } 540 \text{ Kcal/Kg}$$

$$Q_\lambda = 540 \text{ Kcal}$$

$$Q_s = M c_p (T_3 - T_2)$$

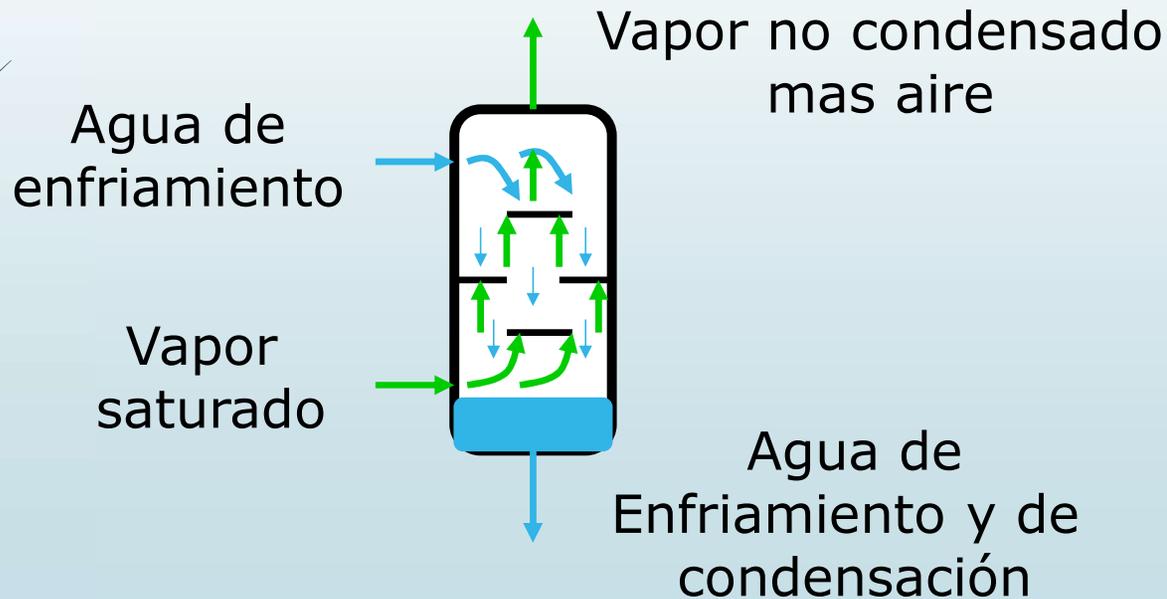
$$Q_s = 1 \text{ Kg } 1 \text{ Kcal/Kg } ^\circ \text{C } (350 ^\circ \text{C} - 100 ^\circ \text{C})$$

$$Q_s = 250 \text{ Kcal}$$

$$Q_T = 90 \text{ Kcal} + 540 \text{ Kcal} + 250 \text{ Kcal}$$

EFFECTO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR

Cuantos Kg/h de agua se necesitan para enfriar 500 Kg/h de vapor saturado, en un condensador barométrico, si se dispone de agua a 25°C



MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Mecanismos de transmisión de calor

Conducción: transferencia de energía desde cada porción de materia a la materia adyacente por contacto directo, sin intercambio, mezcla o flujo de cualquier material.

Convección: transferencia de energía mediante la mezcla íntima de distintas partes del material: se produce mezclado e intercambio de materia.

Convección natural: el origen del mezclado es la diferencia de densidades que acarrea una diferencia de temperatura.

Convección forzada: la causa del mezclado es un agitador mecánico o una diferencia de presión (ventiladores, compresores...) impuesta externamente.

Radiación: transferencia de energía mediante ondas electromagnéticas, emanadas por los cuerpos calientes y absorbidas por los cuerpos fríos.

MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Mecanismos de transmisión de calor

Conducción: transferencia de energía desde cada porción de materia a la materia adyacente por contacto directo, sin intercambio, mezcla o flujo de cualquier material.

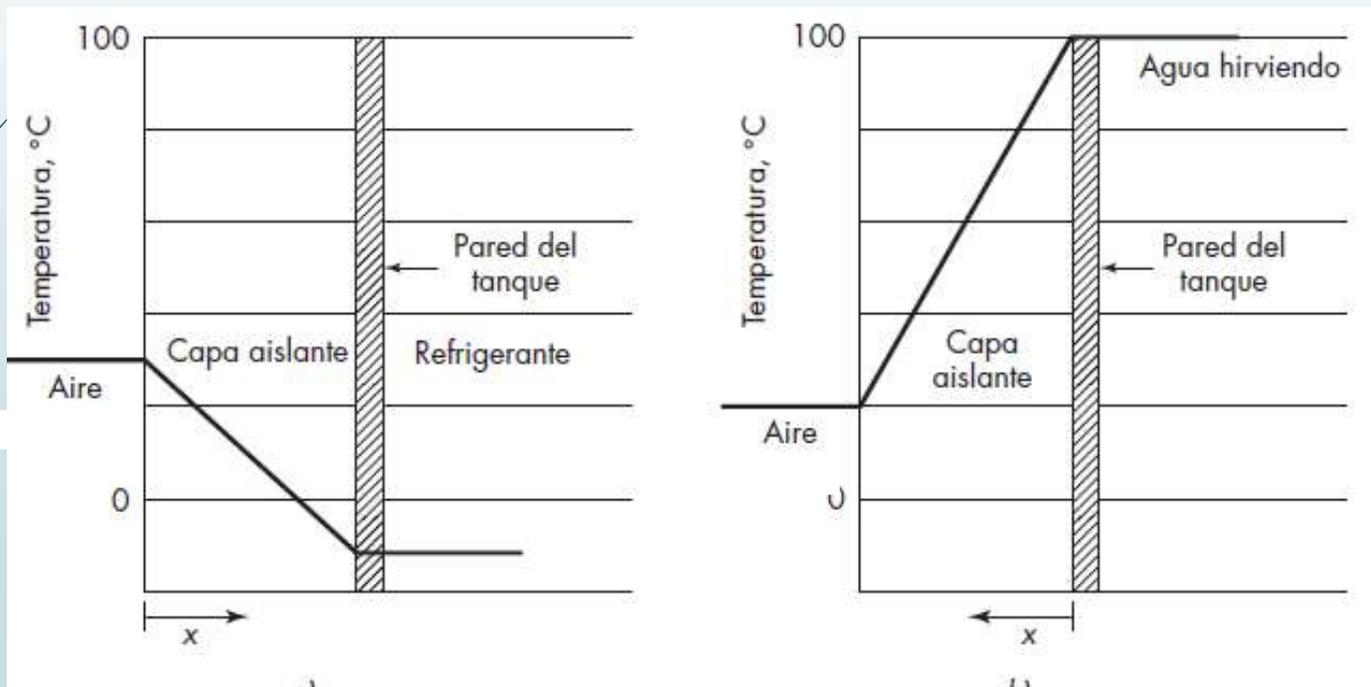
$$Q = k \frac{A}{x} \Delta T$$

MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

CONDUCCIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO

Gradientes de temperatura en el exterior de tanques aislados:

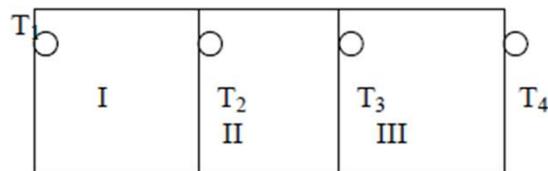
a) flujo de calor hacia el tanque; b) flujo de calor desde el tanque.



MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Transferencia de calor por conducción a través de varias resistencias

- Con frecuencia se suelen poner varios cuerpos de materiales diferentes en serie (uno a continuación del otro) por lo que el calor debe atravesar cada uno de ellos.
- A régimen permanente el calor que fluye a través de cada pared debe ser el mismo.



$$Q_1 = \frac{k_1 A_1 \Delta T_1}{x_1} = \frac{k_2 A_2 \Delta T_2}{x_2} = \frac{k_3 A_3 \Delta T_3}{x_3}$$

$$\text{Si } R = \frac{x}{kA}$$

$$Q = \frac{\Delta T_1}{R_1} = \frac{\Delta T_2}{R_2} = \frac{\Delta T_3}{R_3} = \frac{\Sigma \Delta T}{\Sigma R} = \frac{T_1 - T_4}{\Sigma R}$$

En donde:

$$\Sigma R = R_1 + R_2 + R_3$$

$$\text{Si } A_1 = A_2 = A_3$$

$$Q = \frac{(T_1 - T_4)A}{\frac{x_1}{k_1} + \frac{x_2}{k_2} + \frac{x_3}{k_3}}$$

Conductividades térmicas de algunos materiales a temperatura ambiente

Material	k ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	
→ Vapor de agua		} Malos conductores
Aire	0.026	
→ Agua líquida		
Mercurio	8.4	} Buenos conductores
Espuma de poliestireno	0.036	
Papel	0.13	} Buenos conductores
Vidrio	0.35-1.3	
→ Hielo		} Buenos conductores
Plomo	34	
Acero	45	
Aluminio	204	
Cobre	380	

La conductividad térmica cambia con el estado de agregación

... pero la capacidad de transporte de calor no depende sólo de la conducción

MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Mecanismos de transmisión de calor

Convección: transferencia de energía mediante la mezcla íntima de distintas partes del material: se produce mezclado e intercambio de materia.

$$Q = h A \Delta t$$

Convección natural: el origen del mezclado es la diferencia de densidades que acarrea una diferencia de temperatura.

Convección forzada: la causa del mezclado es un agitador mecánico o una diferencia de presión (ventiladores, compresores...) impuesta externamente.

El flujo de calor convectivo por unidad de area es proporcional a la diferencia entre la temperatura de la superficie y la temperatura del fluido, como se establece en la ley de Newton de enfriamiento

MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

El coeficiente de convección natural para aire se puede obtener por:

- cilindros o planos verticales:

$$h = 1.127(\Delta T)^{\frac{1}{3}} \quad \text{si } L > 0.4 \text{ m}$$

$$h = 1.217 \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{0.25} \quad \text{si } L < 0.4 \text{ m}$$

$$h \text{ en } \frac{\text{kcal}}{\text{h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

- cilindros horizontales: $h = 1.305\Delta T^{\frac{1}{3}}$

- placas calientes con la cara hacia abajo o placas frías con la cara hacia abajo

$$h = 1.305\Delta T^{\frac{1}{3}}$$

- placas frías con la cara hacia arriba o placas calientes con la cara hacia abajo

$$h = 0.5035 \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{0.25}$$

MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Convección forzada

- En la convección forzada las corrientes se producen por medio de una bomba, un agitador, un compresor o un ventilador.
- La magnitud de la transferencia de calor por convección forzada es de decenas a cientos de veces más grande que la que se logra por convección natural.

$Q = h A \Delta T$ h = coeficiente de transferencia de calor por convección forzada.

h depende:

- geometría del sistema
- velocidad del fluido
- de las propiedades de este
- Se emplean correlaciones apropiadas para cada condición específica.
- Estas correlaciones dependen de números adimensionales-
- tales como el Nusselt, Reynolds, Prandtl, Grashof, Graetz, etc.

MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

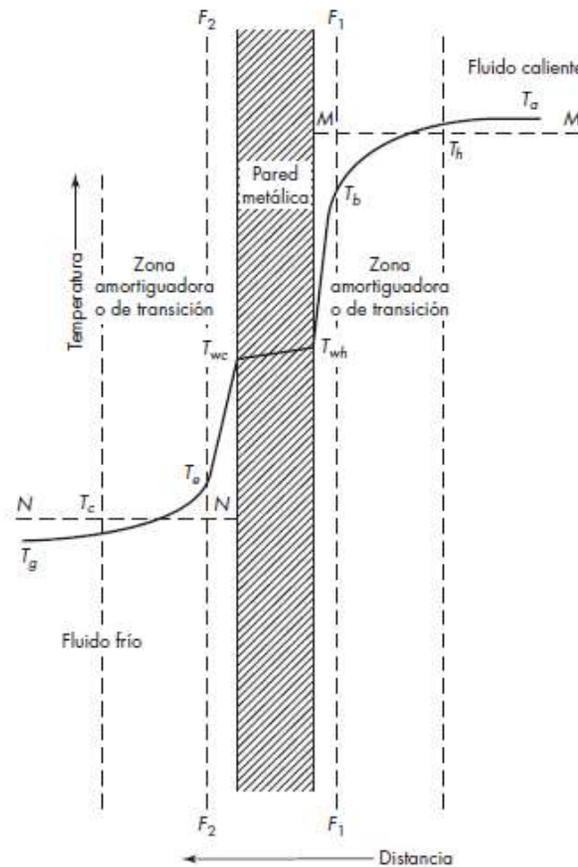
Coefficientes aproximados de película

$$h_i \text{ ó } h_o \quad \frac{\text{kcal}}{\text{h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

<i>Sin cambio de estado</i>	
Agua	1450 a 9760
Gases	15 a 250
Solventes orgánicos	300 a 2500
Aceites	50 a 585
<i>Condensación</i>	
Vapor	5000 a 15000
Solventes orgánicos	730 a 2500
Aceites ligeros	1000 a 2000
Aceites pesados (vacío)	100 a 250
Amoniaco	2500 a 5000
<i>Evaporación</i>	
Agua	4000 a 9760
Solventes orgánicos	500 a 1500
Amoniaco	1000 a 2000
Aceites ligeros	730 a 1460
Aceites pesados	50 a 250

MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

CONDUCCION + CONVECCION



MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

RESISTENCIA DE LA PELICULA DEL FLUIDO FRIO

RESISTENCIA DE LA PARED DEL TUBO

RESISTENCIA DE LA PELICULA DEL FLUIDO CALIENTE

$$\Sigma R = \frac{1}{h_i} + \frac{L_m}{k_m} + \frac{1}{h_o}$$

MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

$\Sigma R = \text{RESISTENCIA TOTAL}$

$$\Sigma R = 1/U$$

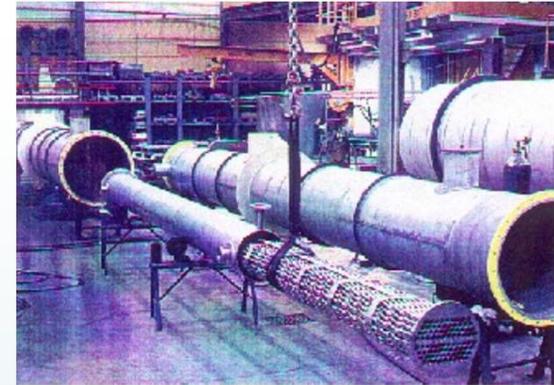
$U = \text{COEFICIENTE TOTAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR}$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i (D_i / D_o)} + \frac{2,3 D_o}{2 k_m} \log \frac{D_o}{D_i} + \frac{1}{h_o}$$

$$Q = U A \Delta T$$

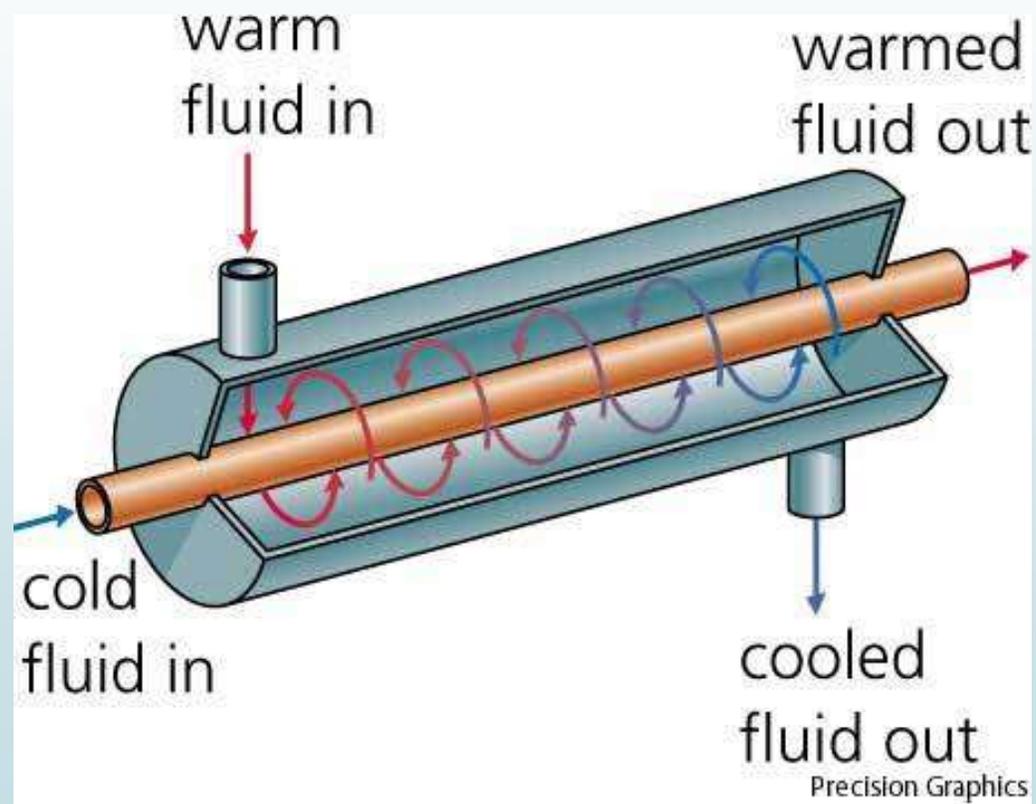
$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i (D_i / D_o)} + \frac{1}{h_o}$$

Definición

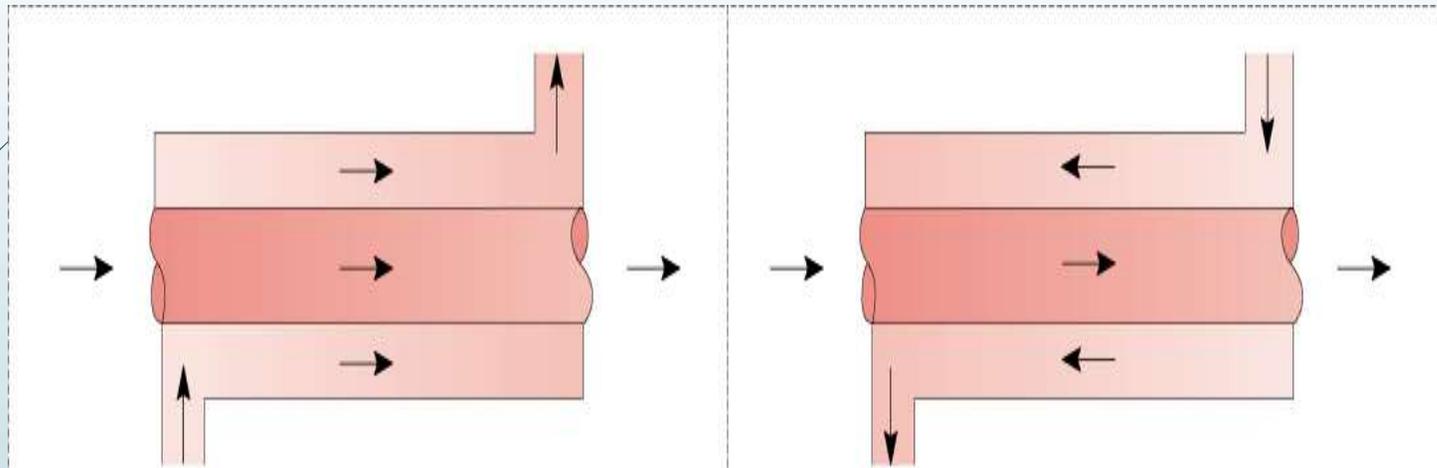


Un intercambiador de calor es un equipo mecánico construido para transferir calor entre dos fluidos a diferente temperatura que están separados por una pared metálica. Para los cálculos convencionales se desprecia la transferencia por radiación y solamente se tienen en cuenta los cálculos por **conducción y convección**.

