

## UNIDAD 3

# OPERACIONES CON TRANSFERENCIA DE CALOR

# CONTENIDO DE LA UNIDAD 3

Revisión de mecanismos de transferencia de calor. Coeficiente global de transferencia de calor. Ecuaciones básicas de equipos de intercambio térmico. Equipos de intercambio térmico: clasificación, usos, ubicación en las plantas de proceso. Equipos de intercambio térmico sin cambio de fase: doble tubo, de tubo y coraza, de placa. Equipos de intercambio con cambio de fase: condensadores, evaporadores. Descripción de equipos.

# INTRODUCCION

- Transferencia de calor es la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas. Puede ser latente o sensible.
- 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. Los mecanismos por los que fluye el calor son tres: conducción, convección y radiación.

# La importancia de la transferencia de calor en el campo de la ingeniería industrial

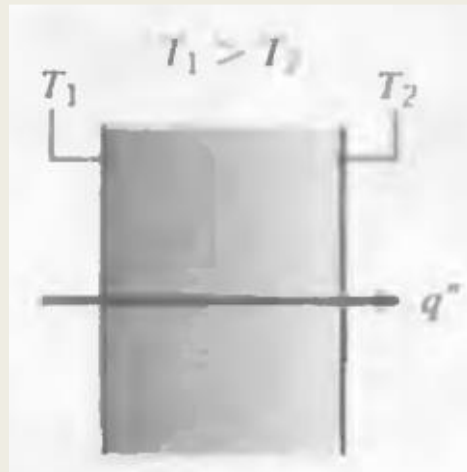
- Optimización de Procesos: En muchas industrias, como la manufacturera y la química, se utilizan procesos que implican cambios de temperatura en materiales. Comprender y controlar la transferencia de calor es crucial para optimizar estos procesos, mejorando la eficiencia y reduciendo costos.
- Diseño de Equipos y Sistemas: En la ingeniería industrial, se diseñan y operan una variedad de equipos y sistemas que involucran transferencia de calor, como intercambiadores de calor, hornos, calderas, refrigeradores, entre otros. Un entendimiento profundo de los principios de transferencia de calor es esencial para diseñar equipos eficientes y seguros.

- Eficiencia Energética: La transferencia de calor está intrínsecamente relacionada con la eficiencia energética. Al comprender cómo se transfiere el calor entre diferentes medios y cómo minimizar las pérdidas de calor, los ingenieros industriales pueden desarrollar sistemas más eficientes desde el punto de vista energético, lo que resulta en ahorros significativos de energía y costos operativos.
- Seguridad y Fiabilidad: En muchos procesos industriales, el control preciso de la transferencia de calor es vital para garantizar la seguridad y la fiabilidad. Por ejemplo, en la industria nuclear, se debe controlar cuidadosamente la transferencia de calor para evitar el sobrecalentamiento de los reactores y prevenir accidentes graves.

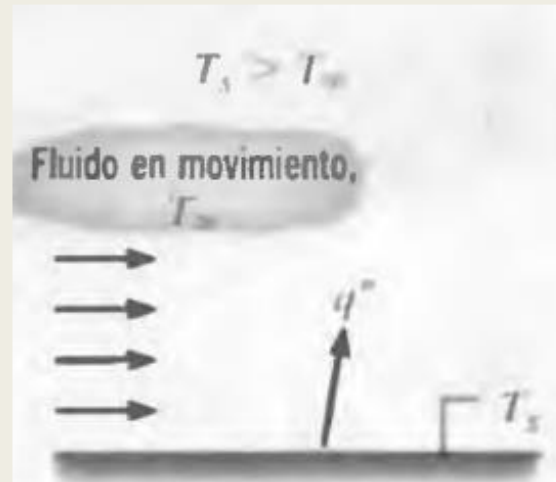
- Control de Calidad: En ciertas industrias, como la alimentaria y la farmacéutica, el control de la transferencia de calor es crucial para garantizar la calidad y la seguridad de los productos. Por ejemplo, en la pasteurización de alimentos, se utiliza calor para eliminar microorganismos dañinos, y es fundamental controlar cuidadosamente la transferencia de calor para garantizar que se alcance la temperatura adecuada en todo el producto.

En resumen, la transferencia de calor desempeña un papel fundamental en la ingeniería industrial al influir en la eficiencia de los procesos, el diseño de equipos, la eficiencia energética, la seguridad y la calidad del producto. Un conocimiento sólido de los principios de transferencia de calor es esencial para el éxito en este campo.

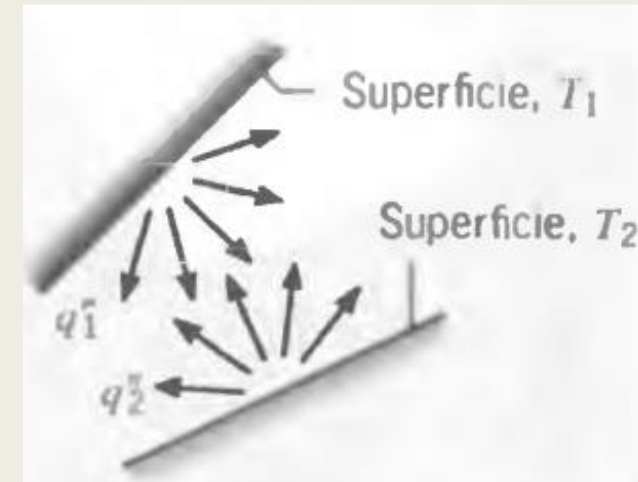
# MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR



CONDUCCION



CONVECCION



RADIACION

# Los principios básicos de transferencia de calor se basan en tres mecanismos fundamentales:

1 - Conducción: es el proceso de transferencia de calor a través de un medio estacionario, como un sólido. Se rige por la Ley de Fourier, que establece que la tasa de transferencia de calor es directamente proporcional al gradiente de temperatura y al área de sección transversal del material, e inversamente proporcional a su espesor. En términos simples, la conducción ocurre cuando las partículas de un material se calientan y transfieren calor a las partículas adyacentes sin movimiento macroscópico del material.

2 - Convección: es el proceso de transferencia de calor a través de un fluido en movimiento, ya sea líquido o gas. En este caso, el calor se transfiere mediante la combinación de conducción y movimiento del fluido. La transferencia de calor convectiva puede ser natural (debida a diferencias de densidad y temperatura en el fluido) o forzada (mediante el uso de ventiladores, bombas u otros dispositivos para mover el fluido). Los coeficientes de transferencia de calor convectiva dependen de las propiedades del fluido y de la geometría de los cuerpos implicados.

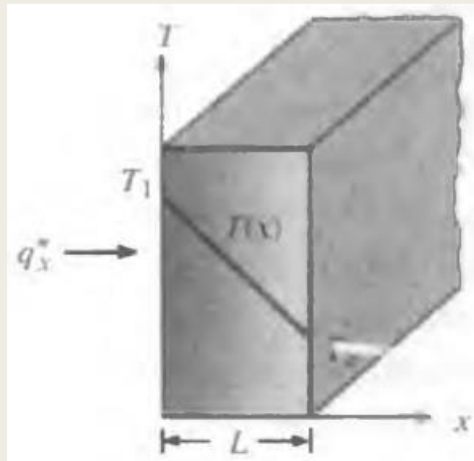


3 - Radiación térmica: es el proceso por el cual el calor se transfiere a través de ondas electromagnéticas, sin necesidad de un medio material. Todos los objetos emiten radiación térmica en forma de energía electromagnética, cuya cantidad depende de la temperatura del objeto y de sus propiedades radiativas. La transferencia de calor por radiación es importante en aplicaciones industriales y en el diseño de sistemas de calefacción y refrigeración.