Diagrama básico de un intercambiador



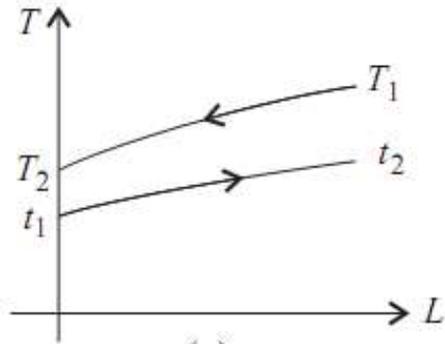
Tipos de circulación



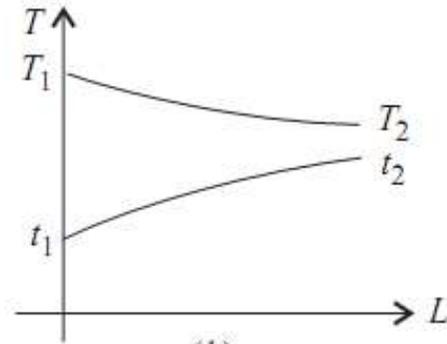
Parallel Flow

Counterflow

Tipos de circulación



(a)



(b)



Tipos de circulación

► Contracorriente

El intercambio es menor en cocorriente a igualdad de condiciones.

En contracorriente, se puede lograr que el fluido frío, salga a mayor temperatura que la salida del fluido caliente.

En la industria es más común que uno de los fluidos tenga más de un paso por el equipo.

► Cocorriente

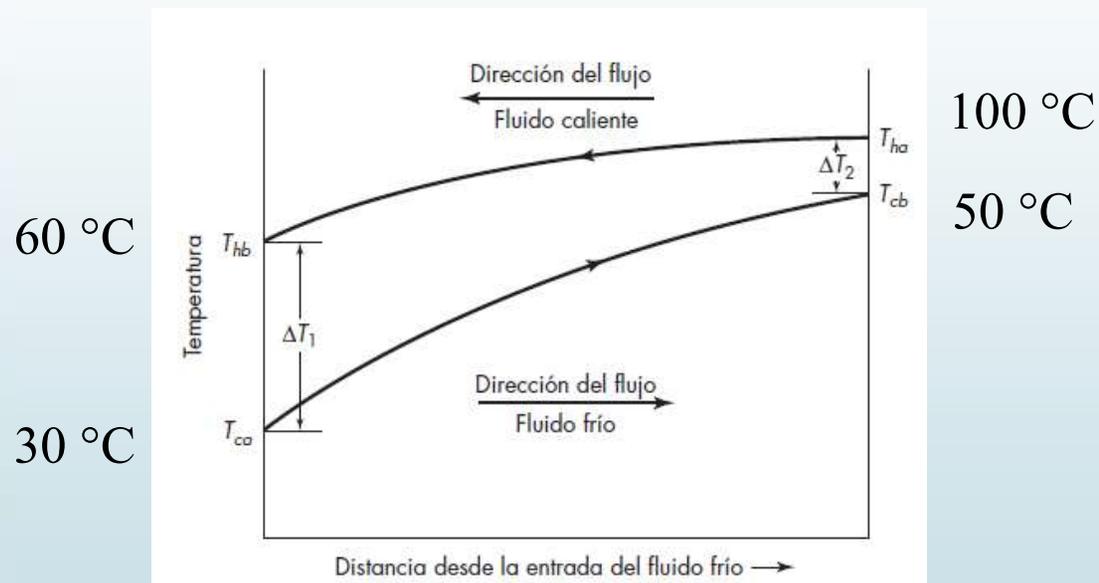
Ecuación cinética de transmisión de calor

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad \Delta T = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}}$$

Esta fórmula es válida para geometría simple, en caso del intercambiador de tubo y coraza sería un solo paso por los tubos y un solo paso por la coraza.

Ecuación cinética de transmisión de calor

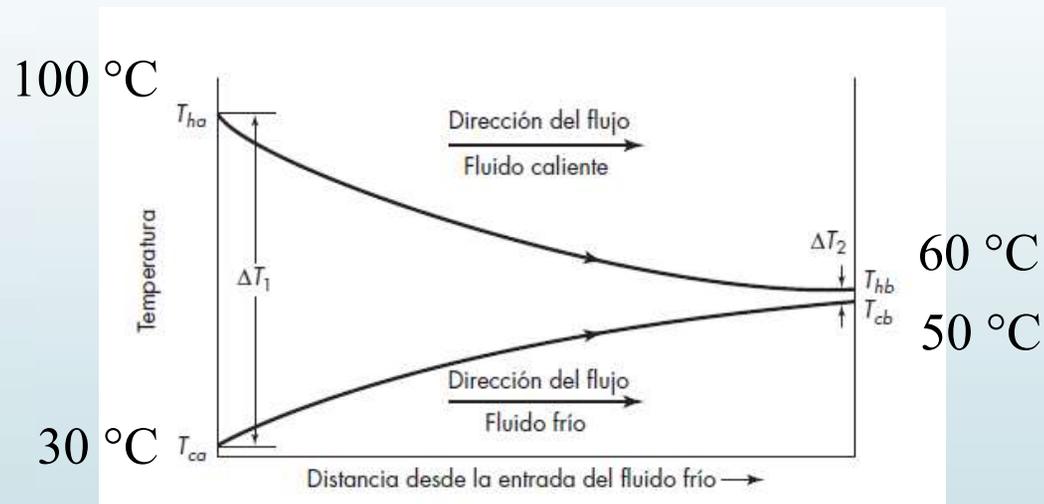
CONTRACORRIENTE



$$\Delta T = \frac{(100 - 50) - (60 - 30)}{\ln \frac{50}{30}} = 39,15^\circ$$

Ecuación cinética de transmisión de calor

CO-CORRIENTE



$$\Delta T = \frac{(70 - 10)}{\ln \frac{70}{10}} = 30,83^\circ$$

Cálculo del diámetro del tubo, espesor y longitud.

- El tamaño nominal de los tubos de un intercambiador de calor es el diámetro exterior en pulgadas, los valores típicos son $5/8$, $3/4$ y 1 in. Con longitudes de 8,10,12, 16 y 20 pies. Siendo la típica de 16 pies.
- Los espesores de tubos está dados según BWG y se determinan por la presión de trabajo y el sobreespesor de corrosión.
- La configuración de los tubos puede ser cuadrada, cuadrada girada 90° , o triangular. La cuadrada se utiliza por facilidad de limpieza mecánica.

Las dimensiones típicas son:

Diámetro del tubo	Separación entre tubos	Configuración
$5/8$	$13/16$	Triangular
$5/8$	$7/8$	Cuadrada
$5/8$	$7/8$	Cuadrada girada
$3/4$	$15/16$	Triangular
$3/4$	1	Triangular
$3/4$	1	Cuadrada
$3/4$	1	Cuadrada girada
1	$1-1/4$	Triangular
1	$1-1/4$	Cuadrada
1	$1-1/4$	Cuadrada girada

Cálculo de Área del Intercambiador

- $A = \frac{Q}{U * \Delta T_{ML}}$

- $A = D * \pi * L * N^{\circ}tubos$

- $N^{\circ}tubos = \frac{A}{\pi * D * L}$

Coeficiente Global de transferencia de Calor (U) ó Resistencia ($1/U$)

$$1/U = \frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_{io}} + \frac{e}{k} + Ri + Ro$$

- $\frac{1}{h_o}$: resistencia de película laminar externa
- $\frac{1}{h_{io}}$: resistencia de película laminar interna
- e : espesor de tubo
- k : conductividad del materiales del tubo
- Ri / Ro : suciedad, incrustaciones de tubo, pared interna y externa.

Este coeficiente depende de la configuración del intercambiador el cual es función del área de intercambio, velocidad de cada fluido (Reynolds) y los fluidos de trabajo.

Valores de Coeficientes Globales (U)

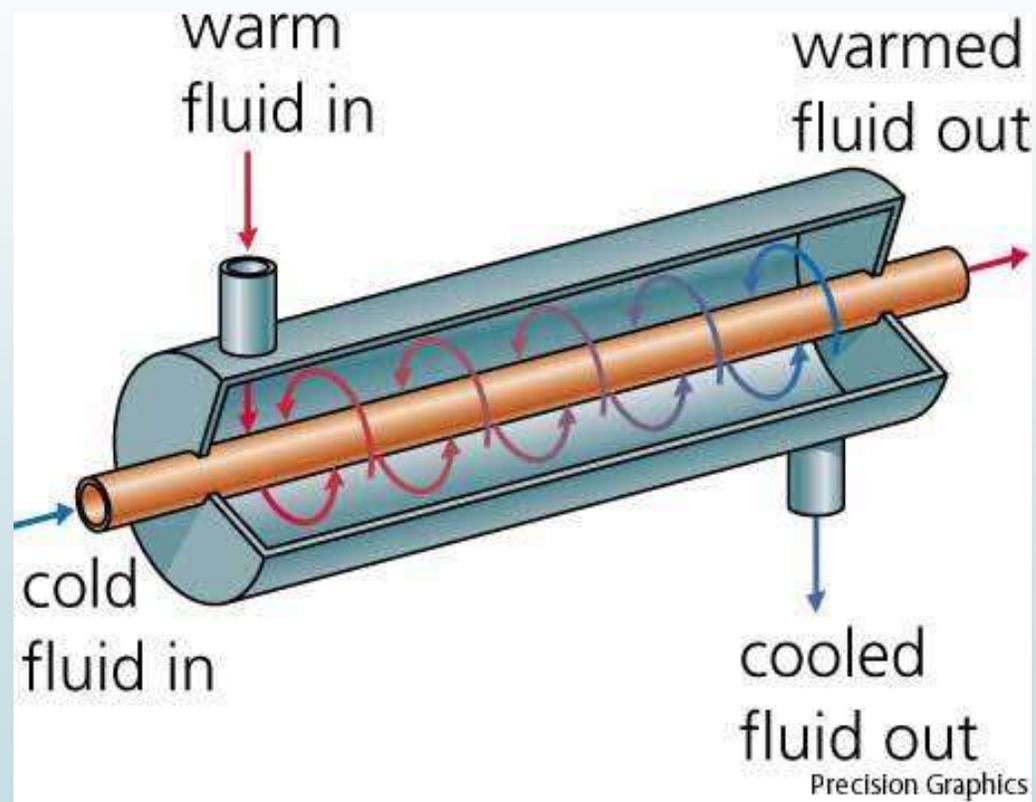
Tablas de U

sistema ingles
Btu/hr-ft² °F

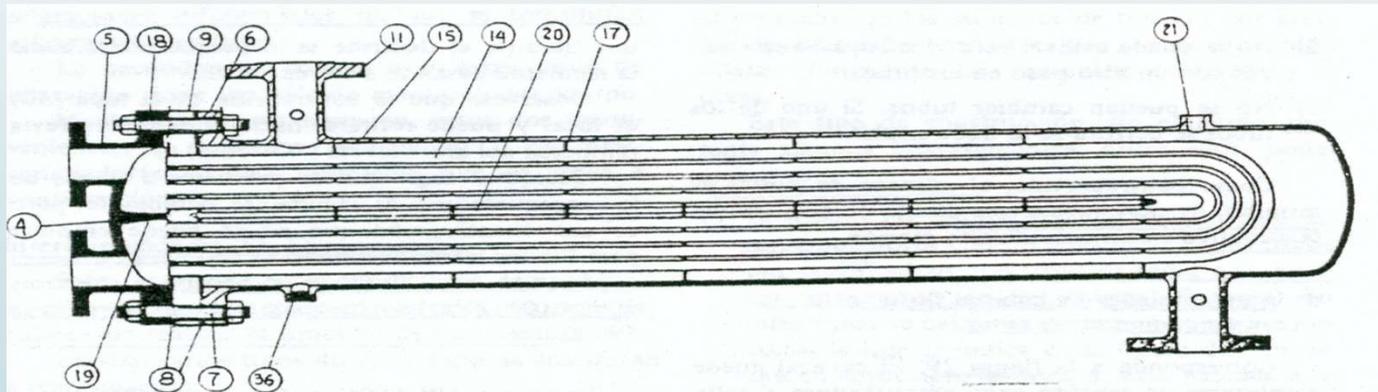
sistema Internacional
W/m² °K

Fluido caliente	Fluido frio	U (W/m ² k)
Agua	Agua	1300 – 2500
Amoniaco	Agua	1000 – 2500
Gas	Agua	10 – 250
Gas	Gas	10 - 60
Gas	Orgánico liviano	20 – 100
Gas	Orgánico pesado	20 – 60
Orgánico liviano (< 0,5 cP)	Gas	20 – 100
Orgánico pesado (> 1 cP)	Gas	20 - 60
Agua	Aire comprimido	50 – 70
Agua	Aceite lubricante	110 – 340
Orgánico liviano	Agua	370 – 750
Orgánico mediano (0,5 – 1 cP)	Agua	240 – 650
Orgánico pesado	Aceite lubricante	25 – 400
Vapor	Agua	2200 – 3600
Vapor	Amoniaco	1000 – 3400
Agua	Amoniaco (condensación)	850 – 1500
Agua	Freón-13 (ebullición)	280 – 1000
Vapor	Gases	25 – 240
Vapor	Orgánicos livianos	490 – 1000
Vapor	Orgánicos medianos	250 – 500
Vapor	Orgánicos pesados	30 – 300
Orgánicos livianos	Orgánicos livianos	200 – 350
Orgánicos medianos	Orgánicos medianos	100 – 300
Orgánicos pesados	Orgánicos pesados	60 – 200
Orgánicos livianos	Orgánicos pesados	50 – 200
Orgánicos pesados	Orgánicos livianos	150 – 300
Petróleo	Gasóleo	130 – 320
Vapor (Evaporador)	Agua	1500 – 6000
Vapor (Evaporador)	Otros fluidos	300 – 2000
Evaporador de refrigeración		300 – 1000
Vapor (Condensador)	Agua	1000 – 4000
Vapor (Condensador)	Otros fluidos	300 – 1000

Diagrama básico de un intercambiador



Intercambiadores de mas de un paso



Ecuación cinética de transmisión de calor

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad \Delta T = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}}$$

Esta fórmula es válida para geometría simple, en caso del intercambiador de tubo y coraza sería un solo paso por los tubos y un solo paso por la coraza.

Factor de corrección Ft

Se usa ya que las fórmulas anteriores no son aplicables, porque no conocemos las temperaturas intermedias.