Estos tres mecanismos de transferencia de calor son fundamentales en la comprensión de los procesos térmicos en la ingeniería industrial y son utilizados en el análisis y diseño de sistemas de intercambio térmico.

# CONDUCCION (Molecular)

Si existe un gradiente de temperatura en una sustancia, el calor fluye sin que tenga lugar un movimiento observable de la materia. El flujo de calor de este tipo recibe el nombre de conducción, y de acuerdo con la ley de Fourier, el flujo de calor es proporcional al gradiente de la temperatura y de signo opuesto.



$$\frac{dq}{dA} = -k \frac{dT}{dx}$$

$q$  = velocidad del flujo de calor en dirección normal a la superficie

$A$  = área de la superficie

$T$  = temperatura

$x$  = distancia normal a la superficie

$k$  = constante de proporcionalidad o conductividad térmica

$$q_x'' = k \frac{T_1 - T_2}{L} = k \frac{\Delta T}{L}$$

# Modo practico de la Ley de Fourier

La ley de Fourier describe cómo el calor se transfiere a través de un medio sólido

$$Q = -k \cdot A \cdot d \Delta T$$

- $Q$  es la cantidad de calor transferida por conducción (en vatios, W).
- $k$  es la conductividad térmica del material (en vatios por metro por grado Celsius o Kelvin,  $W/m^{\circ}C$  o  $W/mK$ ).
- $A$  es el área de la sección transversal a través de la cual se transfiere el calor (en metros cuadrados,  $m^2$ ).
- $\Delta T$  es la diferencia de temperatura a través del material (en grados Celsius o Kelvin,  $^{\circ}C$  o  $K$ ).
- $d$  es el espesor del material a través del cual se transfiere el calor (en metros, m).

# Ecuación de transferencia de calor

$$Q = m \cdot C \cdot \Delta T$$

$Q$  es la cantidad de calor transferida (en julios, J).

$m$  es la masa del material (en kilogramos, kg).

$C$  es el calor específico del material (en julios por kilogramo por grado Celsius o Kelvin,  $J/kg^{\circ}C$  o  $J/kgK$ ).

$\Delta T$  es el cambio de temperatura experimentado por el material (en grados Celsius o Kelvin,  $^{\circ}C$  o K).

# CONVECCION (Turbulento)

La convección se refiere al flujo de calor asociado con el movimiento de un fluido, tal como cuando el aire caliente de un horno entra a una habitación, o a la transferencia de calor de una superficie caliente a un fluido en movimiento. Por lo general, el flujo convectivo por unidad de área 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.

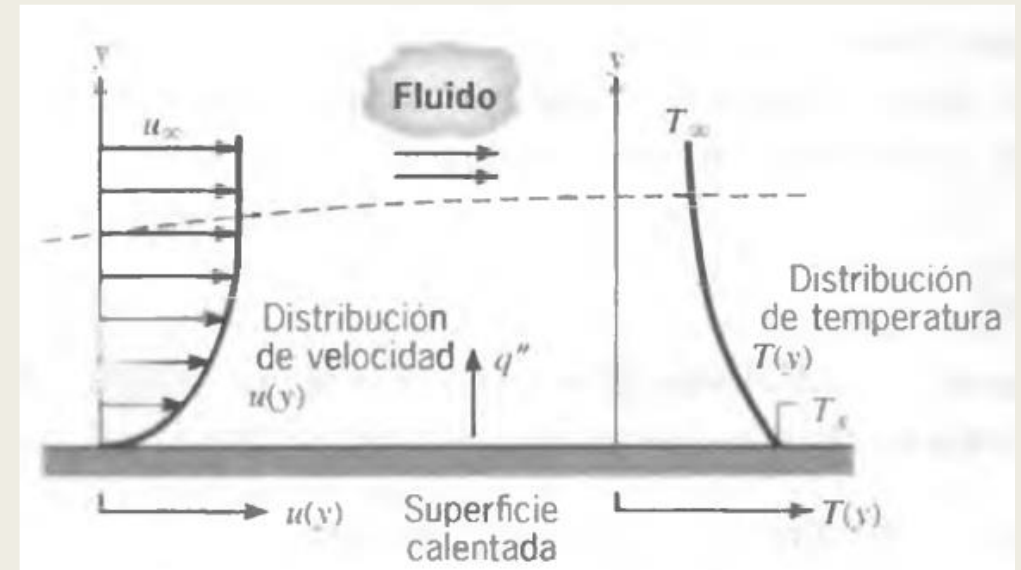
$$\frac{q}{A} = h(T_s - T_f)$$

$T_s$  = temperatura de la superficie

$T_f$  = temperatura global del fluido, más allá de la superficie

$h$  = coeficiente de transferencia de calor

$$q'' = h(T_s - T_\infty)$$



# Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección

Proceso	$h$ (W/m <sup>2</sup> · K)
Convección libre	
Gases	2-25
Líquidos	50-1000
Convección forzada	
Gases	25-250
Líquidos	50-20,000
Convección con cambio de fase	
Ebullición o condensación	2500-100,000

# RADIACION

Radiación es el término que se emplea para designar a la transferencia de energía a través del espacio por medio de ondas electromagnéticas. Si la radiación pasa a través de un espacio vacío, no se transforma en calor ni en otra forma de energía, ni se desvía de su trayectoria. Sin embargo, si en su trayectoria encuentra algún material, la radiación se transferirá, reflejará o absorberá. Sólo la energía absorbida es la que aparece como calor y esta transformación es cuantitativa.

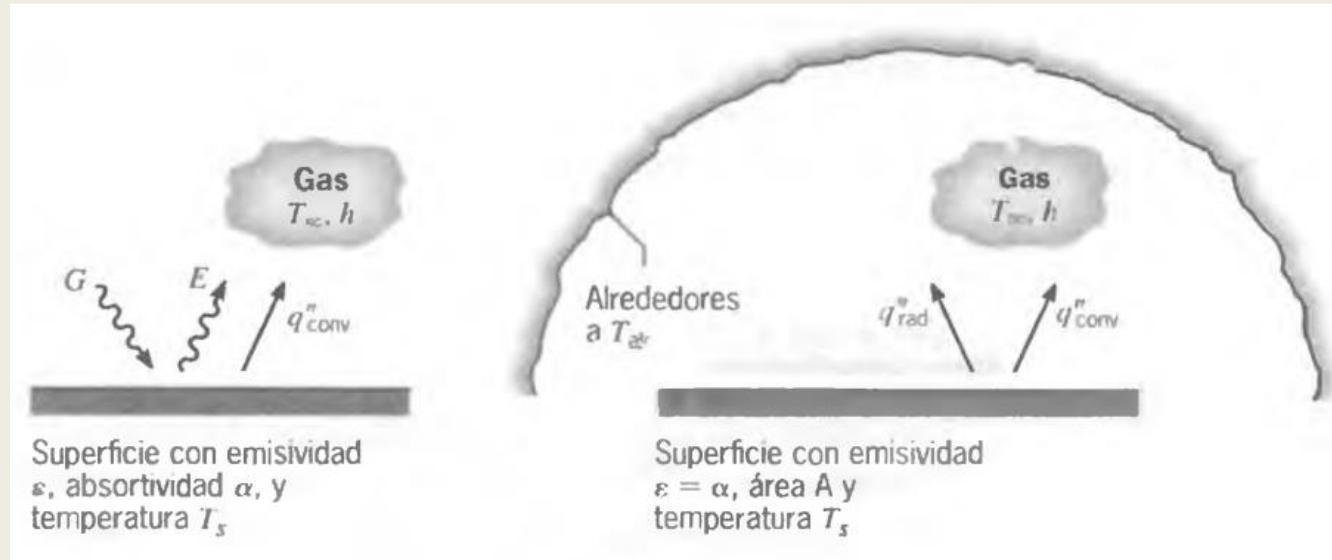
$$W_b = \sigma T^4$$

$W_b$  = velocidad de emisión de la energía radiante por unidad de área

$\sigma$  = constante de Stefan-Boltzmann

$T$  = temperatura absoluta

# Emisividad y absortividad



Donde  $\varepsilon$  es una propiedad radiativa de la superficie denominada emisividad. Con valores en el rango  $0 < \varepsilon < 1$ .

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4$$

La velocidad a la que la energía radiante es absorbida por área superficial unitaria se evalúa a partir del conocimiento de una propiedad radiativa de la superficie denominada absortividad  $\alpha$ .

$$G_{abs} = \alpha G$$



# INTERCAMBIADORES DE CALOR

El proceso de intercambio de calor entre dos fluidos que están a diferentes temperaturas y separados por una pared sólida, ocurre en muchas aplicaciones de ingeniería. El dispositivo que se utiliza para llevar a cabo este intercambio se denomina intercambiador de calor.

# COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Se define en términos de la resistencia térmica para la transferencia de calor entre dos fluidos.

Consideraciones:

$$dq = -U \Delta T dA$$

- 1) El coeficiente global  $U$  es constante.
- 2) Los calores específicos de los fluidos frío y caliente son constantes.
- 3) El intercambio de calor con el medio ambiente es despreciable.
- 4) El flujo es estacionario, tanto para flujo en contracorriente como en paralelo.

El coeficiente de transferencia de calor cuya medición experimental es más fácil, es el coeficiente total. Por lo general es posible medir la diferencia total de temperaturas y la transferencia total de calor en forma directa, para un intercambiador de calor de área conocida. Es posible calcular el coeficiente total ( $U$ ), mediante la relación

# Valores representativos del coeficiente global de transferencia de calor

Fuente: Fundamentos de transferencia de calor – Frank P. Incropera

Combinación de fluidos	$U$ (W/m <sup>2</sup> · K)
Agua con agua	850-1700
Agua con aceite	110-350
Condensador de vapor (agua en tubos)	1000-6000
Condensador de amoníaco (agua en tubos)	800-1400
Condensador de alcohol (agua en tubos)	250-700
Intercambiador de calor de tubos con aletas (agua en tubos, aire en flujo cruzado)	25-50

# Coeficientes totales típicos de transferencia de calor

Fuente:  
Principios de  
Operaciones  
Unitarias -  
Alan s. Foust

Tipo de Cambiador	Dentro o tubo		Fuera o coraza			Ref.
	Fluido	Velocidad pie/s	Fluido	Velocidad pie/s	Btu/h pie <sup>2</sup> °F	
Coraza y tubo	Salmuera	1-3	Agua	1-5	50-400	7
Coraza y tubo	Agua	2	Aceite ligero	3.0	50-70	7
Coraza y tubo	Agua	2	Aceite lubricante	0.2	15	7
Coraza y tubo	Agua	5	Gasolina	Condensación	90	7
Coraza y tubo	Petróleo	2	Gasolina	Condensación	20-30	7
Coraza y tubo	Petróleo	10	Aceite ligero	6.0	80-90	7
Coraza y tubo	Agua	4-6	Vapor	Condensación	400-800	7
Tubo doble	Agua	3-8	Salmuera	3-8	150-300	7
Serpentín en caja	Aceite ligero	Condensación	Agua	Convección natural	8-20	7
Banco de tubos	Vapor	Condensación	Aire	10	9	7
Evaporador de canasta	Salmuera	Ebullición	Vapor	Condensación	150-225	7
Evaporador de tubos verticales	Agua	Ebullición	Vapor	Condensación	400-1000	7
Vaporizador	Vapor	Condensación	Orgánico	Ebullición	300	15
Vaporizador	Vapor	Condensación	Acido acético	Ebullición	450	15

# Valores de los coeficientes de la transferencia de calor

- Fuente: Operaciones unitarias en ingeniería química – Warren L. McCabe

Tipo de procesos	Rango de valores de $h$	
	$W/m^2 \cdot ^\circ C$	$Btu/ft^2 \cdot h \cdot ^\circ F$
Vapor de agua (condensación en gotas)	30 000-100 000	5 000-20 000
Vapor de agua (condensación en película)	6 000-20 000	1 000-3 000
Ebullición de agua	1 700-50 000	300-9 000
Vapores orgánicos condensables	1 000-2 000	200-400
Agua (calentamiento o enfriamiento)	300-20 000	50-3 000
Aceites (calentamiento o enfriamiento)	50-1 500	10-300
Vapor de agua (sobrecalentamiento)	30-100	5-20
Aire (calentamiento o enfriamiento)	1-50	0.2-10

Para convertir de  $Btu/ft^2 \cdot h \cdot ^\circ F$  a  $W/m^2 \cdot ^\circ C$ , multiplicar por 5.6783.

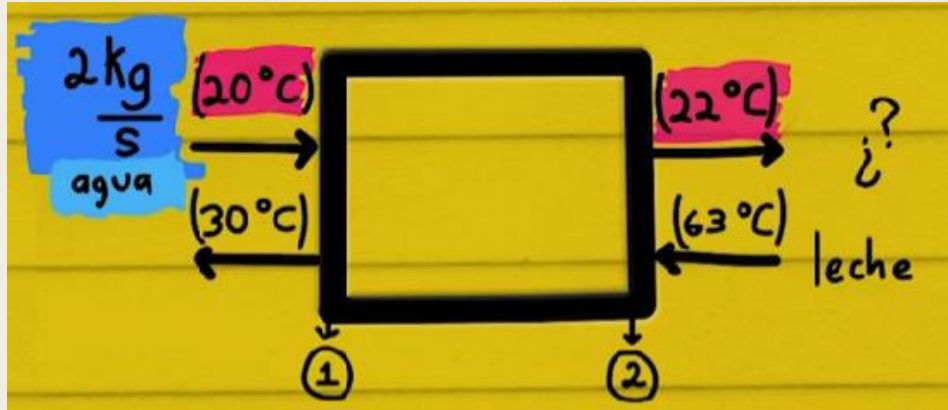
# Ejemplo

Se tiene un intercambiador de tubos y coraza con 2 pasos por los tubos y un paso por la coraza, en el cual se utilizan 2 kg/s de agua ( $C_p=4.187$  J/Kg °K) que entra a 20 °C y sale a 22 °C. Para enfriar una corriente de leche ( $C_p=3.725$  J/Kg °K) desde 63 °C a 30 °C. Si el intercambiador en cuestión tiene un área de 7 m<sup>2</sup> y un  $F_t= 0,92$ .

Determine:

- a) El flujo de leche que se enfría.
- b) La diferencia logarítmica media de temperaturas.
- c) La diferencia logarítmica media de temperatura corregida.
- d) El coeficiente global (U) de transferencia de calor para este intercambiador.