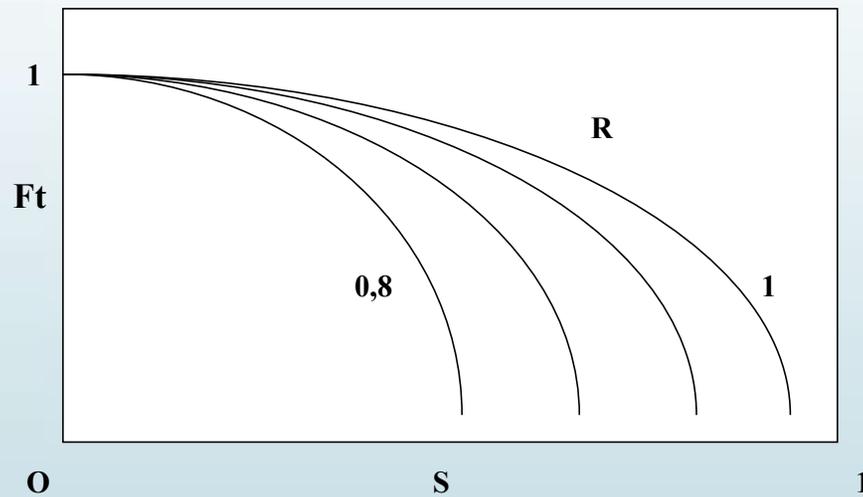
Ft nos da una medida del aprovechamiento del área de intercambio disponible.

$$0 < Ft < 1 \quad Ft = f(R, S, \text{arreglo})$$

R: cociente de las capacidades calóricas

S: parámetro de la eficiencia térmica de un intercambiador

Factor de corrección Ft



$$\Delta T_{\text{verdadero}} = \Delta T \cdot F_t$$

$$Q = U \cdot A \cdot F_t \cdot \text{MLDT}$$

Para un intercambiador bien diseñado: $F_t > 0,75$

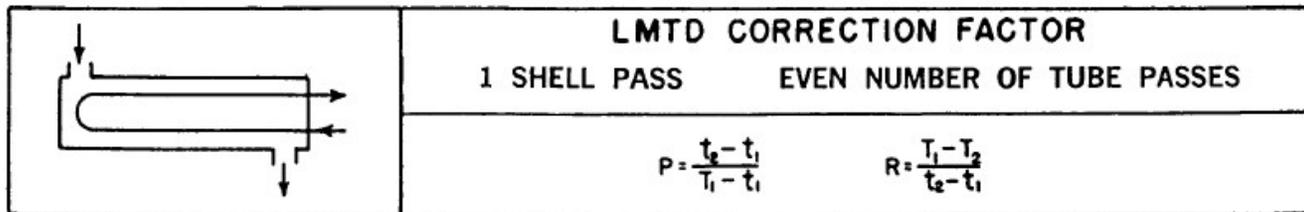
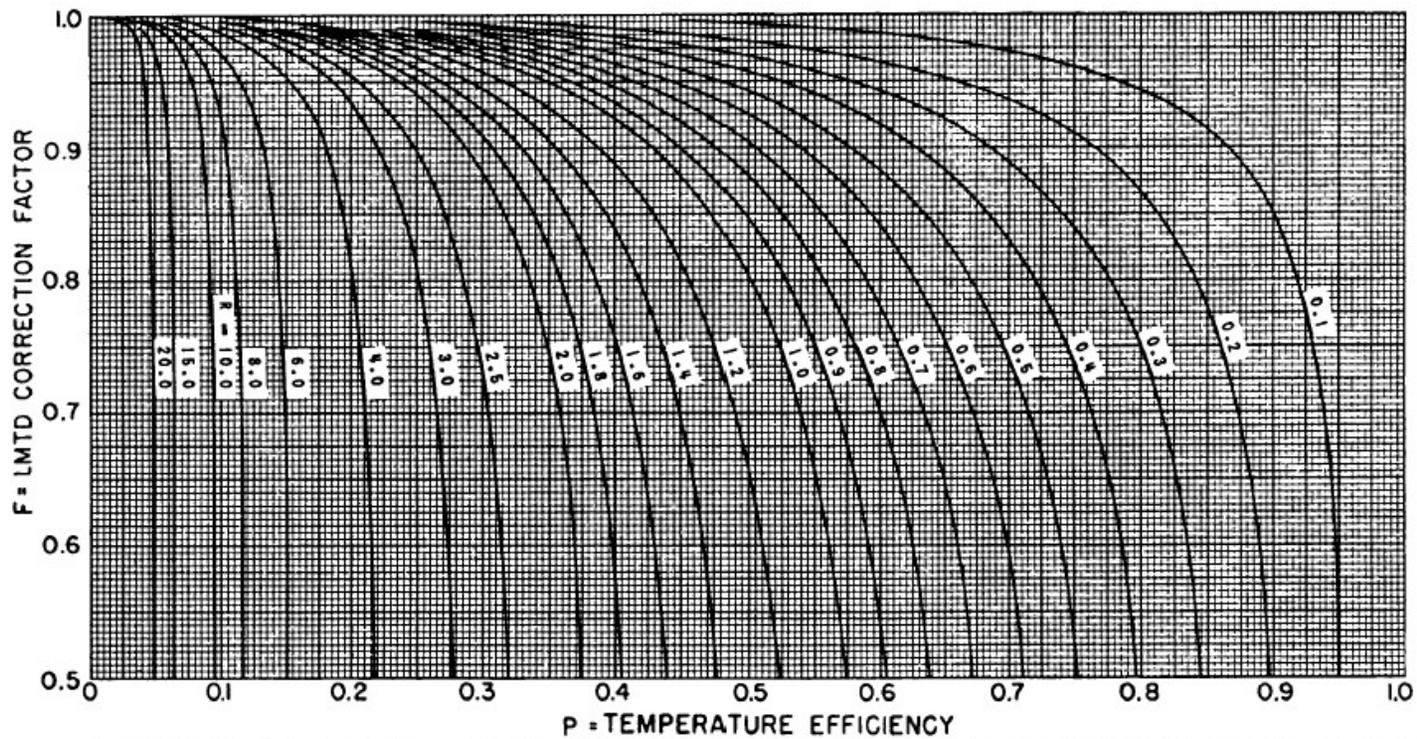
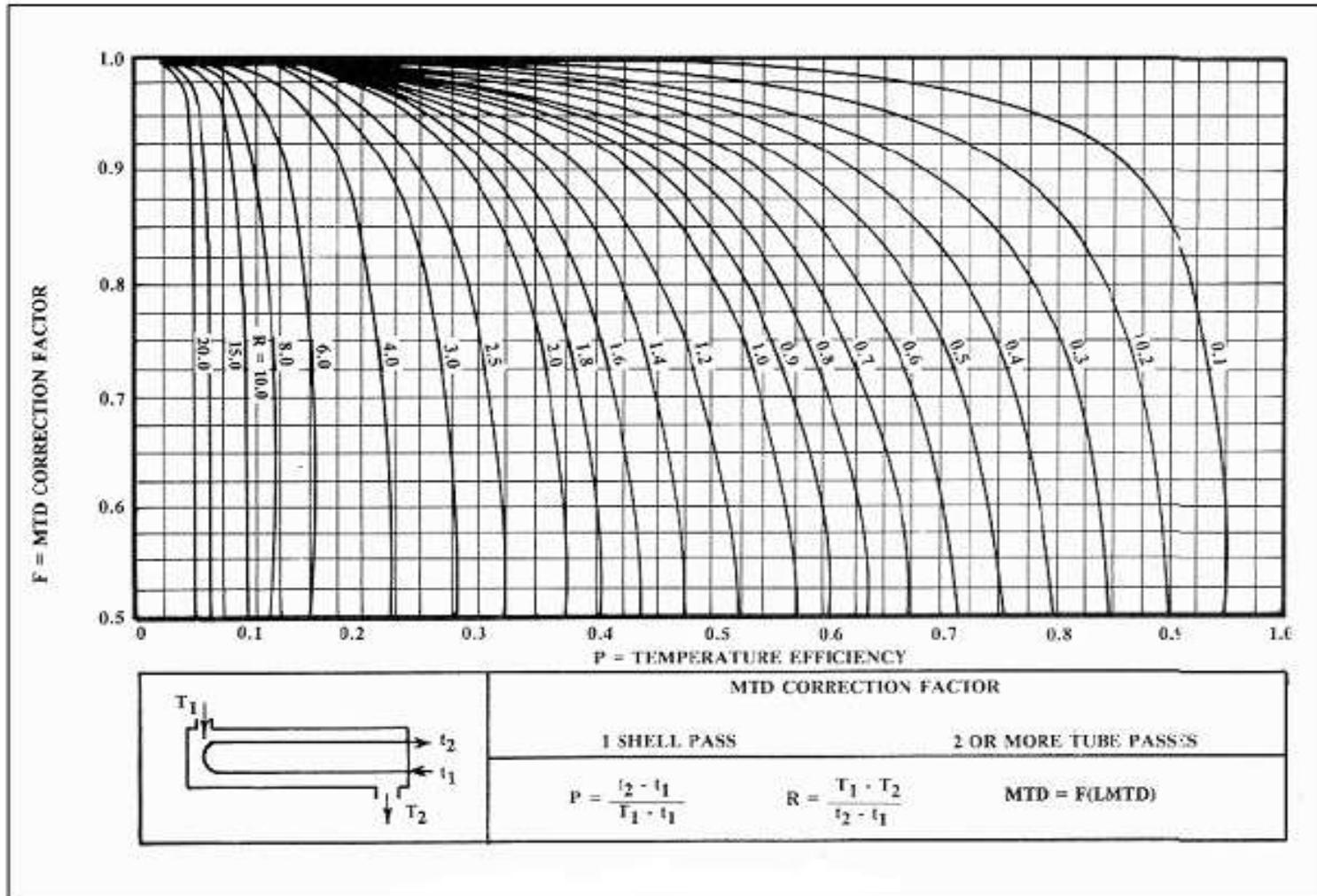


Figure 10-34A. MTD correction factor, 1 shell pass, even number of tube passes. (Figures 10-34A–10-34J used by permission: *Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Association*, 7th Ed., Figure T-32, ©1988. Tubular Exchanger Manufacturers Association, Inc.)

F_t Correction Factor for a 1 – n Heat Exchanger
(where n is even)



Ensuciamiento (fouling factor)

La deposición de suciedad, se convertirá en un material aislante.

Se ve afectada la distribución de velocidades cercanas a la capa límite, reduciéndose la transferencia de calor.

En los manuales se encuentran tabuladas las resistencias de ensuciamiento. Dependen de: tipo de fluido, temperatura, y tiempo de operación

TABLA 12. FACTORES DE **OBSTRUCCION** *

Temperatura del medio calefactor	Hasta 240°F		240–400°F †	
	125°F o menos		Más de 125°F	
Temperatura del agua	Velocidad del agua, pps		Velocidad del agua, pps	
Agua	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	0.022
Mississippi	0.003	0.002	0.004	0.003
Delaware, Schylkill	0.003	0.002	0.004	0.003

FRACCIONES DE PETROLEO

Aceites (industriales) :		Líquidos (industriales) :	
Combustorio	0.005	Orgánicos	0.001
Aceite de recirculación lim- pi0	0.001	Líquidos refrigerantes, ca- lefacción, enfriadores, o evaporantes	0.001
Aceites para maquinarias y transformadores	0.001	Salmueras (enfriamiento).	0.001
Aceite para quenching ...	0.004	Unidades de destilación at- mosférica :	
Aceites vegetales	0.003	Fondos residuales , menos de 25°API	0.005
Gases, vapores (industriales) :		Fondos residuales, de 25° API o más	0.002
Gas de hornos de coque, gas manufacturado ...	0.01		

APPENDIX VII TYPICAL FOULING RESISTANCE COEFFICIENTS

COOLING WATER FOULING RESISTANCES/COEFFICIENTS					
Hot Fluid Temperature		Up to 240 °F		240 to 400 °F	
Water	Temperature	Up to 125 °F		Over 125 °F	
	Velocity	Up to 3 ft/s	Over 3 ft/s	Up to 3 ft/s	Over 3 ft/s
	Unit Select	Resistance ft ² h°F / Btu			
Resistance ft ² h°F / Btu					
Boiler Blowdown		2.00E-03	2.00E-03	2.00E-03	2.00E-03
Boiler Feed (Treated)		1.00E-03	5.00E-04	1.00E-03	1.00E-03
Brackish Water		2.00E-03	1.00E-03	3.00E-03	2.00E-03
City Water		1.00E-03	1.00E-03	2.00E-03	2.00E-03
Condensate		5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04
Cooling Tower	Treated MakeUp	1.00E-03	1.00E-03	2.00E-03	2.00E-03
	Untreated MakeUp	3.00E-03	3.00E-03	5.00E-03	4.00E-03
Distilled Water		5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04
Engine Jacket (Closed System)		1.00E-03	1.00E-03	1.00E-03	1.00E-03
Hard Water (Over 15 Grains/Gal)		3.00E-03	3.00E-03	5.00E-03	5.00E-03
Muddy Or Silty Water		3.00E-03	2.00E-03	4.00E-03	3.00E-03
River Water	Minimum	2.00E-03	1.00E-03	3.00E-03	2.00E-03
	Average	3.00E-03	2.00E-03	4.00E-03	3.00E-03
Sea Water		5.00E-04	5.00E-04	1.00E-03	1.00E-03
Spray Pond	Treated MakeUp	1.00E-03	1.00E-03	2.00E-03	2.00E-03
	Untreated MakeUp	3.00E-03	3.00E-03	5.00E-03	4.00E-03

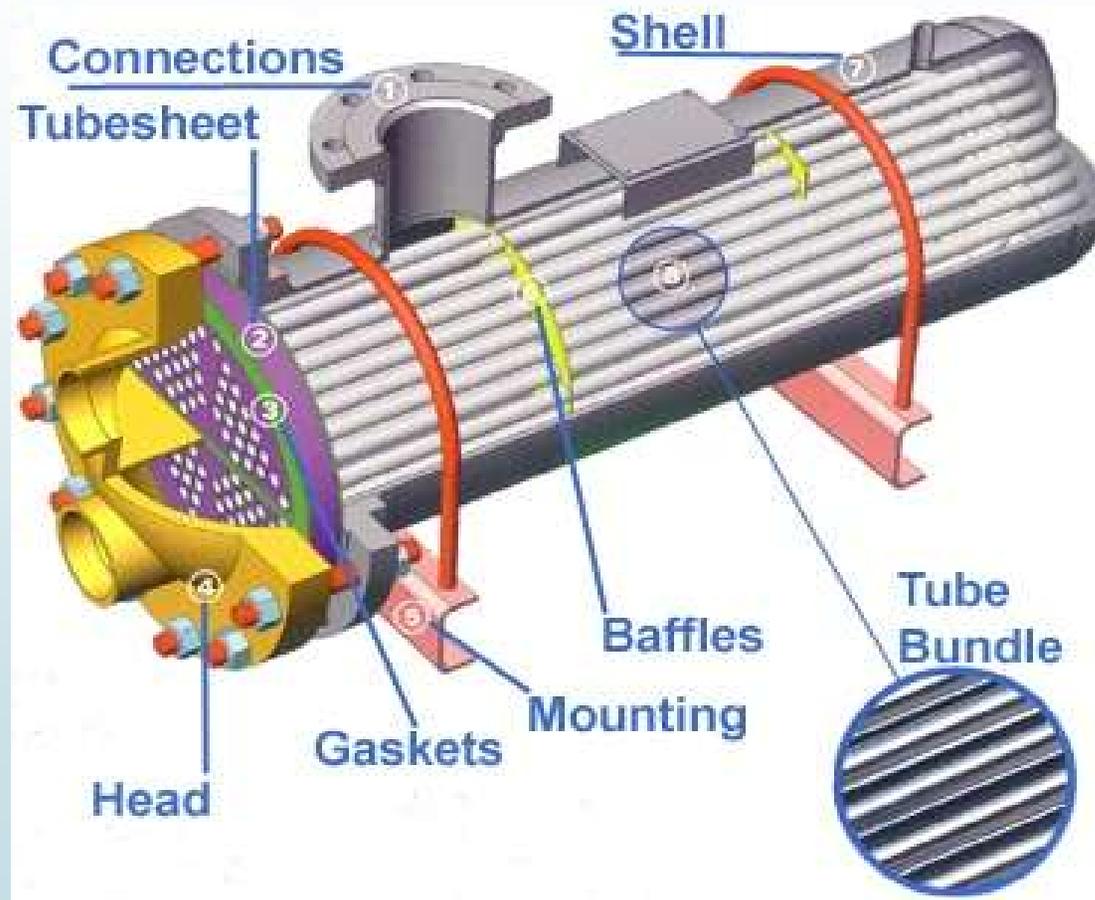
CHEMICAL PROCESSING FOULING RESISTANCES/COEFFICIENTS		
Fouling Coefficient Units	Resistance ft ² h°F / Btu	
Gases & Vapors	Acid Gases	2.50E-03
	Stable Overhead Products	1.00E-03
	Solvent Vapors	1.00E-03
Liquids	Caustic Solutions	2.00E-03
	DEG And TEG Solutions	2.00E-03
	MEA And DEA Solutions	2.00E-03
	Stable Side Draw and Bottom Product	1.50E-03
	Vegetable Oils	3.00E-03

Tipos de Intercambiadores de calor

Intercambiadores de tubo y coraza

- ***INTERCAMBIADORES DE TUBO Y CORAZA***
- ***INTERCAMBIADORES DE CALOR DE TUBOS RETORCIDOS***
- ***INTERCAMBIADOR DE CALOR SPIRAL***
- ***INTERCAMBIADORES DE PLACA***
- ***INTERCAMBIADORES DE SUPERFICIE RASCADA***

Intercambiadores tubulares

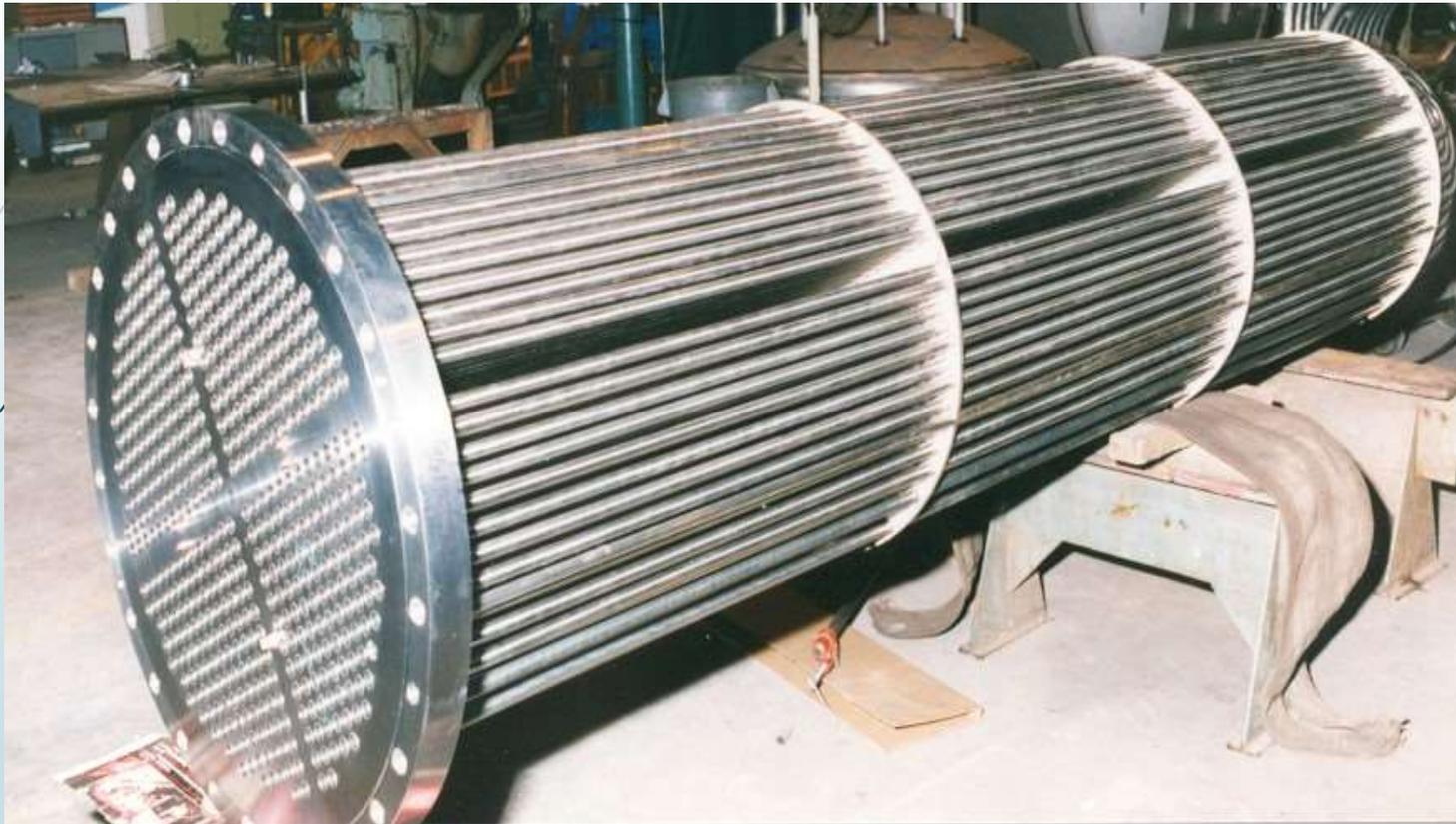


Intercambiadores tubulares



Ing.

Intercambiadores tubulares



Intercambiadores tubulares



Intercambiadores tubulares



Ing.

Normas constructivas

Código ASME

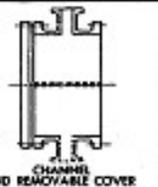
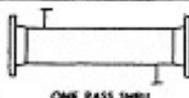
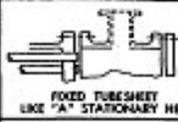
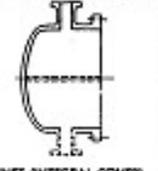
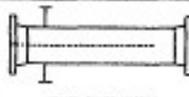
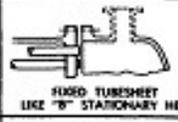
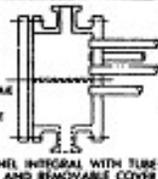
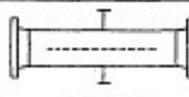
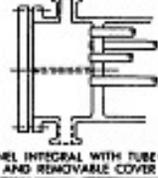
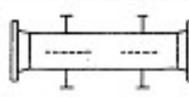
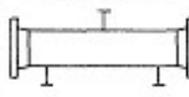
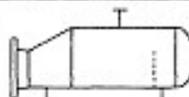
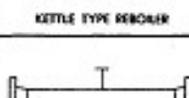
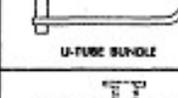
Normas TEMA

Se definen tres clases:

- ❖ Clase R: Condiciones de servicio rigurosas
- ❖ Clase C: Condiciones de servicio moderadas
- ❖ Clase B: Para la industria química de procesos

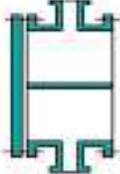
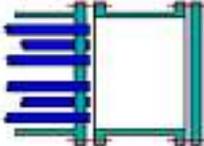
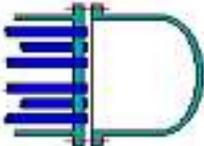
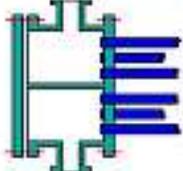
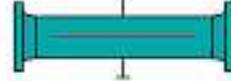
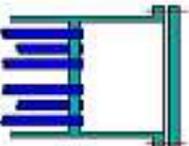
- Otro código: API 660 (industria petrolera)

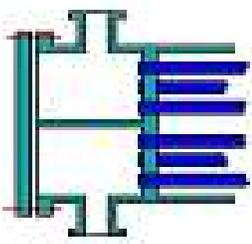
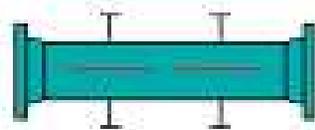
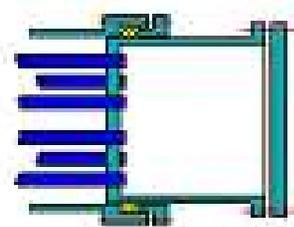
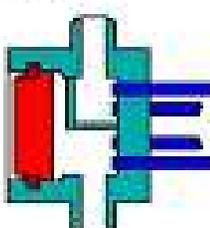
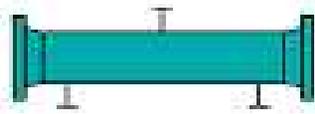
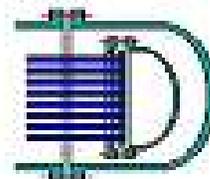
Normas constructivas TEMA

FRONT END STATIONARY HEAD TYPES		SHELL TYPES		REAR END HEAD TYPES	
A	 CHANNEL AND REMOVABLE COVER	E	 ONE PASS SHELL	L	 FIXED TUBESHEET LIKE "A" STATIONARY HEAD
B	 BONNET INTEGRAL COVER	F	 TWO PASS SHELL WITH LONGITUDINAL BAFFLE	M	 FIXED TUBESHEET LIKE "B" STATIONARY HEAD
C	 REMOVABLE TUBE BUNDLE CHANNEL INTEGRAL WITH TUBE- SHEET AND REMOVABLE COVER	G	 SPLIT FLOW	N	 FIXED TUBESHEET LIKE "N" STATIONARY HEAD
N	 CHANNEL INTEGRAL WITH TUBE- SHEET AND REMOVABLE COVER	H	 DOUBLE SPLIT FLOW	P	 OUTSIDE PACKED FLOATING HEAD
D	 SPECIAL HIGH PRESSURE CLOSURE	J	 DIVIDED FLOW	S	 FLOATING HEAD WITH BACKING DEVICE
		K	 KETTLE TYPE REBOILER	T	 PULL THROUGH FLOATING HEAD
		X	 CROSS FLOW	U	 U-TUBE BUNDLE
				W	 EXTERNALLY SEALED FLOATING TUBESHEET

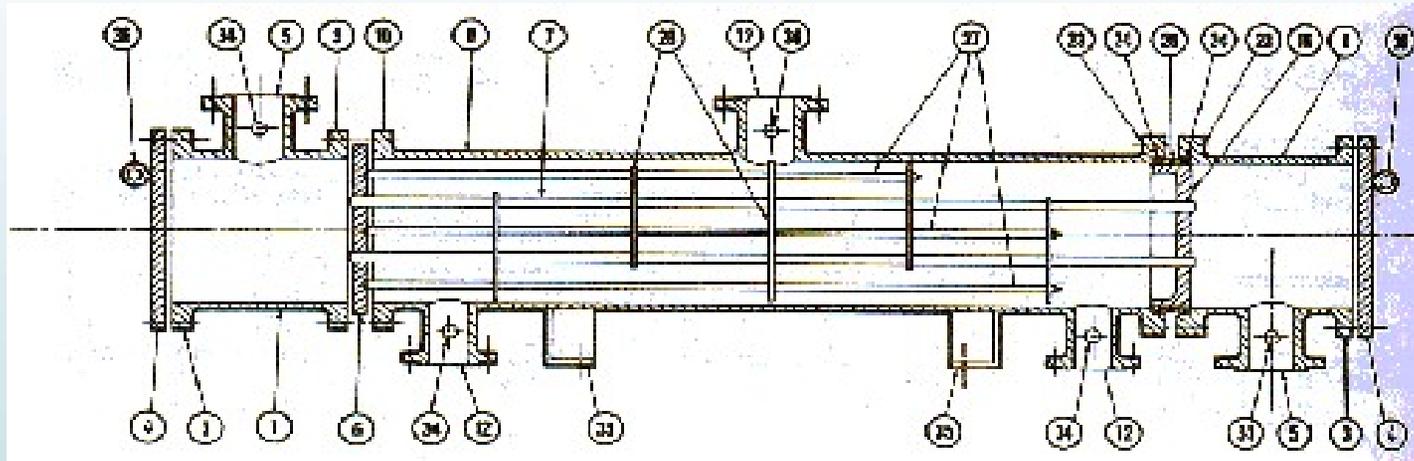
Normas constructivas TEMA

APPENDIX V
TEMA HEAT EXCHANGER LAYOUT DESIGNATION

Front End Stationary Head Types	Shell Types	Rear End Head Types
A Channel and Removeable Cover	E One Pass Shell	L Fixed Tubesheet Stationary Head
		
B Bonnet (Integral Cover)	F Two Pass Shell with Longitudinal Baffle	M Fixed Tubesheet Stationary Head
		
C Channel Integral with Tubesheet and Removeable Cover	G Split Flow	N Fixed Tubesheet Stationary Head
		

N	H	P
Channel Integral with Tubesheet and Removeable Cover	Double Split Flow	Outside Packed Floating Head
		
b	J	S
Special High Pressure Closure	Divided Flow	Floating Head with Backing Device
		

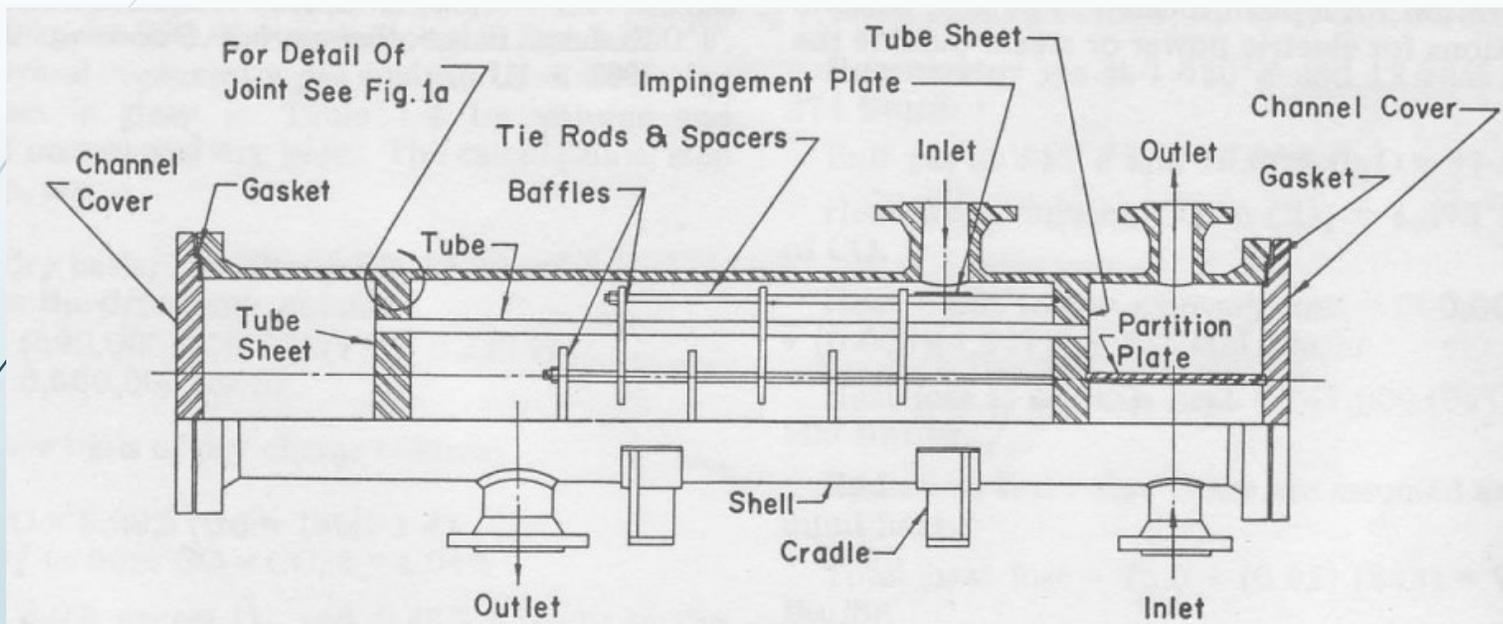
Elementos constructivos

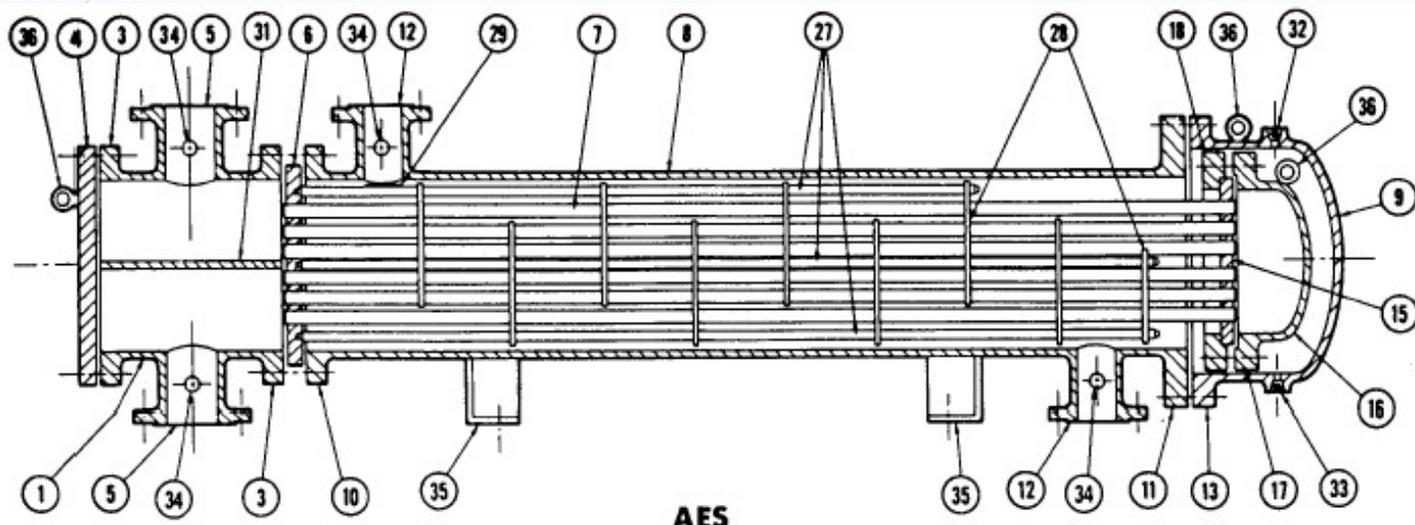


- Coraza
- Placas portatubos
- Tubos internos
- Unión hermética entre tubos y placas
- Cabezales
- Superficie de intercambio (sup. de los tubos)

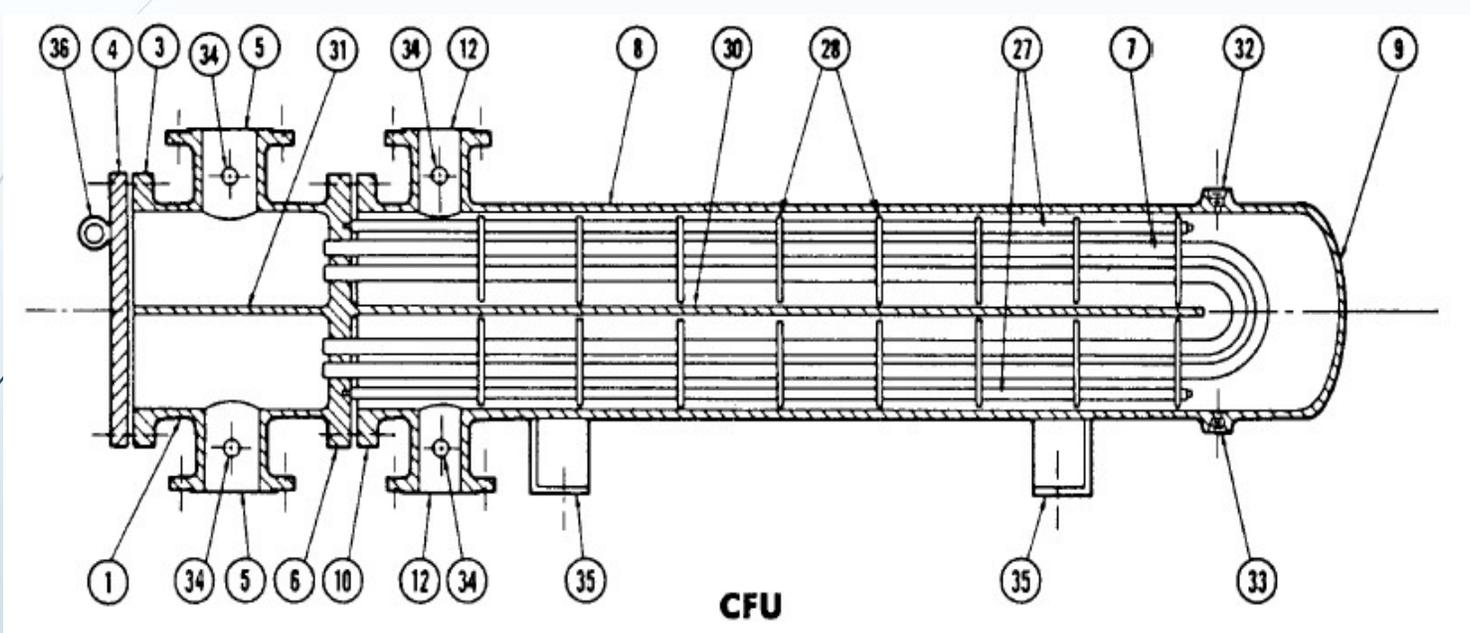
Ing.