## Calculo de la cantidad de calor transmitida

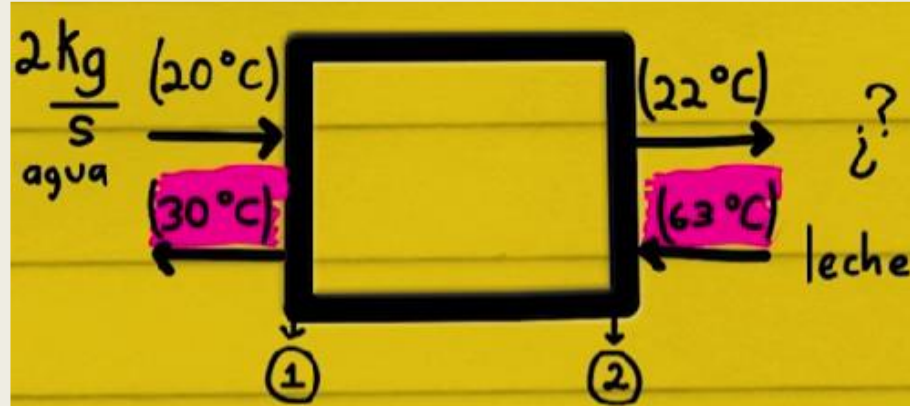


The diagram shows a rectangular heat exchanger with two ports at the bottom, labeled 1 and 2. Water flows from left to right through the top half, entering at 20°C and exiting at 22°C. Milk flows from right to left through the bottom half, entering at 63°C and exiting at 30°C. The mass flow rate of water is 2 kg/s. A question mark is placed above the milk flow exit.

$A = 7 \text{ m}^2$   $C_p \text{ agua} = 4187 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$   
 $F_T = 0,92$   $C_p \text{ leche} = 3725 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

$$q = (\dot{m} C_p \Delta T)_{\text{agua}}$$
$$q = 2 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 4187 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (22 - 20) = 16748 \text{ W}$$

## Calculo flujo másico de leche



$$A = 7 \text{ m}^2 \quad C_p \text{ agua} = 4187 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$F_T = 0,92 \quad C_p \text{ leche} = 3725 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$q_{\text{agua}} = 16748 \text{ W}$$

a)  $\dot{m}$  leche

$$\dot{m} = \frac{16748}{C_p \Delta T} = \frac{16748}{3725 \cdot (63 - 30)}$$

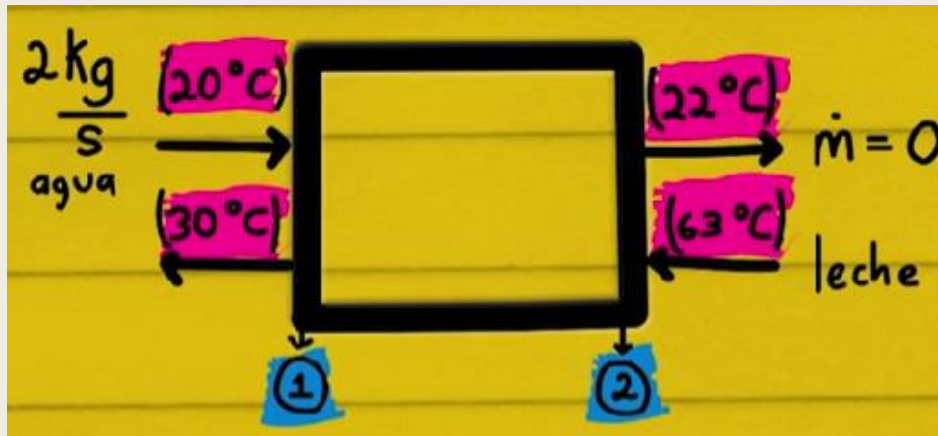
$$q_{\text{agua}} = q_{\text{leche}}$$

$$16748 = (\dot{m} C_p \cdot \Delta T)_{\text{leche}}$$

$$\dot{m} = \boxed{0,14 \text{ kg/s}}$$



## Cálculo de la diferencia de temperatura media logarítmica



The diagram shows a rectangular heat exchanger. On the left side, water flows from top to bottom, with an inlet temperature of 20°C and an outlet temperature of 30°C. On the right side, milk flows from bottom to top, with an inlet temperature of 63°C and an outlet temperature of 22°C. The mass flow rate of milk is given as  $\dot{m} = 0,14 \text{ kg/s}$ . Two points are marked at the bottom: ① at the water outlet and ② at the milk outlet.

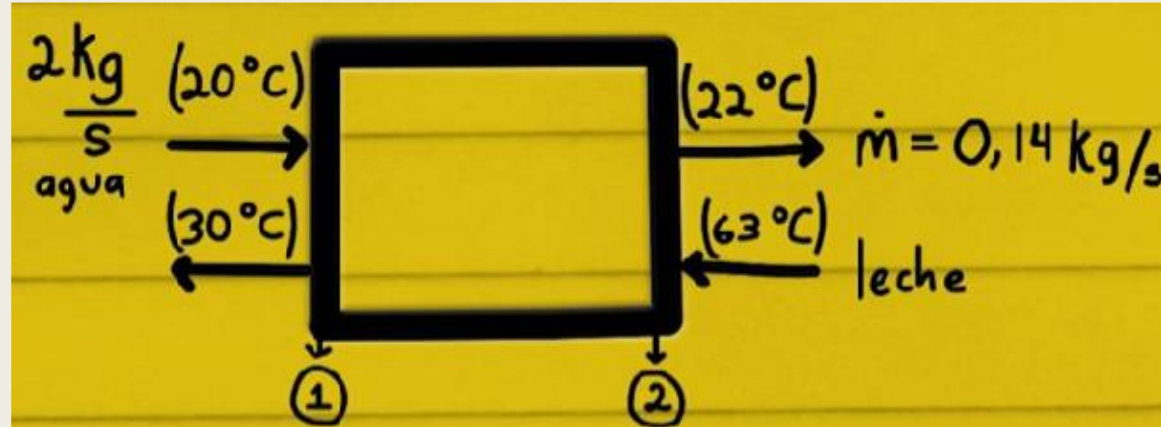
Parameters and constants:

- $A = 7 \text{ m}^2$
- $C_p \text{ agua} = 4187 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
- $F_T = 0,92$
- $C_p \text{ leche} = 3725 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
- $q \text{ agua} = 16748 \text{ w}$

b)  $\Delta T_{lm}$

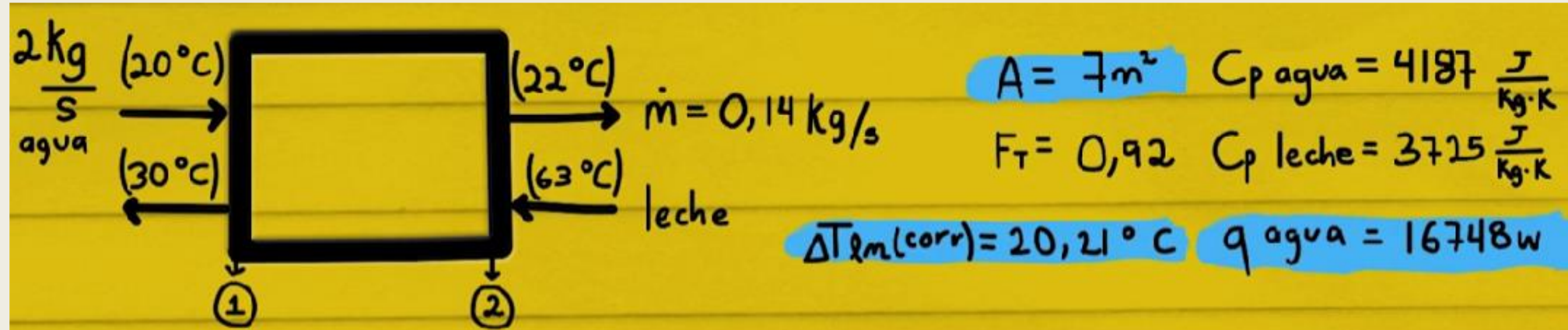
$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)}$$
$$\Delta T_{lm} = \frac{(63 - 22) - (30 - 20)}{\ln\left(\frac{63 - 22}{30 - 20}\right)}$$
$$\Delta T_{lm} = 21,97^\circ \text{C}$$