Elementos constructivos





AES



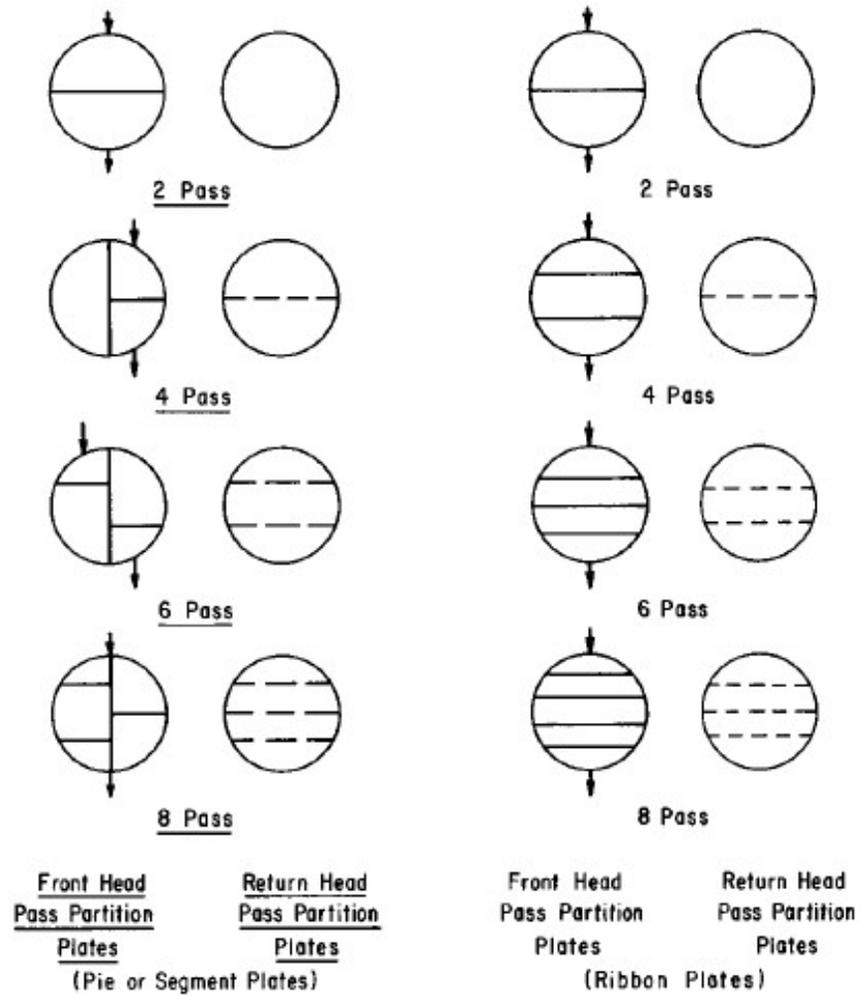
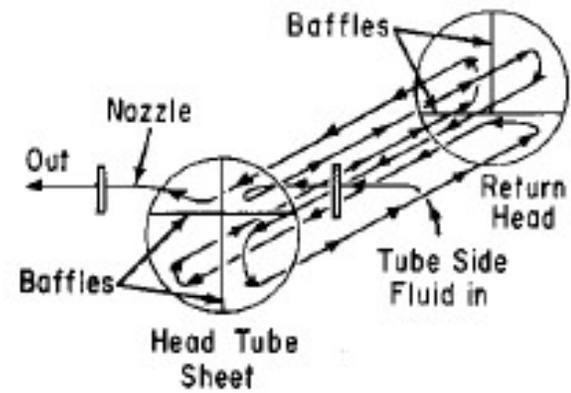
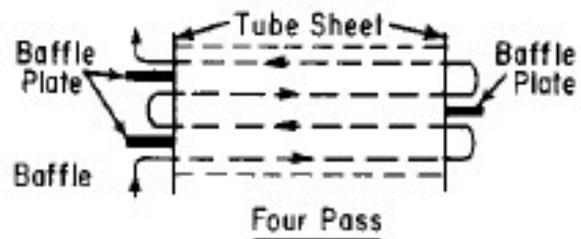
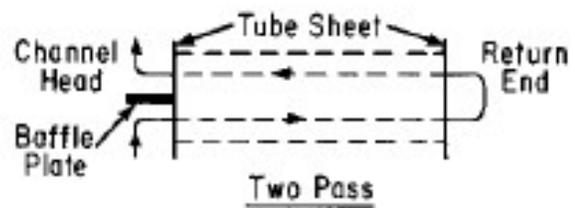


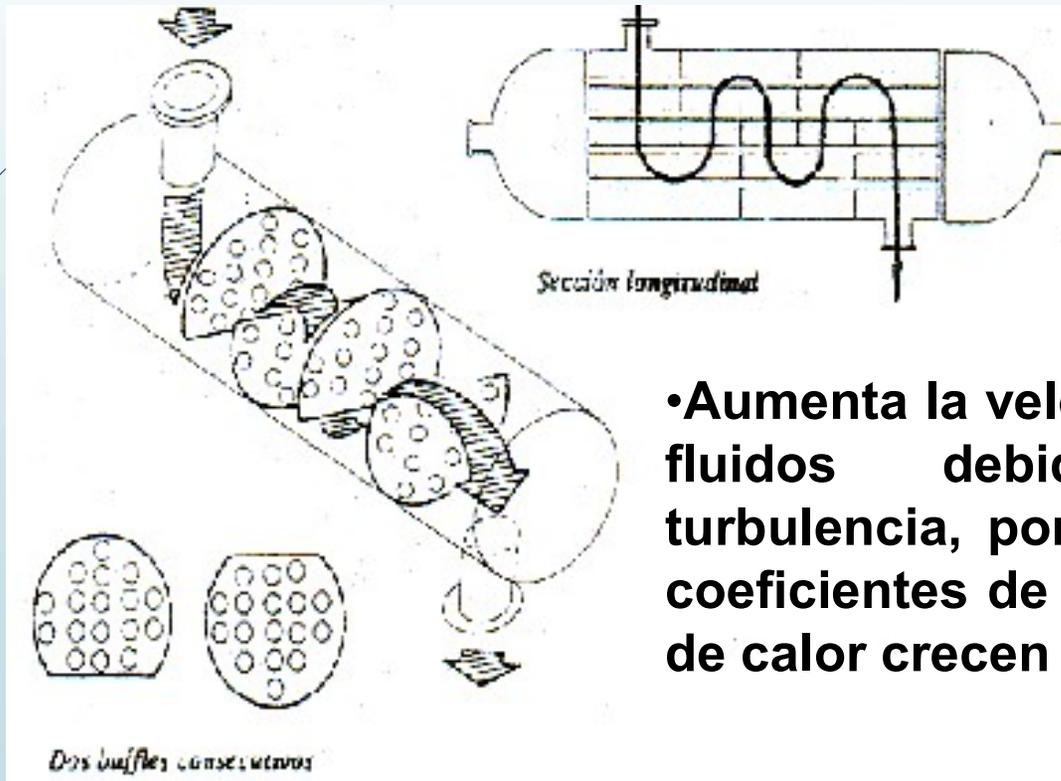
Figure 10-12. Tube-side pass arrangements.



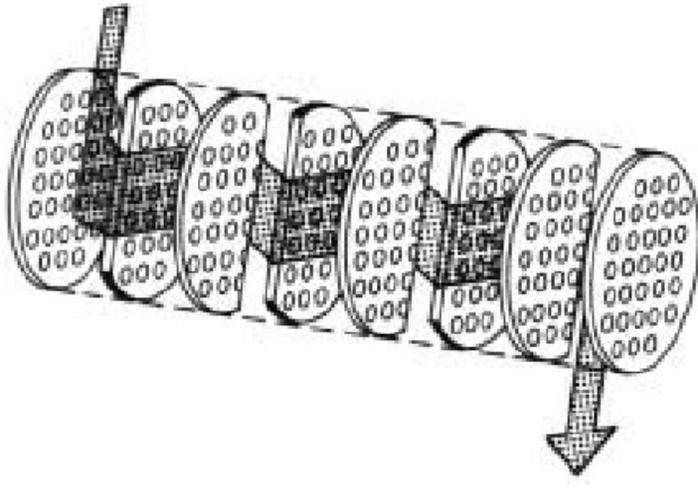
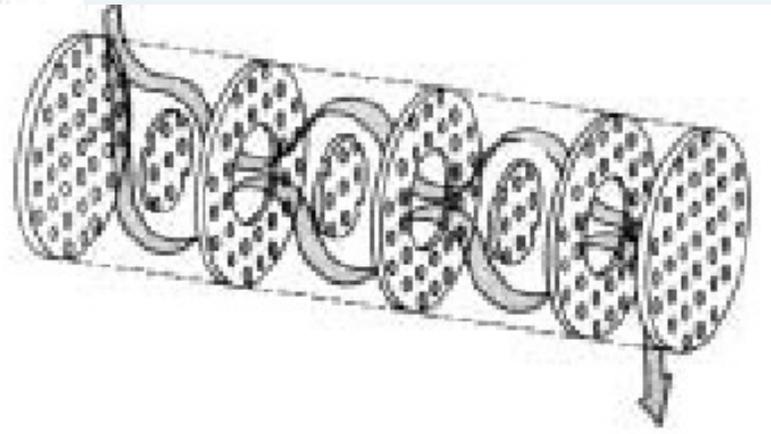
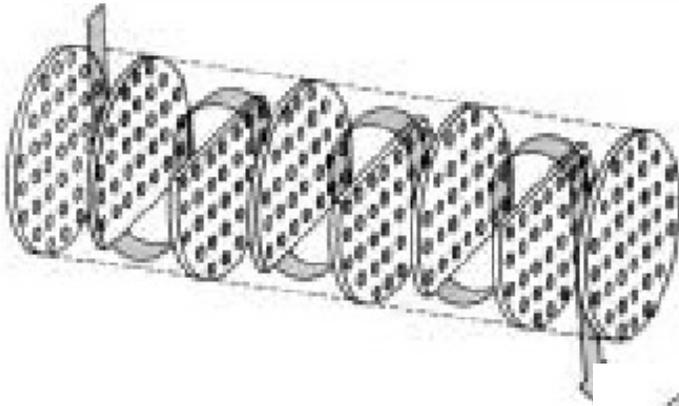
Six Pass Tube Side
 (Not Acceptable Due to Poor Temperature Relationships)

Figure 10-13. Tube-side baffles.

Deflectores o baffles



- Aumenta la velocidad de los fluidos debido a la turbulencia, por lo tanto los coeficientes de transferencia de calor crecen



Deflectores o baffles

Tipos de flujo que pueden tener lugar para diferentes cortes de baffles:

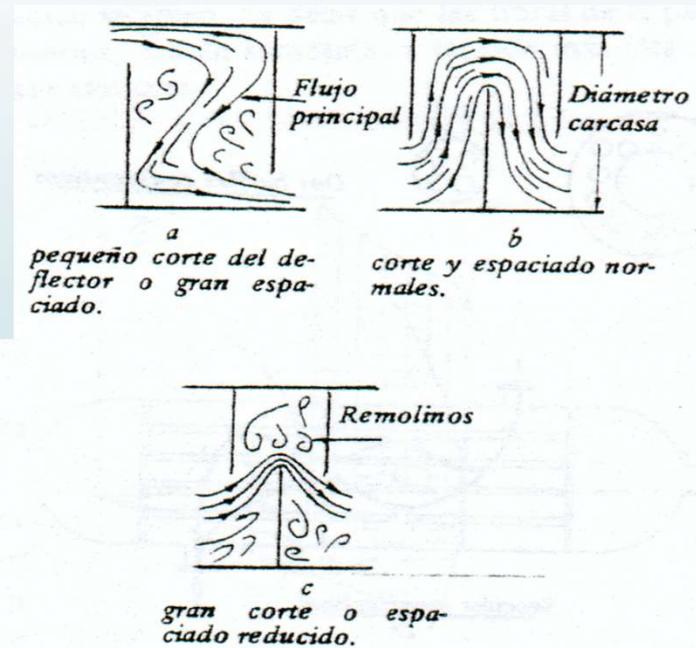
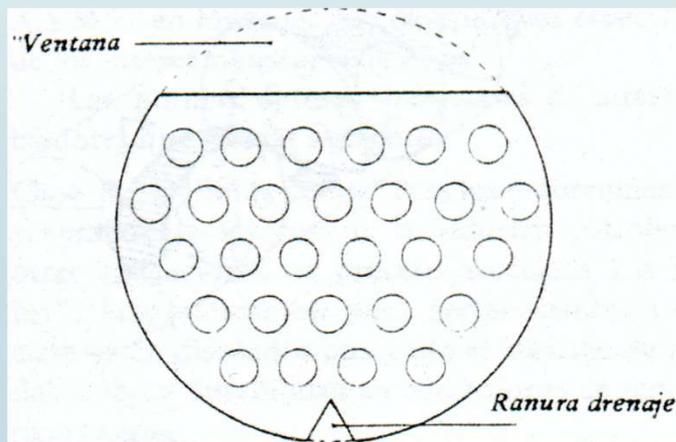


FIGURA 3

Tubos y distribución de los mismos

Normas dimensionales BWG

El largo de los tubos lo define el diseñador

Materiales: según las características de los fluidos (corrosión). Aceros, cobre, bronce, níquel y aleaciones, grafito o vidrio

Arreglo: disposición geométrica de los tubos en la placa tubular

❖ **En triángulo**

❖ **En cuadro**

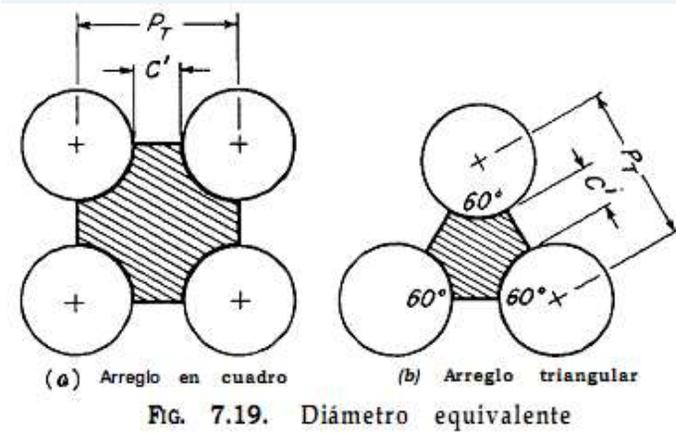
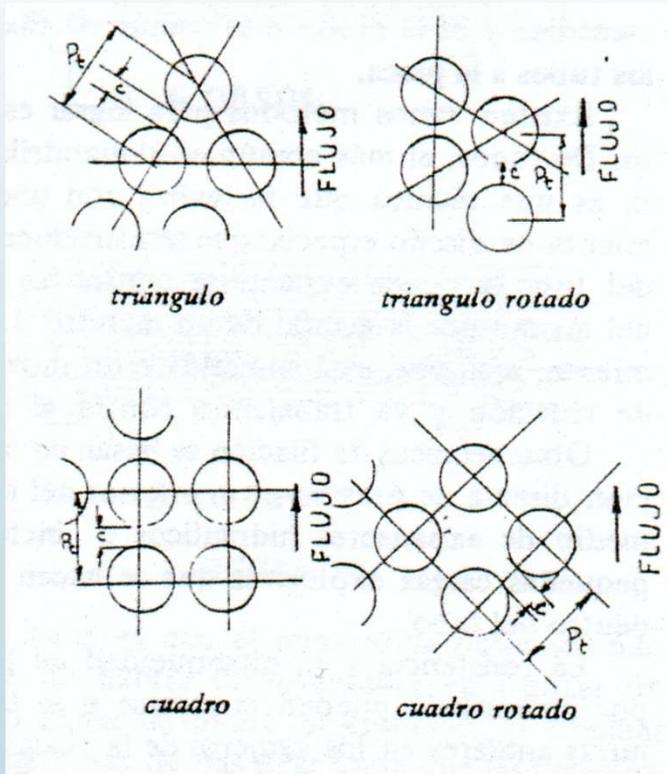
**TABLA 10. DATOS DE TUBOS PARA CONDENSADORES
E INTERCAMBIADORES DE CALOR**

Tubo DE, plg	BWG	Espesor de la pared,	DI, plg	Area de flujo por tubo, plg ²	Superficie por pie lin. pies ²		Peso po pie linea lb, de acero
					Exterior	Interior	
½	12	0.109	0.282	0.0625	0.1309	0.0748	0.493
	14	0.083	0.334	0.0876		0.0874	0.403
	16	0.065	0.370	0.1076		0.0969	0.329
	18	0.049	0.402	0.127		0.1052	0.258
	20	0.035	0.430	0.145		0.1125	0.190
¾	10	0.134	0.482	0.182	0.1963	0.1263	0.965
	11	0.120	0.510	0.204		0.1335	0.884
	12	0.109	0.532	0.223		0.1393	0.817
	13	0.095	0.560	0.247		0.1466	0.727
	14	0.083	0.584	0.268		0.1529	0.647
	15	0.072	0.606	0.289		0.1587	0.571
	16	0.065	0.620	0.302		0.1623	0.520
	17	0.058	0.634	0.314		0.1660	0.469
	18	0.049	0.652	0.334		0.1707	0.401
1	8	0.165	0.670	0.355	0.2618	0.1754	1.61
	9	0.148	0.704	0.389		0.1843	1.47
	10	0.134	0.732	0.421		0.1916	1.36
	11	0.120	0.760	0.455		0.1990	1.23
	12	0.109	0.782	0.479		0.2048	1.14
	13	0.095	0.810	0.515		0.2121	1.00
	14	0.083	0.834	0.546		0.2183	0.890



OD of Tubing (in.)	BWG Gauge	Thickness (in.)	Internal Flow Area (in. ²)	Sq. Ft. External Surface per Ft. Length	Sq. Ft. Internal Surface per Ft. Length	Weight per Ft. Length, Steel (lb.)	ID Tubing (in.)	OD/ID
1/4	22	0.028	0.0295	0.0655	0.0508	0.066	0.194	1.289
1/4	24	0.022	0.0333	0.0655	0.0539	0.054	0.206	1.214
1/4	26	0.018	0.0360	0.0655	0.0560	0.045	0.214	1.168
3/8	18	0.049	0.0603	0.0982	0.0725	0.171	0.277	1.354
3/8	20	0.035	0.0731	0.0982	0.0798	0.127	0.305	1.233
3/8	22	0.028	0.0799	0.0982	0.0835	0.104	0.319	1.176
3/8	24	0.022	0.0860	0.0982	0.0867	0.083	0.331	1.133
1/2	16	0.065	0.1075	0.1309	0.0969	0.302	0.370	1.351
1/2	18	0.049	0.1269	0.1309	0.1052	0.236	0.402	1.244
1/2	20	0.035	0.1452	0.1309	0.1126	0.174	0.430	1.163
1/2	22	0.028	0.1548	0.1309	0.1162	0.141	0.444	1.126
5/8	12	0.109	0.1301	0.1636	0.1066	0.602	0.407	1.536
5/8	13	0.095	0.1486	0.1636	0.1139	0.537	0.435	1.437
5/8	14	0.083	0.1655	0.1636	0.1202	0.479	0.459	1.362
5/8	15	0.072	0.1817	0.1636	0.1259	0.425	0.481	1.299
5/8	16	0.065	0.1924	0.1636	0.1296	0.388	0.49s	1.263
5/8	17	0.058	0.2035	0.1636	0.1333	0.350	0.509	1.228
5/8	18	0.049	0.2181	0.1636	0.1380	0.303	0.527	1.186
5/8	19	0.042	0.2298	0.1636	0.1416	0.262	0.541	1.155
5/8	20	0.035	0.2419	0.1636	0.1453	0.221	0.555	1.136
3/4	10	0.134	0.1825	0.1963	0.1262	0.884	0.482	1.556
3/4	11	0.120	0.2043	0.1963	0.1335	0.809	0.510	1.471
3/4	12	0.109	0.2223	0.1963	0.1393	0.748	0.532	1.410
3/4	13	0.095	0.2463	0.1963	0.1466	0.666	0.560	1.339
3/4	14	0.083	0.2679	0.1963	0.1529	0.592	0.584	1.284

Arreglos



Fijación de los tubos a las placas tubulares

Existen dos métodos de unión entre los tubos y las placas tubulares:

❖ **Por expansión del tubo contra el agujero de la placa**

❖ **Por soldadura**

Por expansión

Se utilizan
herramientas
especiales
denominadas
mandriles



para tubos de \varnothing exterior de 51 mm (2") hasta 76 mm (3") inclu-
yendo 2 rodillos expandidores y 2 rodillos acampanadores.