## Calculo de la diferencia de temperatura media logarítmica corregida



$$\begin{aligned} c) \quad & \Delta T_{lm}(\text{corr}) \\ & = \Delta T_{lm} \cdot F_T \\ & = 21,97 \cdot 0,92 \\ & = 20,21^\circ \text{C} \end{aligned}$$

## Calculo del Coeficiente global de transferencia de calor



$$A = 7 \text{ m}^2 \quad C_p \text{ agua} = 4187 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$F_T = 0,92 \quad C_p \text{ leche} = 3725 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\Delta T_{lm}(\text{corr}) = 20,21^{\circ}\text{C} \quad q_{\text{agua}} = 16748 \text{ W}$$

d) U

$$q = U A \Delta T_{lm}(\text{corr})$$

$$U = \frac{q}{A \Delta T_{lm}(\text{corr})}$$

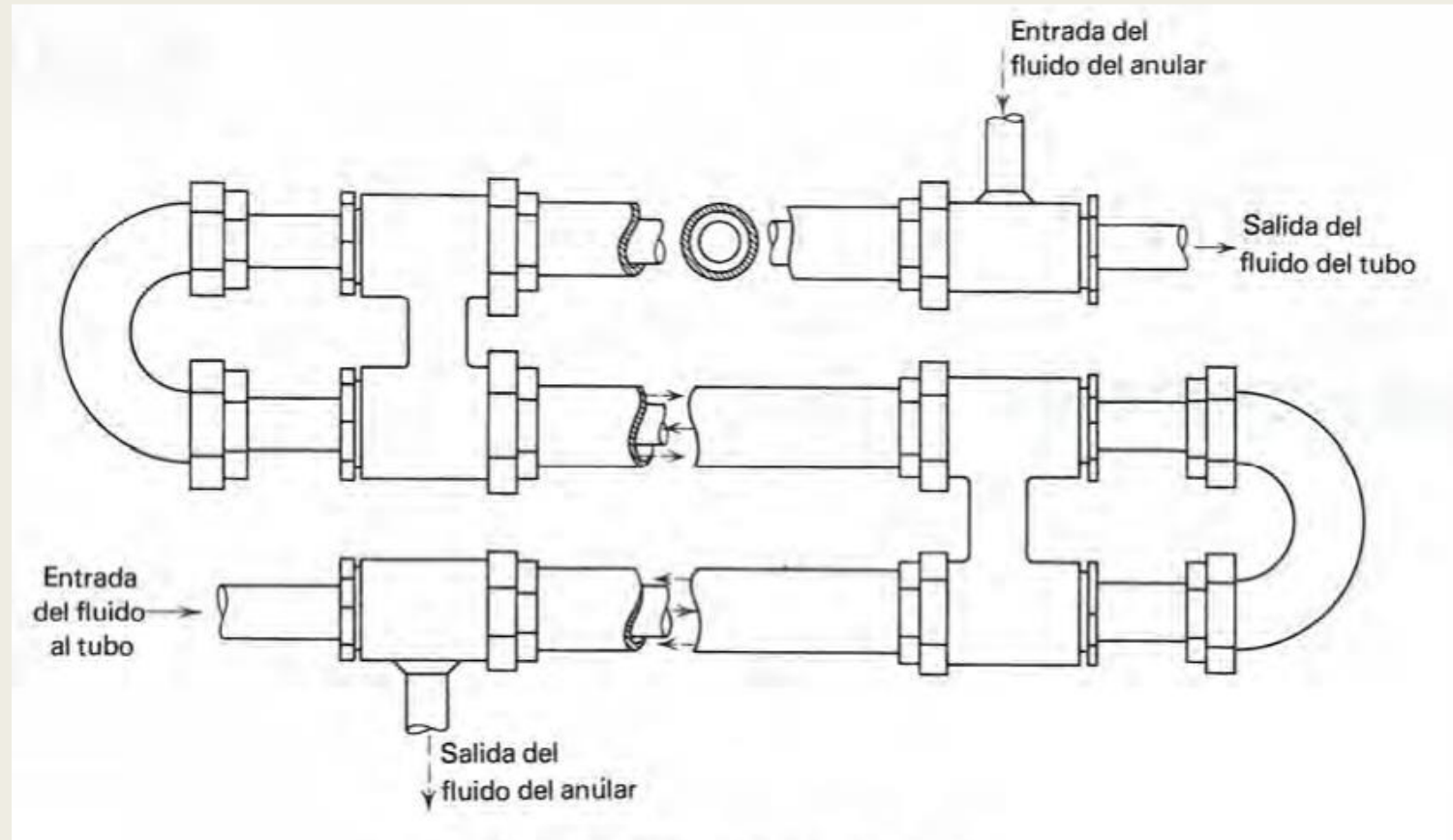
$$U = \frac{16748 \text{ W}}{7 \text{ m}^2 \cdot 20,21^{\circ}\text{C}}$$

$$U = 118,4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

# TIPOS DE INTERCAMBIADORES DE CALOR

# Intercambiadores de calor de doble tubo

El intercambiador de calor de doble tubo consiste en dos tubos concéntricos, de manera que por el tubo central fluye un fluido, mientras que por el espacio anular fluye otro, ya sea a contracorriente o en paralelo.



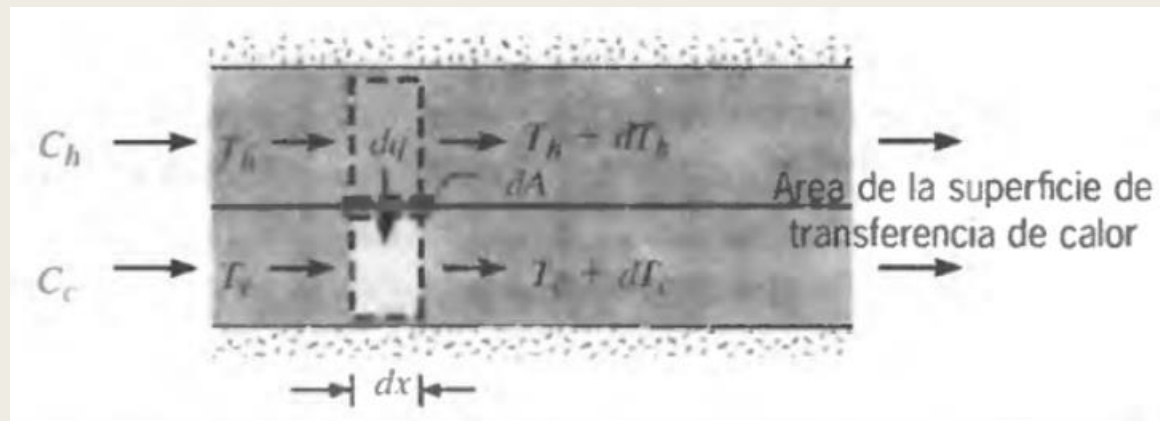
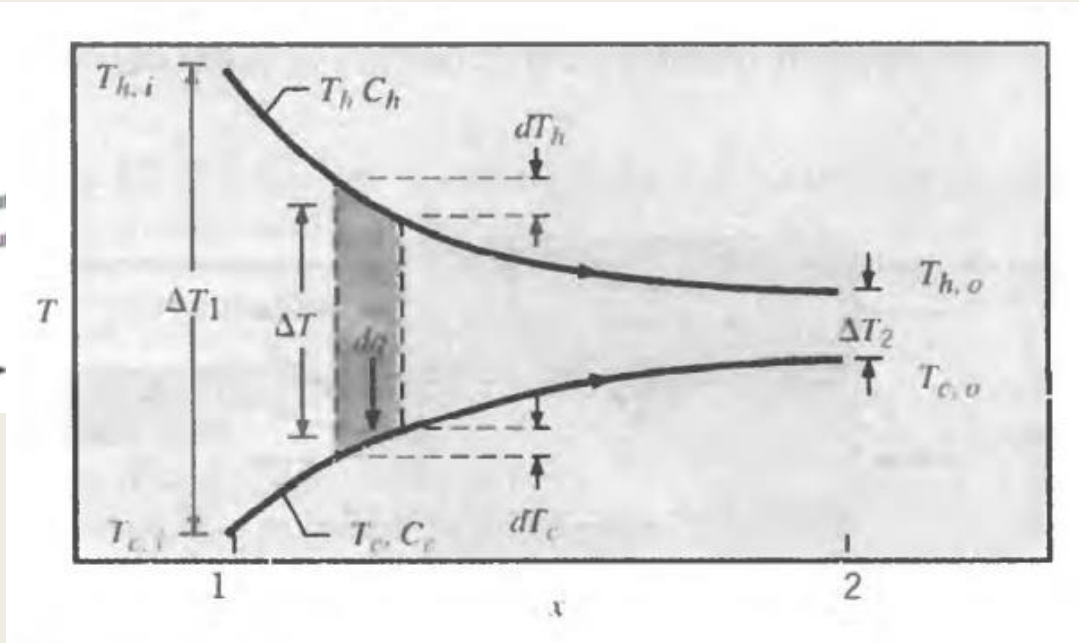
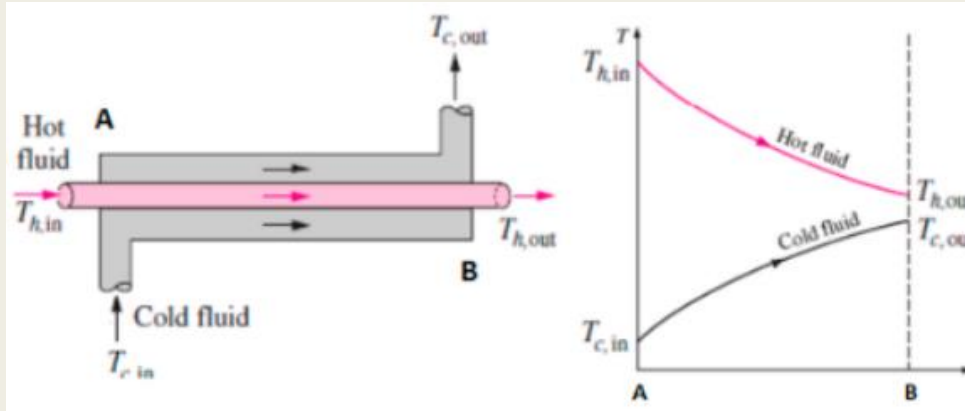
# Aplicaciones

- Para la extracción de la sacarosa de la remolacha o la purificación del cloruro de sodio.
- Intercambiadores de calor sanitarios de doble tubo, con tubo interior no extraíble. Este intercambiador de calor de tubo en tubo está especialmente diseñado para procesos de calentamiento (pasteurización, esterilización, UHT, etc.) o enfriamiento de productos con baja-media viscosidad. Los productos pueden contener fibras o partículas de gran tamaño. Este intercambiador de calor de doble tubo está especialmente diseñado para productos como carnes picadas, zumos, yogur con trozos, subproductos de pescado, cremas, entre otros.
- Intercambiadores de calor farmacéuticos de doble tubo, con tubo interior no extraíble. Este intercambiador de calor de tubo en tubo está especialmente diseñado para calentar o enfriar agua para inyección, agua purificada, agua destilada, así como productos típicos de la Industria Biotecnológica y la Industria Farmacéutica, como pueden ser glucosas, emulsiones, lociones y cosméticos, entre otros.
- Intercambiadores de calor industriales de doble tubo, con tubo interior no extraíble. Este intercambiador de calor de tubo en tubo está especialmente diseñado para procesos de calentamiento o enfriamiento de productos como aceites, efluentes, aguas sucias, aguas residuales, lodos y purines, entre otros.



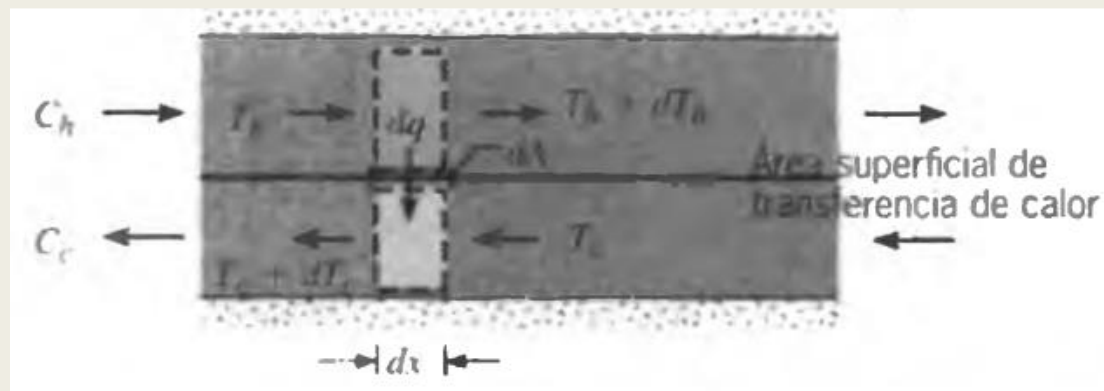
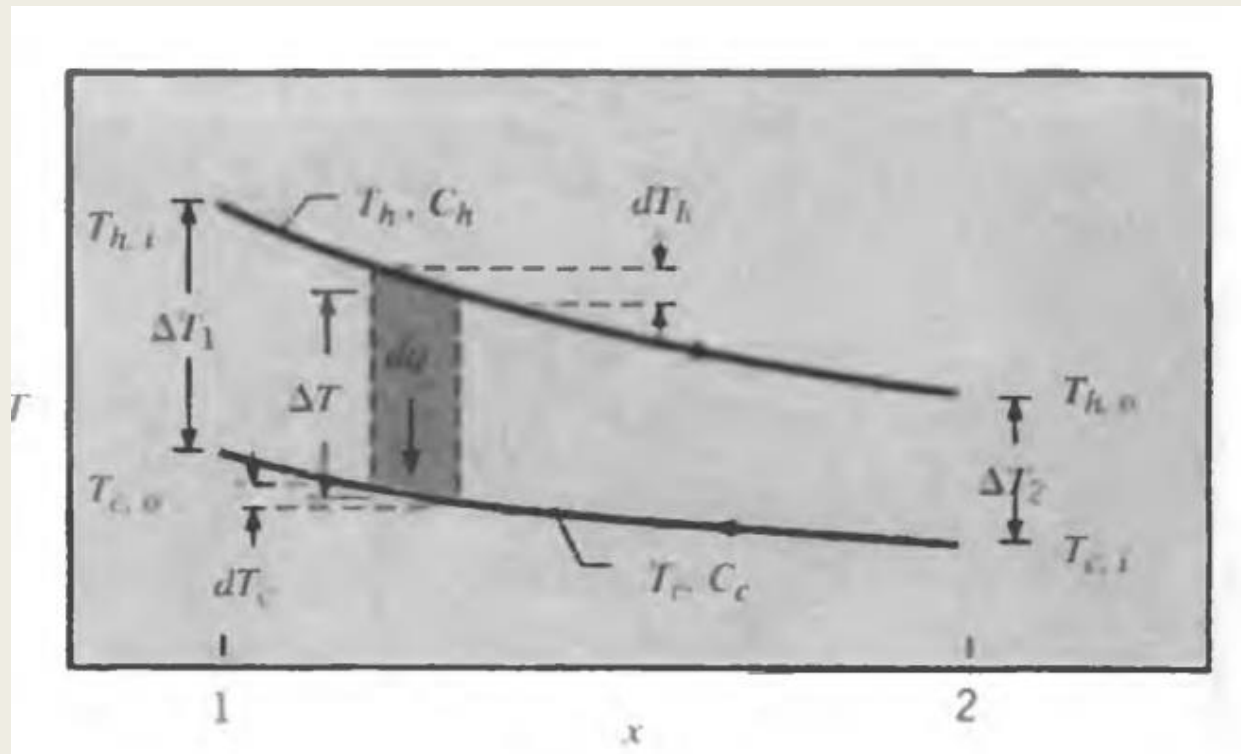
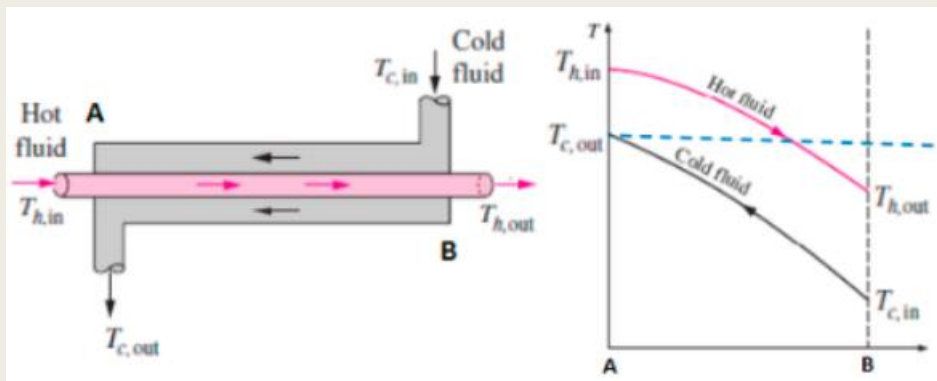
Procesos de Producción 2024 - RA 2