Se utiliza en el mandrilado —acampanado de tubos de calderas de me-
talo. Se fabrica para tubos de \varnothing exterior de 76 mm (3") hasta
152 mm (6") y tiene 5 rodillos expandidores y 2 rodillos acampanado-

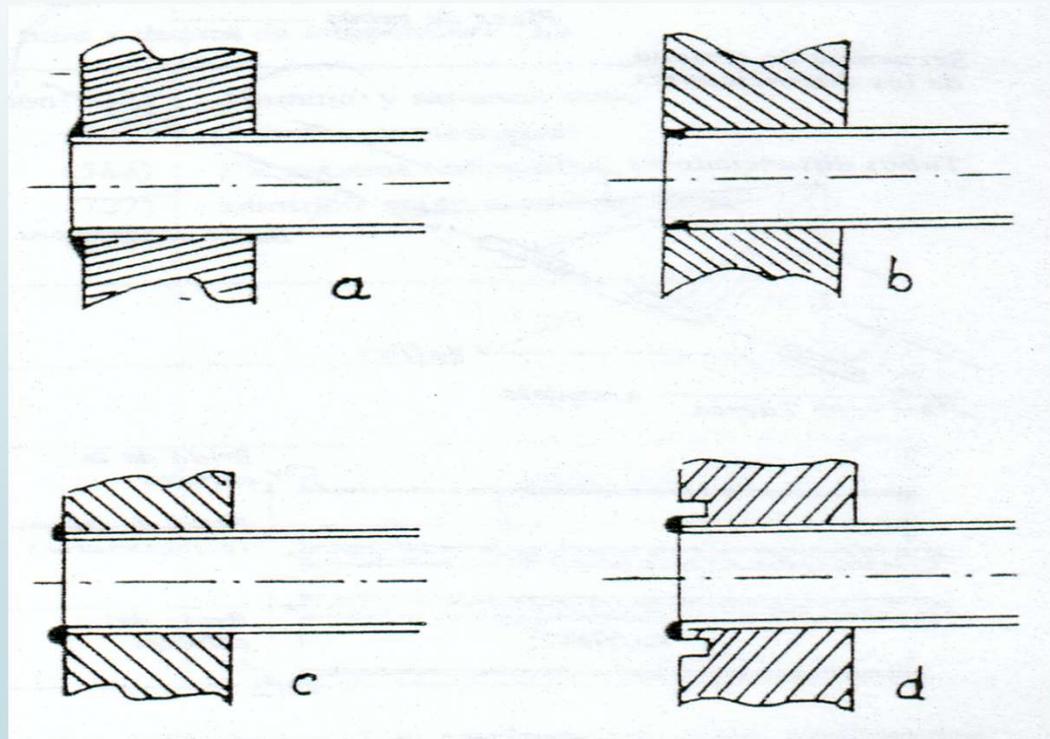


Se utiliza para la expansión, con grandes espesores de placa, debido a las rigide-

Por soldadura

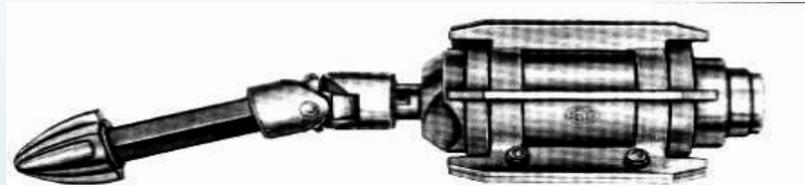
Depende del
material

Operación
dedicada



Limpiadores

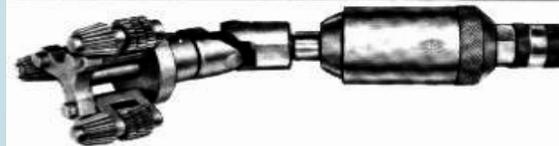
Son herramientas
neumáticas o
manuales



Esta turbina está diseñada especialmente para desarrollar una potencia elevada y su principal aplicación está radicada en las destierres de petróleo. Se acciona por medio de aire comprimido y filtrado a 7 Kg/cm² de presión. Se provee en tamaños que van para tubos de \varnothing interior comprendido entre 44,5 mm (1,374") hasta 406,0 mm (16"). En la figura puede verse la misma acoplada al trépano desincrustador **TR** mediante el acoplamiento cardánico **JCR** de giro limitado, y la prolongación rígida **PH**.



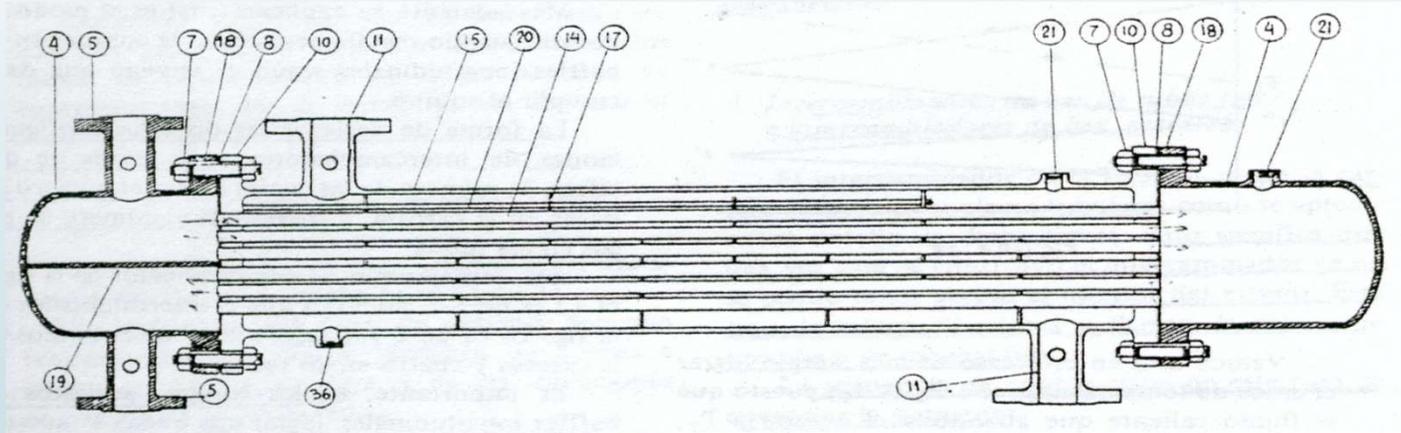
La misma turbina anterior **TGR** acoplada con cabezal escariador de doble expansión modo **CD** de gran robustez empleado para capas de incrustaciones finas o gruesas. El cabezal **CD** se provee para tubos de 44,4 mm hasta 178 mm de \varnothing interior.



1 - Turbina neumática empleada para la limpieza de tubos de caudales u otros equipos.

Intercambiadores multipaso

Pueden ser de dos pasos, cuatro, seis y ocho



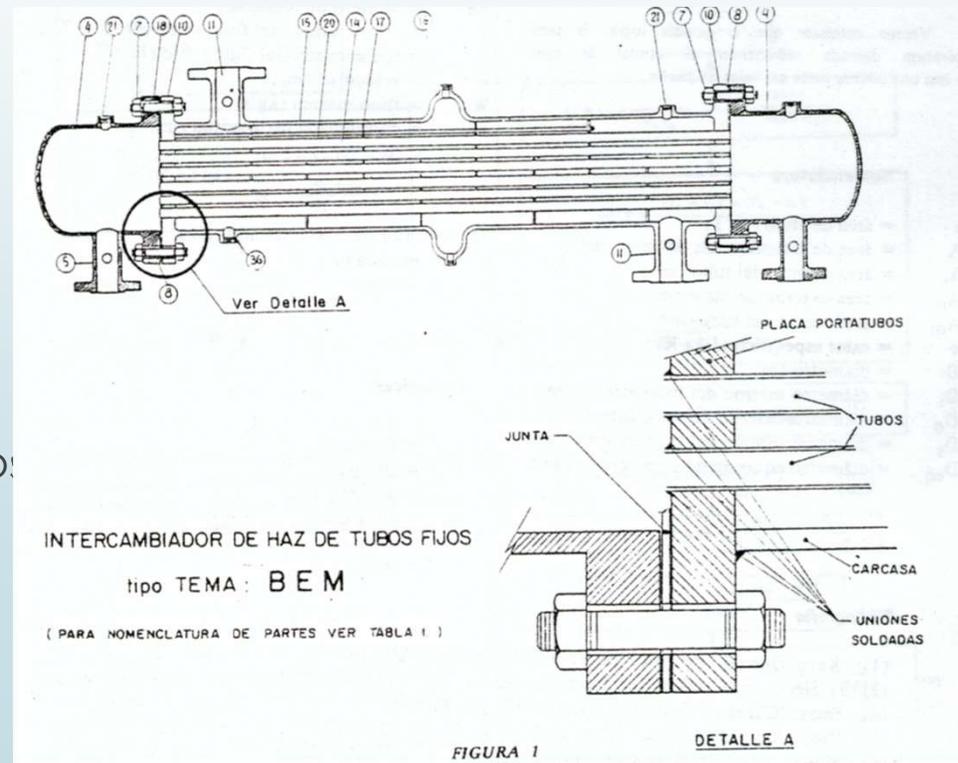
- Se logran mayores velocidades y por lo tanto mayores coeficientes peliculares de transmisión de calor

Intercambiadores de haz de tubos fijos

Carcasa soldada

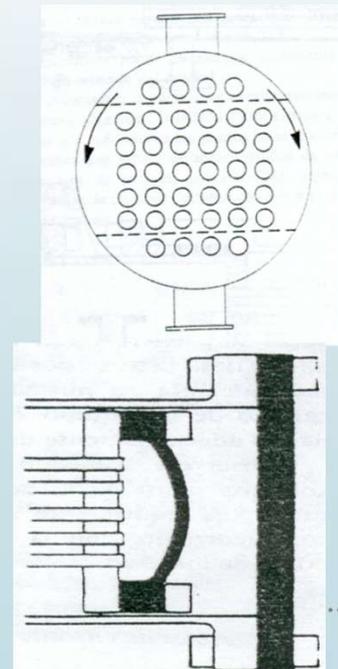
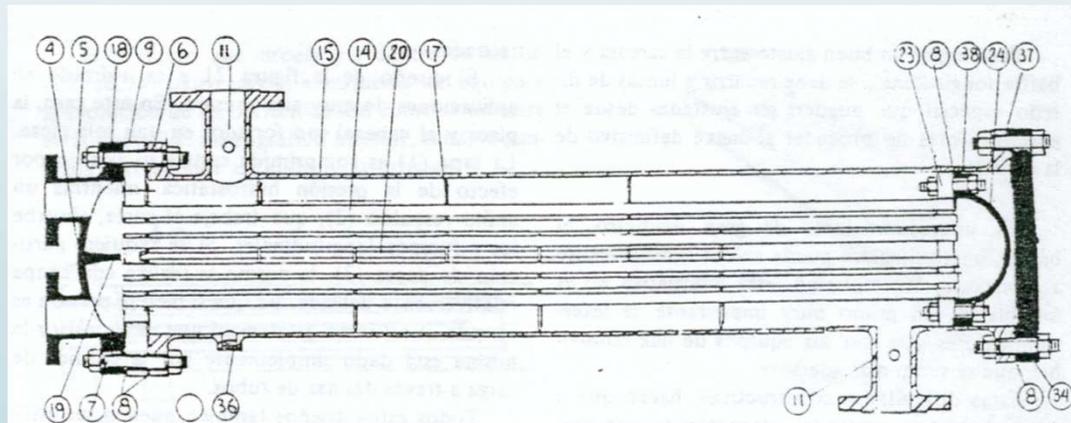
No se puede
desarmar para
limpieza o
inspección

Se producen efectos
de dilatación
diferencial



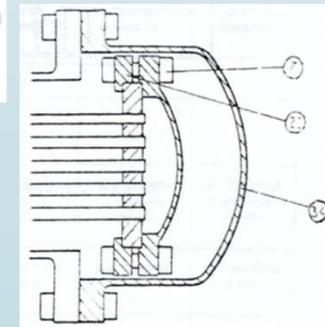
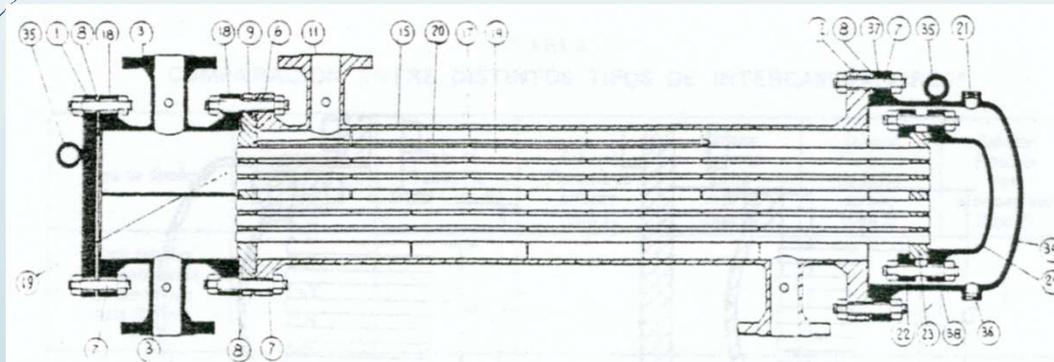
Intercambiadores de haz removible

A- Intercambiador de cabezal flotante de arrastre



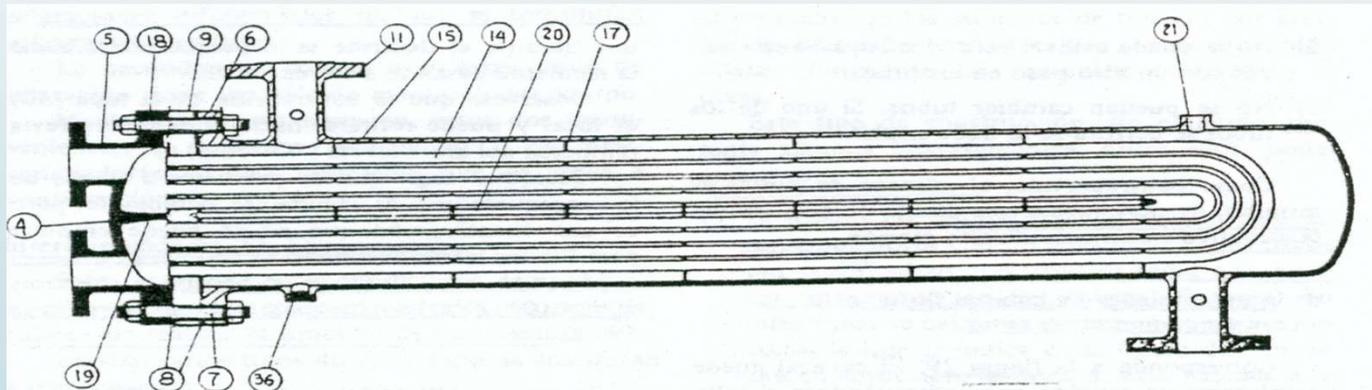
Intercambiadores de haz removible

B - Intercambiador de cabezal flotante de anillo seccionado



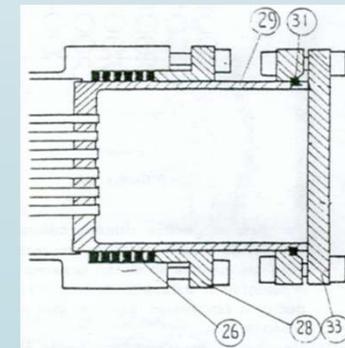
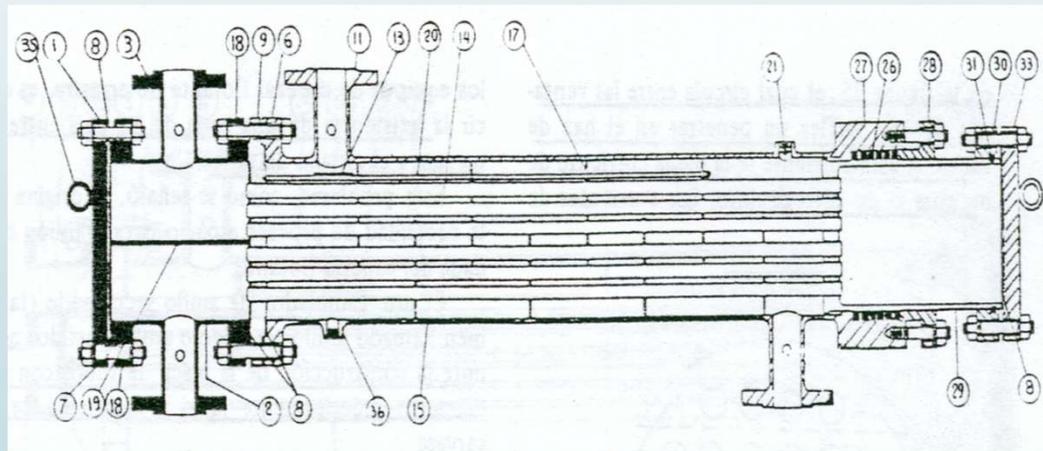
Intercambiadores de haz removible

C- Intercambiador de tubos en U



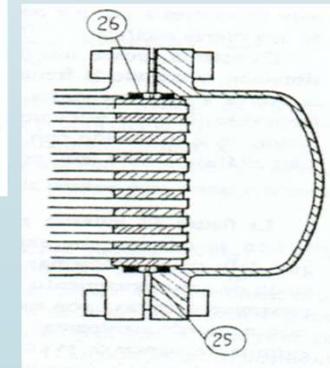
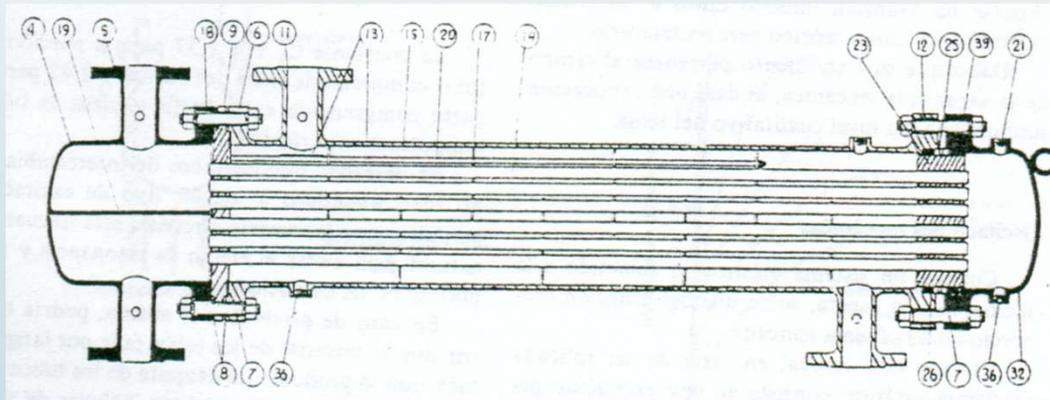
Intercambiadores de haz removible

D - Intercambiador de cabezal flotante con empaquetadura externa



Intercambiadores de haz removible

E - Intercambiador de cabezal flotante con empaquetadura exterior y anillo linterna



Intercambiadores de cabezal flotante

El cabezal flotante permite:

- ❖ Desarme para limpieza del exterior de los tubos
 - ❖ Dilataciones diferenciales entre carcaza y tubos
-
- Las normas TEMA proporcionan una codificación que permite describir un tipo de intercambiador valiéndose de tres letras. Por ejemplo un intercambiador AEL tendrá un cabezal anterior tipo A, una carcaza tipo E y un cabezal posterior tipo L

Hoja de especificación

Las normas TEMA, sugieren la utilización de un formulario estándar para especificar las características constructivas principales de un intercambiador de calor

Vibración del haz de tubos

Las vibraciones son bastante nocivas, causando roturas y ruidos molestos

Causas: derramamiento en vórtice, acople elástico de fluido, fluctuación de la presión, acople acústico

Se puede producir resonancia (acople de frecuencias, natural y la causada por los factores anteriores). Colapso del equipo

Selección de la trayectoria del flujo

Por dentro del tubo: el fluido más corrosivo o el más sucio, ya que la limpieza es más fácil. También para el fluido de mayor presión.