# FLUJO PARALELO





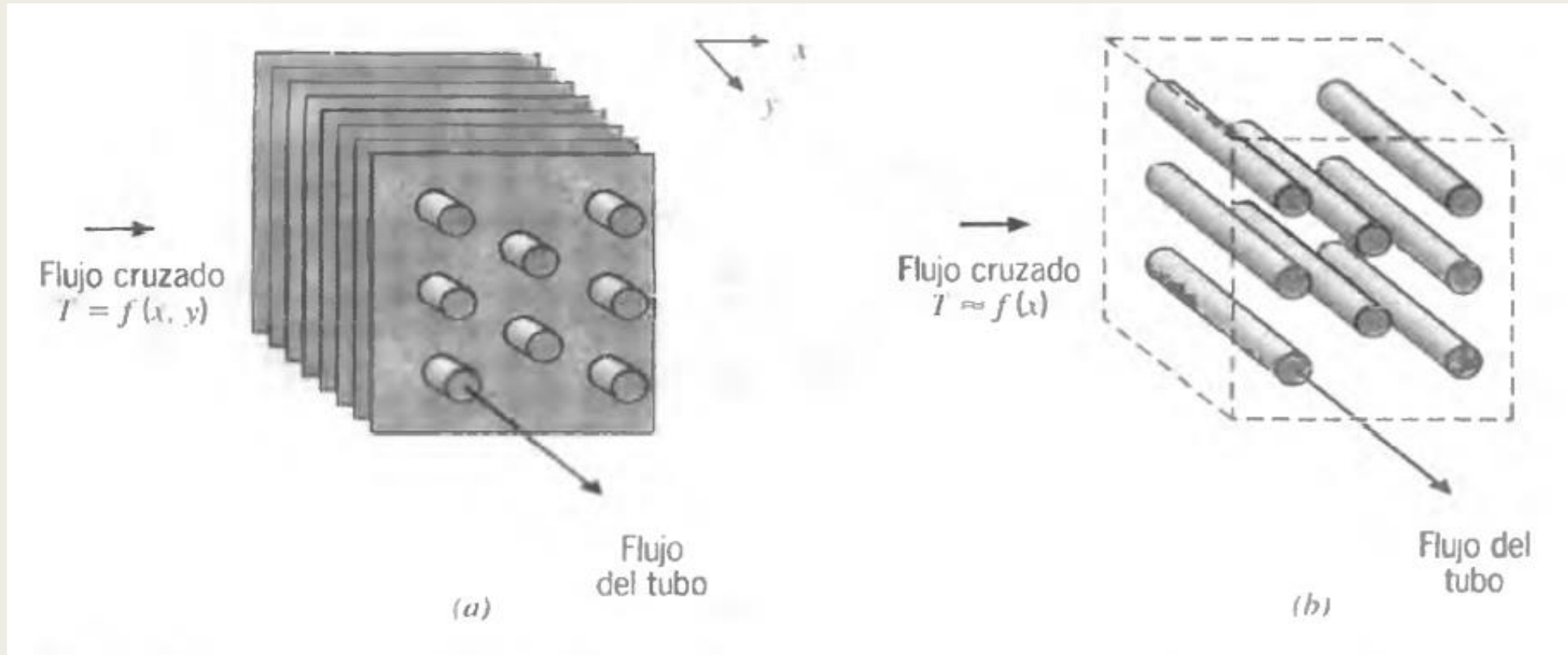
# FLUJO CONTRA CORRIENTE



# Ventajas del intercambiador por contracorriente

- Ventajas del intercambiador por contracorriente
- Alta eficiencia, hasta el 92%
- Dimensiones compactas, lo que se traduce en una unidad de recuperación de calor más pequeña y económica
- 1,5 veces más pequeño que un intercambiador de flujos cruzados comparable
- Amplia gama de productos (aluminio, plástico)