Por el lado de la coraza: el fluido más viscoso, ya que dentro de los tubos se podría causar taponamientos u operaciones muy lentas.

Intercambiadores De Calor

[Intercambiadores De Calor De Tubos Retorcidos](#)

Características

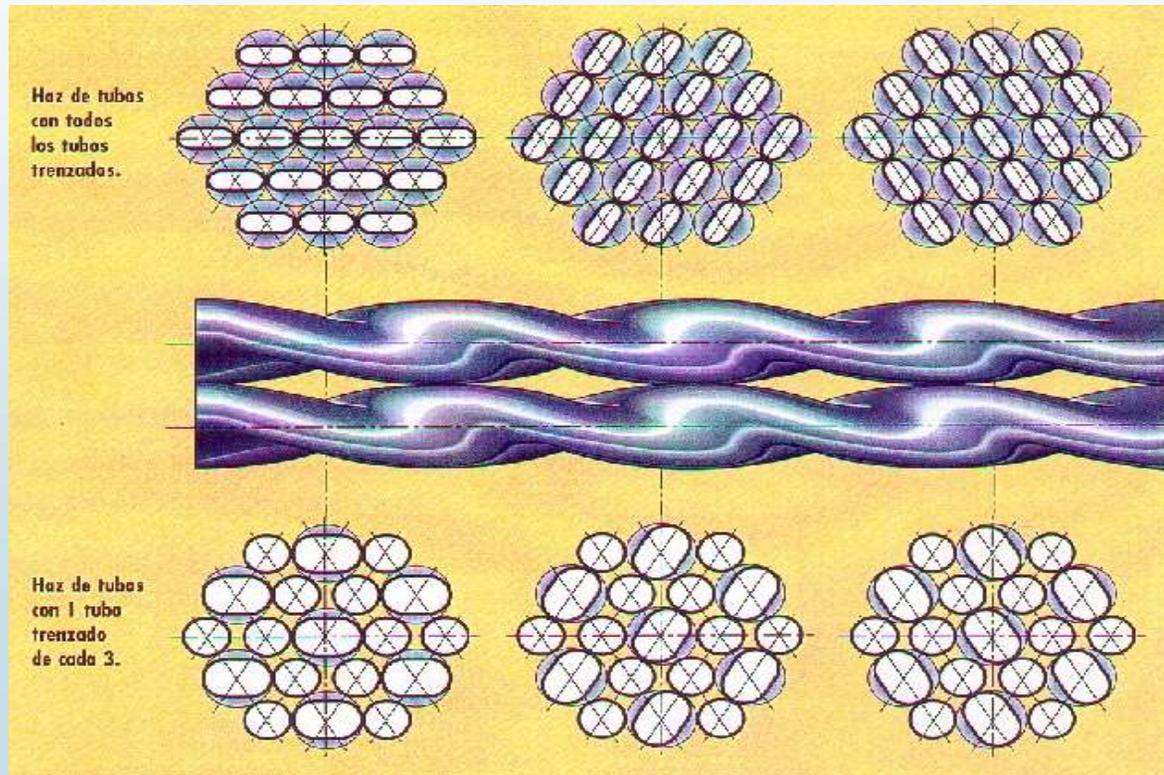
- Se caracterizan por la exclusividad de presentar un haz tubular formado por tubos reforcidos en vez de tubos lisos como los intercambiadores de tubo y coraza vistos anteriormente.



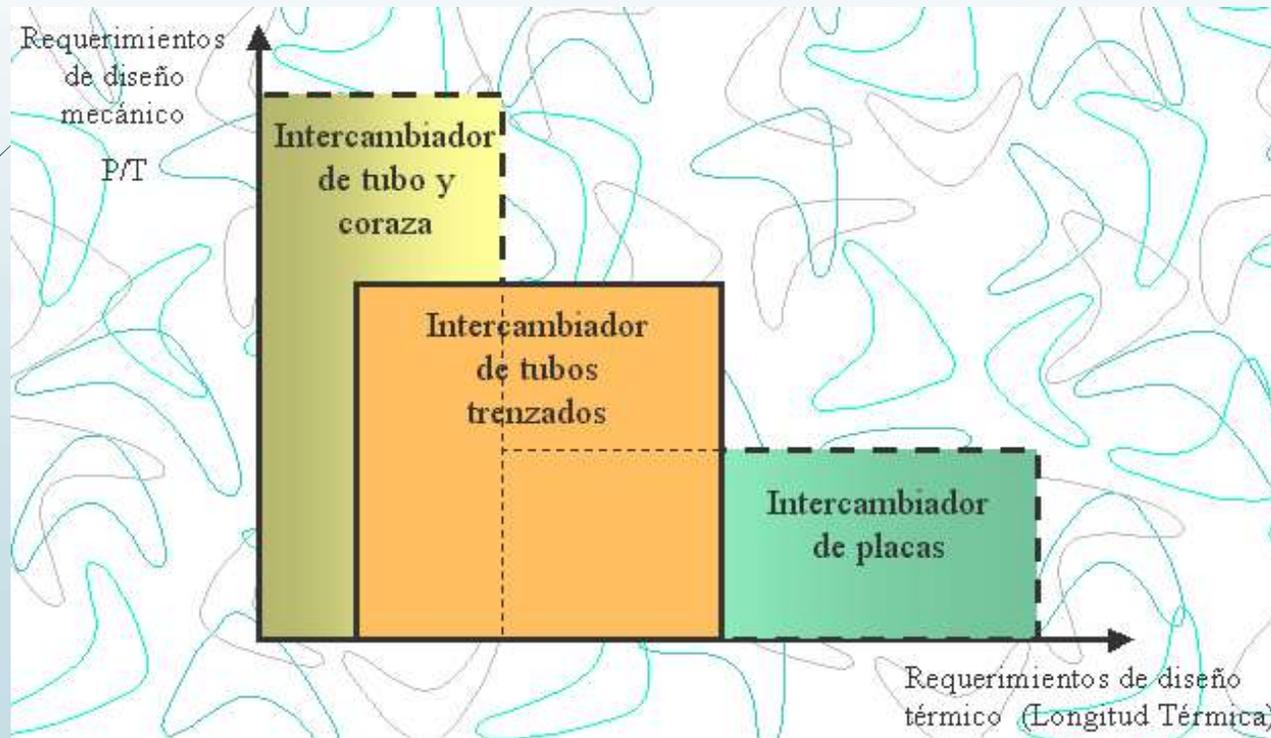
Usos Típicos

Industria	Aplicacion		
		Pulpa y papel	Enfriamiento/calentamiento de licor
Química	Enfriamiento de ácido sulfúrico		Enfriamiento de agua
	Precalentamiento de amonio		Enfriamiento/calentamiento de aceite
	Enfriamiento/calentamiento de peróxido de hidrógeno.		Enfriamiento de efluentes
Petróleo	Enfriamiento/calentamiento de gas a alta presión	Potencia	Condensador de turbina de vapor
	Calentamiento de aceite		Calentamiento de agua de alimentación de calderas
	Calentamiento de betumen	Acero	Enfriamiento de aceite lubricante
	Calentamiento de gas natural licuado		Enfriamiento continuo de fundición
	Calentamiento/enfriamiento de corrientes de alimentación		Enfriamiento de aceite lubricante
			Enfriamiento de aire comprimido

Disposición de los tubos en el Haz



Comparación entre Intercambiadores



Intercambiadores De Calor

Intercambiadores De Calor Para Tanques

Características

Se utilizan para calentar fluidos transportados durante su carga o descarga.

Los tubos están distribuidos en las paredes del tanque o en el piso, en forma helicoidal o espiral sujetos por medio de abrazaderas.

Los tubos pueden ser lisos o alteados, dependiendo las características del fluido.

Tubos aleteados

Características de los tubos aleteados:

- Seguridad para el producto
- Menor desplazamiento del producto
- Menores costos de mantenimiento
- Hasta 12 veces el Área de transferencia de los tubos lisos
- Baja temperatura de la película
- Menores costos de adquisición



Superior: tubos aleteados lisos
Inferior: aletas perforadas



Equipos empleados en la calefacción de tanques.



Calentadores horizontales:

- ❖ De succión y de línea.
- ❖ De succión de tanques.
- ❖ De tubos aleteados

● **Calentadores verticales**

Horizontales de tubos aleteados

Calentadores HL:



Calentadores de Serpentin:

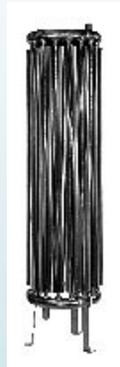


Calentadores de Bayoneta:



Calentadores Verticales

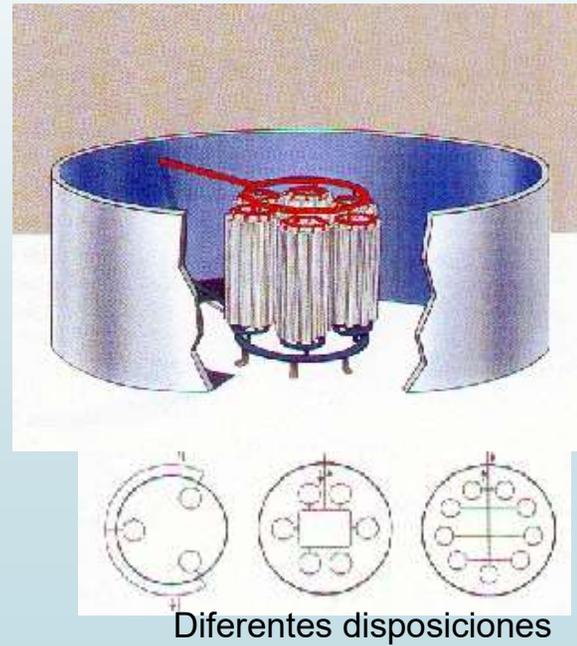
- Tipos:
Fijos



Portátiles



- Esquema:



Intercambiadores de calor

Intercambiador de calor Spiral

Características

Se acerca al ideal en intercambiadores.

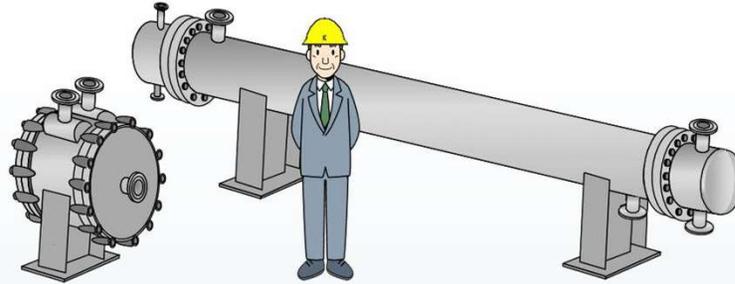
Los medios van en completa contracorriente.

Al haber un único paso en cada lado, se eliminan derivaciones y se disminuye la tendencia al ensuciamiento.

Compacto. Necesita menor espacio y servicio.

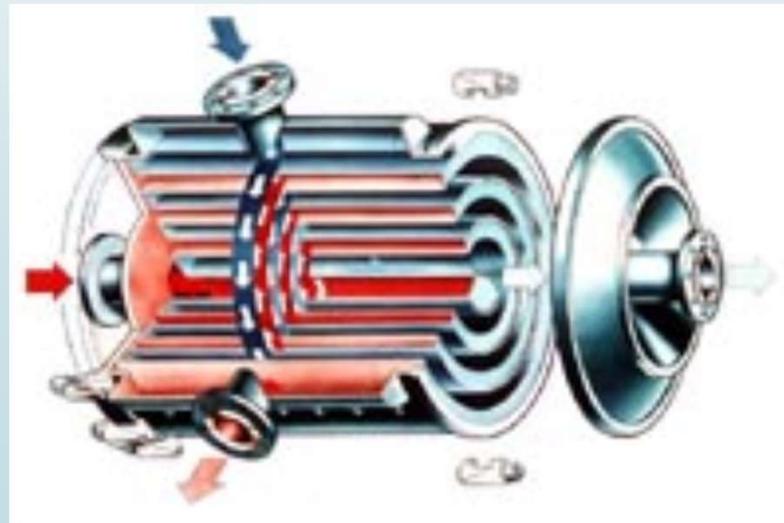
Efectivo en manejo de:

- ❖ Lodos
- ❖ Líquidos con sólidos en suspensión
- ❖ Fluidos viscosos



Sistema de funcionamiento

El fluido caliente entra por el centro del intercambiador y fluye de dentro hacia fuera. El fluido frío se introduce por la periferia y fluye hacia el centro. De esta forma se lleva a cabo el flujo en contracorriente.

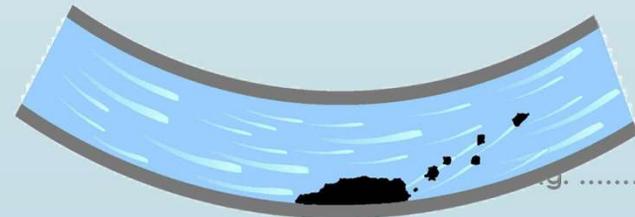


Ventajas

Alta transferencia producida por: idéntica conformación de pasajes, alta turbulencia.

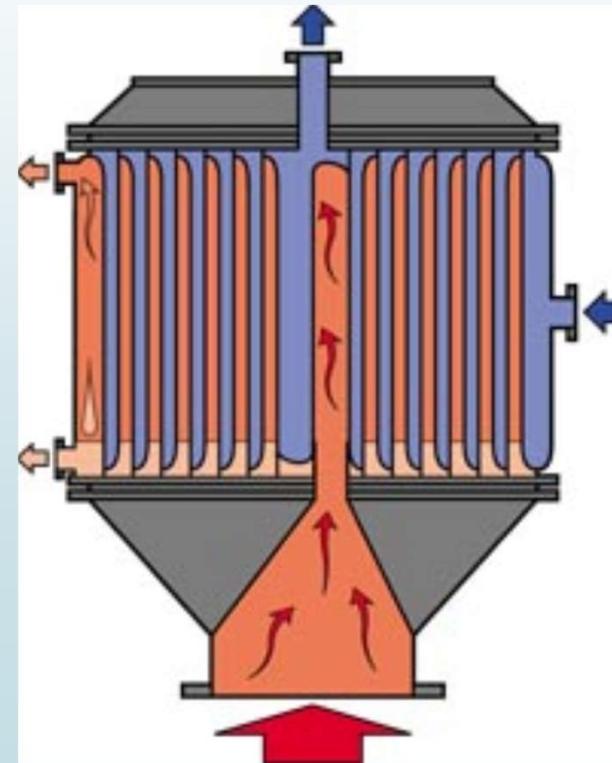
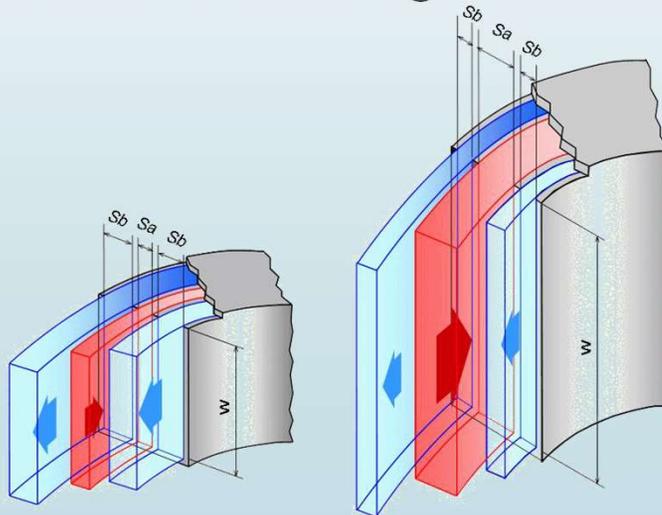
Alta eficiencia debido a: ausencia de derivaciones, pequeñas pérdidas por radiación y contracorriente total.

Bajo mantenimiento debido a: efecto limpiador, fácil acceso, no hay mezcla de los medios y poco espacio requerido.



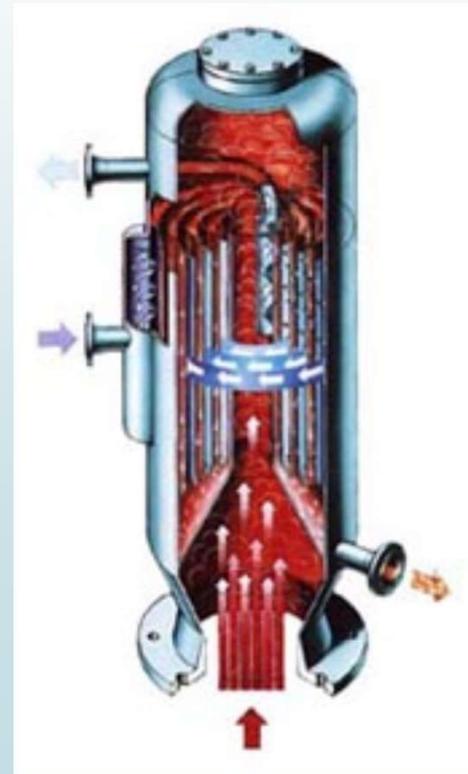
Tipo I Flujo espiral en ambos lados

Usos: condensadores y
enfriadores de gas.



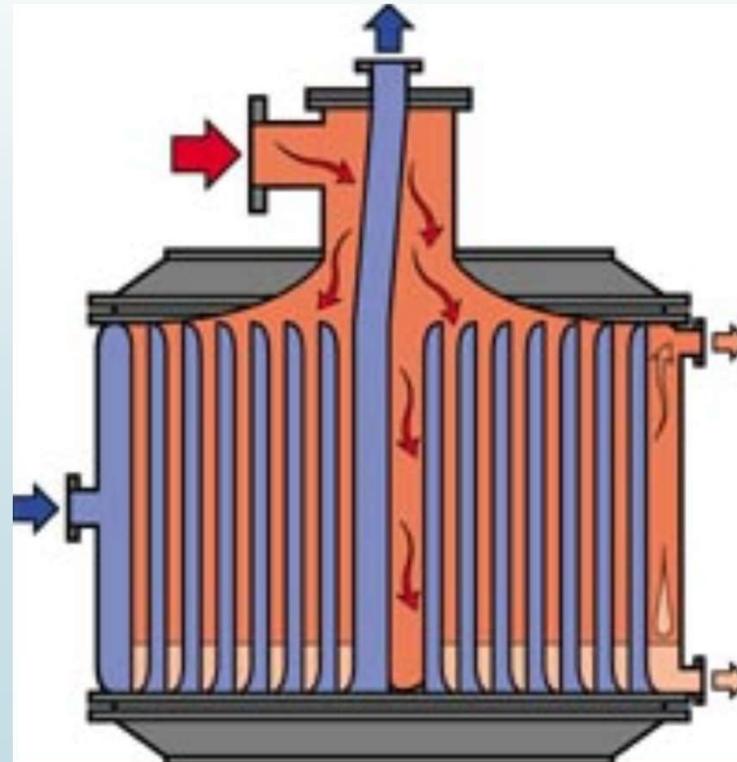
Tipo II Flujo espiral - Flujo cruzado

Usos: condensadores,
rehervidores, enfriadores y
calentadores de gas.



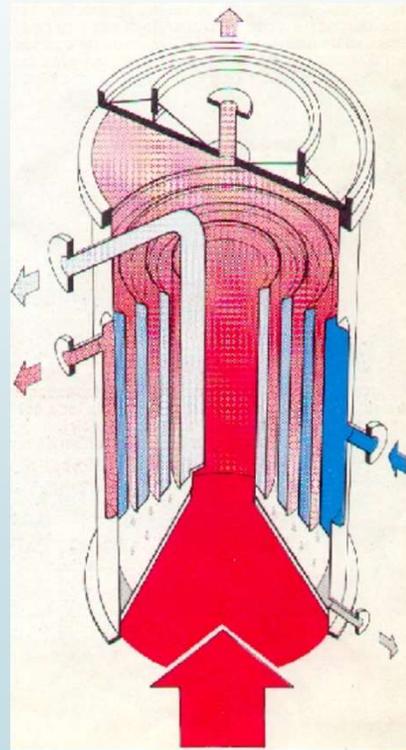
Tipo III Flujo espiral - Combinación flujo cruzado con flujo espiral

Usos: condensadores
y vaporizadores



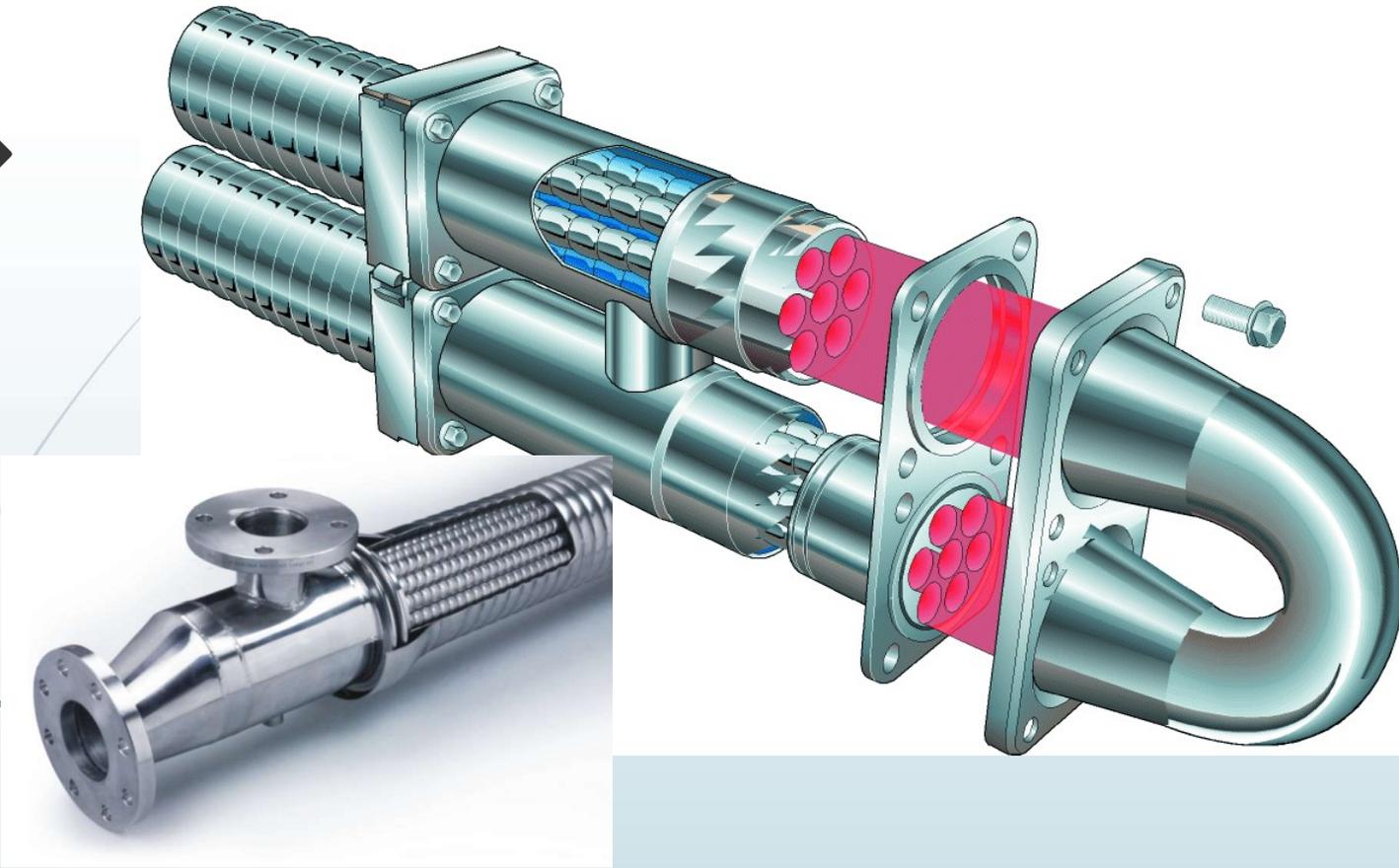
Tipo G

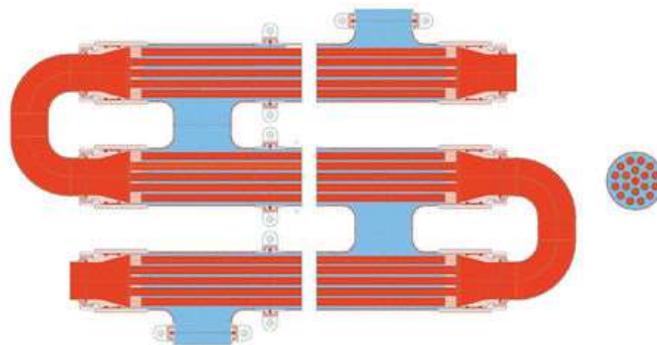
Usos:
condensadores de
cabeza de
columna



Intercambiadores De Calor

Intercambiadores de tubo en tubo





Intercambiadores De Calor

Intercambiadores De Superficie Rascada

Características

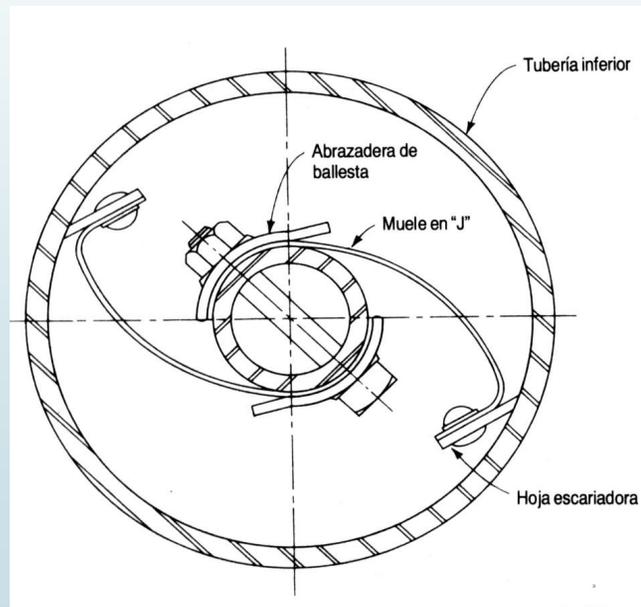
Transferencia de calor de fluidos de alta viscosidad.

No requieren mantenimiento especial ni costoso.

Para procesos:

- Con cristalización
- Con gran ensuciamiento de las superficies
- De extracción por solventes

Funcionamiento

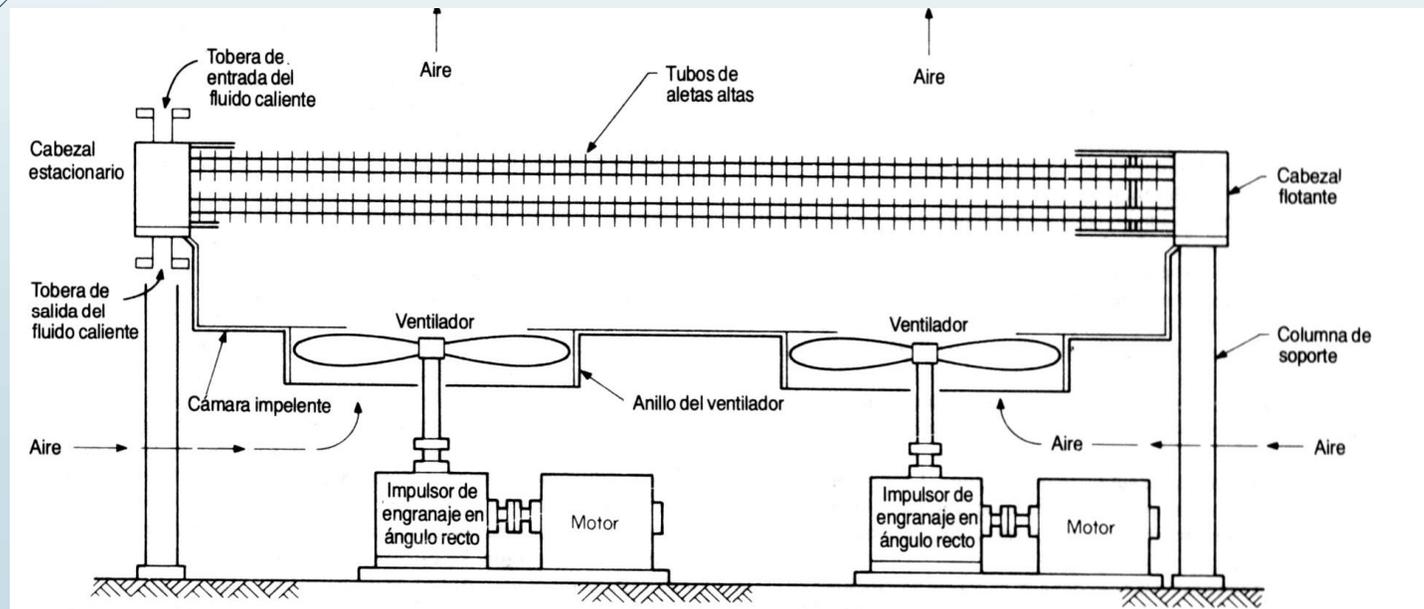


Intercambiadores de calor

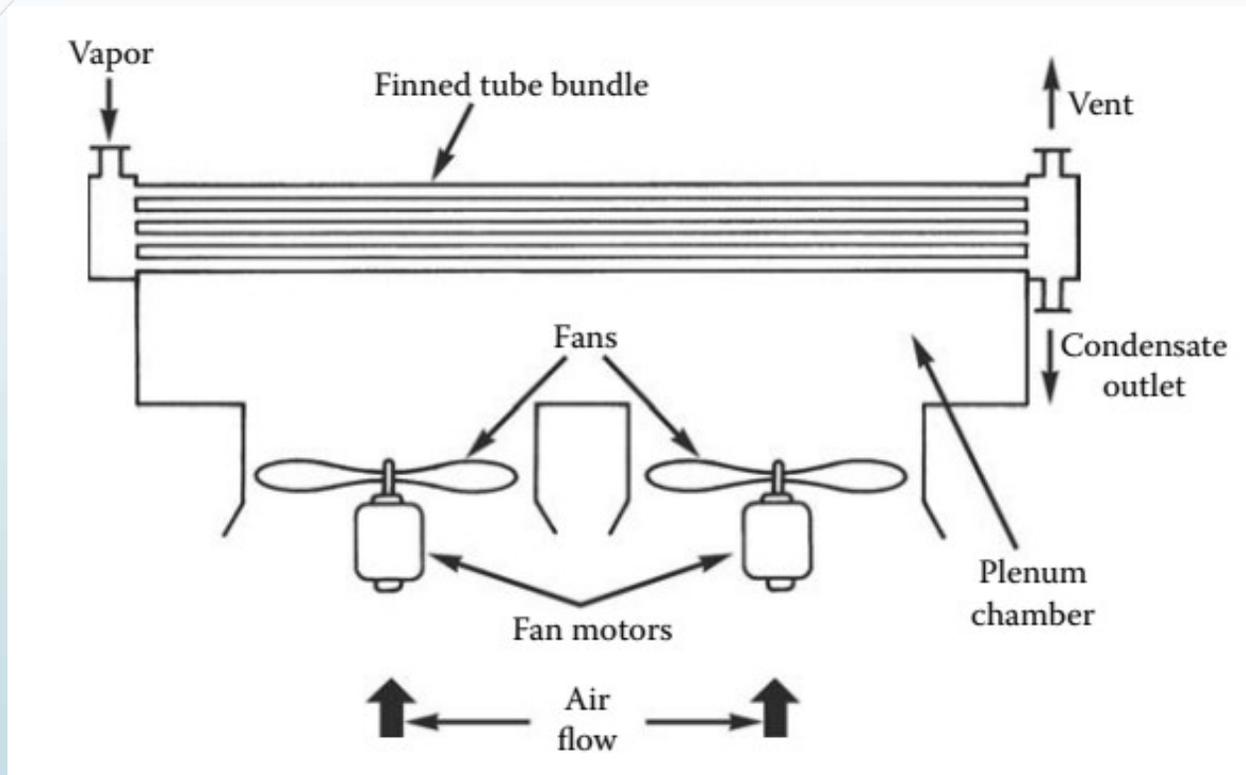
Intercambiadores de calor enfriados por aire

Características

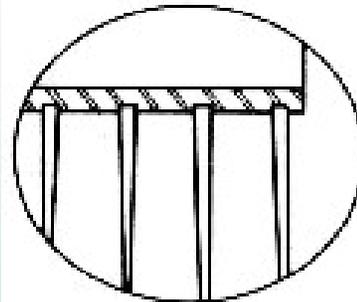
Se usan de uno a tres ventiladores de flujo axial, volumen elevado y baja presión.



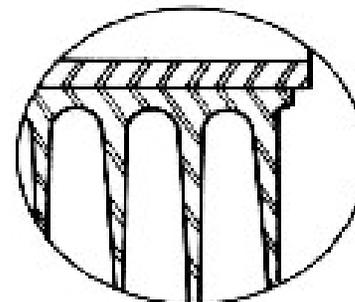
Como Condensador



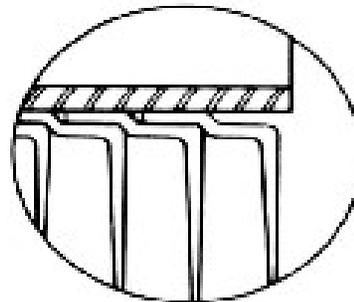
Tipos de aletas



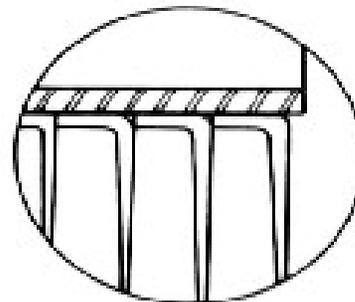
Empotrada



Integral



Traslapada recorrida



Recorrida



Configuraciones

Tiro forzado

- ▶ Ventiladores por debajo de los tubos empujando el aire a pasar entre los mismos.
- ▶ Requieren menor potencia.
- ▶ Mejor acceso para mantenimiento.

Tiro inducido

- ▶ Ventiladores por encima del haz, siendo el aire arrastrado a pasar por los tubos.
- ▶ Distribución más uniforme del aire.
- ▶ Brinda protección a los tubos.