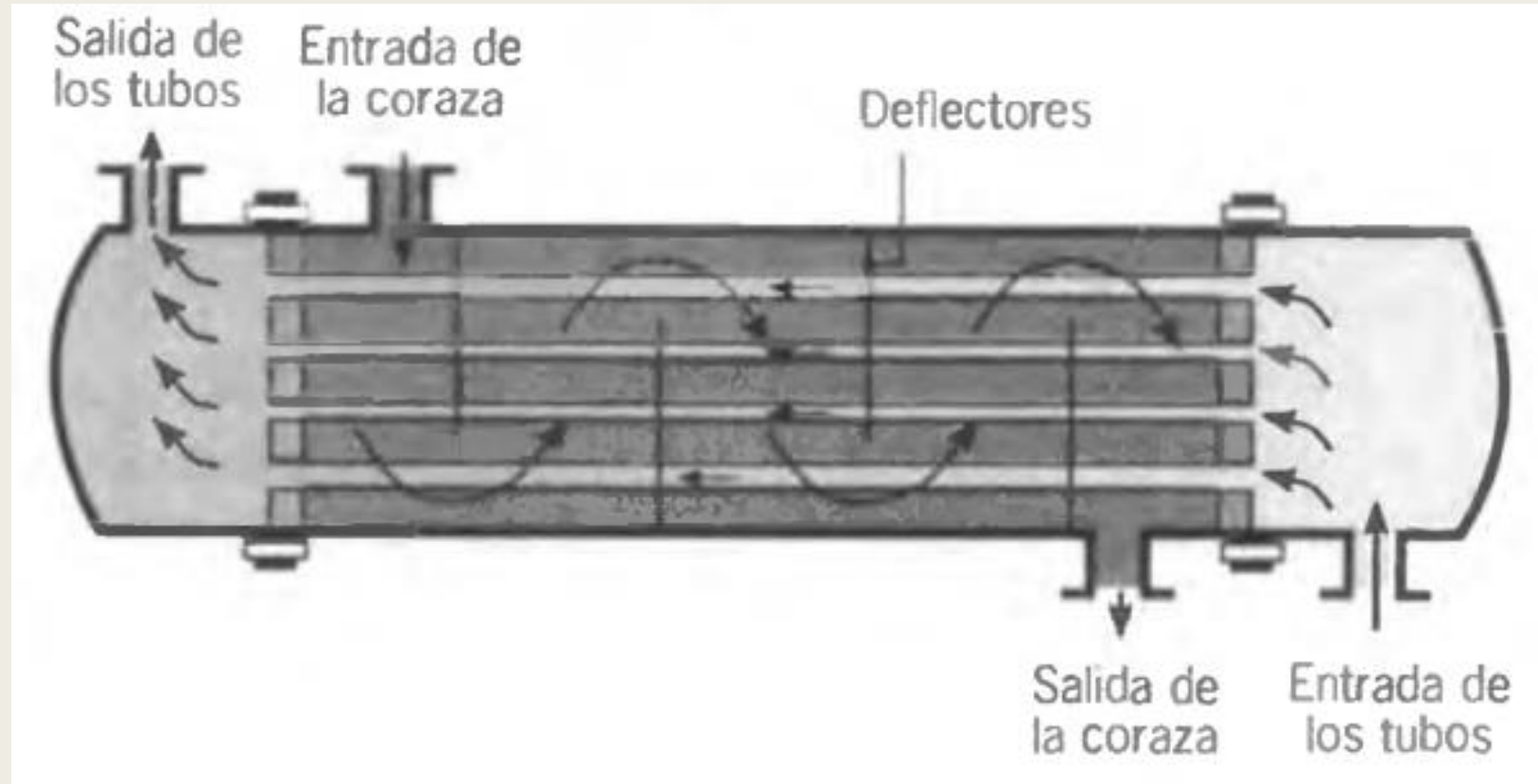
# Intercambiadores de flujo cruzado



a) Con aletas y ambos fluidos sin mezclar

b) Sin aletas, con un fluido sin mezclar y el otro mezclado.

# Intercambiador de tubo y coraza



Con un paso por la coraza y un paso por los tubos (modo de operación de contraflujo cruzado).

# Ventajas del intercambiador de calor tubular

- Bajos costes en mantenimiento.
- Altas presiones de trabajo.
- Altas temperaturas de operación.
- Procesado de fibras o partículas.
- Gran seguridad en procesos asépticos.
- Fácil inspección y desmontaje.
- Fácil de ampliar.

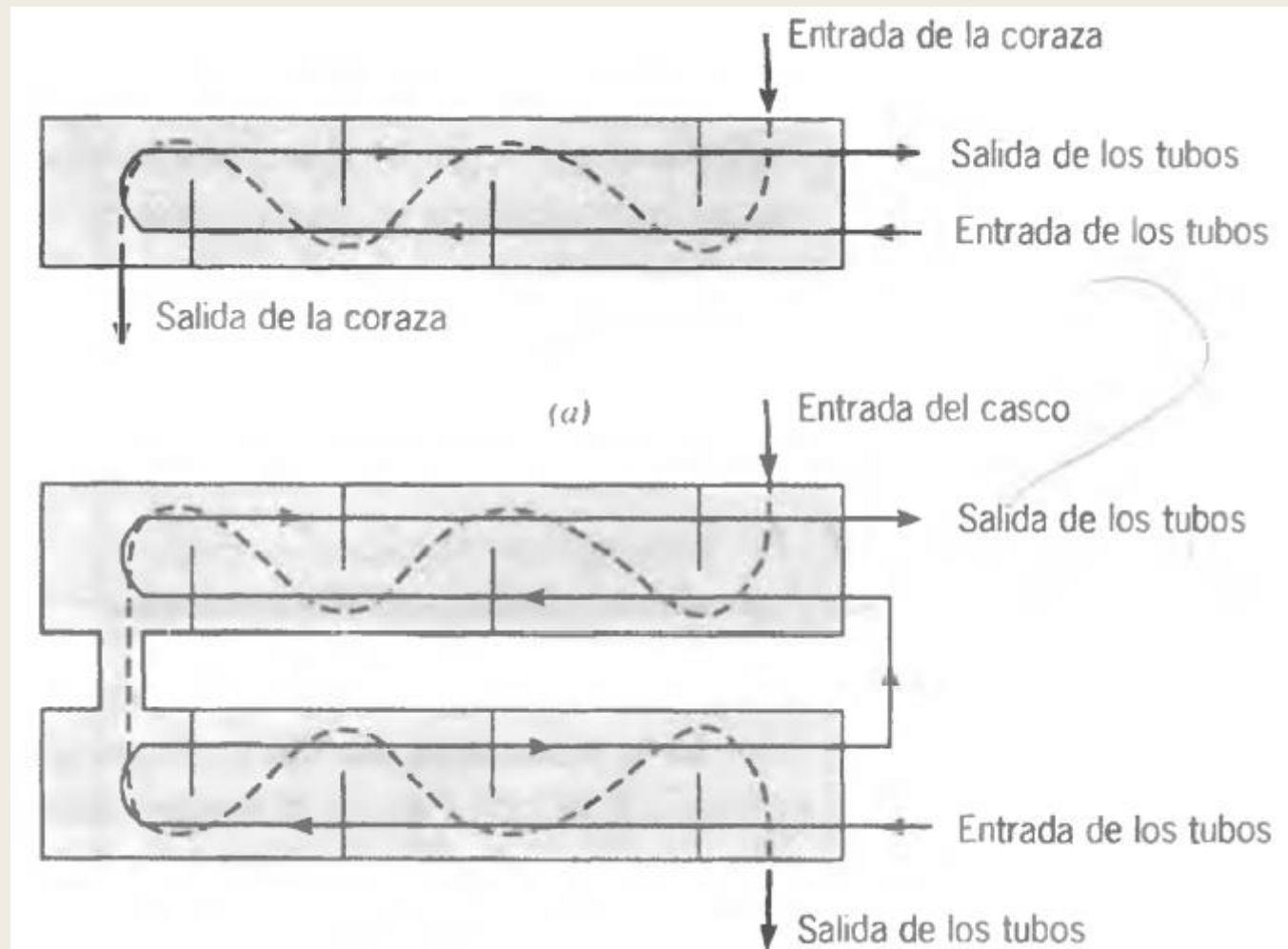
# Principales usos del intercambiador de calor

- Elevar la temperatura de un fluido, usando otro más caliente.
- Refrigerar un fluido usando otro que se encuentra a menos temperatura.
- Condensar gases.
- Evaporar líquidos.

Aplicaciones Sanitarias: son aquellas aplicaciones destinadas a la industria alimentaria, en donde hay que poner especial atención en los acabados, la limpieza CIP y la drenabilidad del equipo.

Aplicaciones Farmacéuticas: son aquellas aplicaciones destinadas a la industria farmacéutica y biotecnológica, donde la certificación de rugosidad juega un papel primordial, y cuyo diseño está especialmente destinado a evitar la contaminación cruzada.

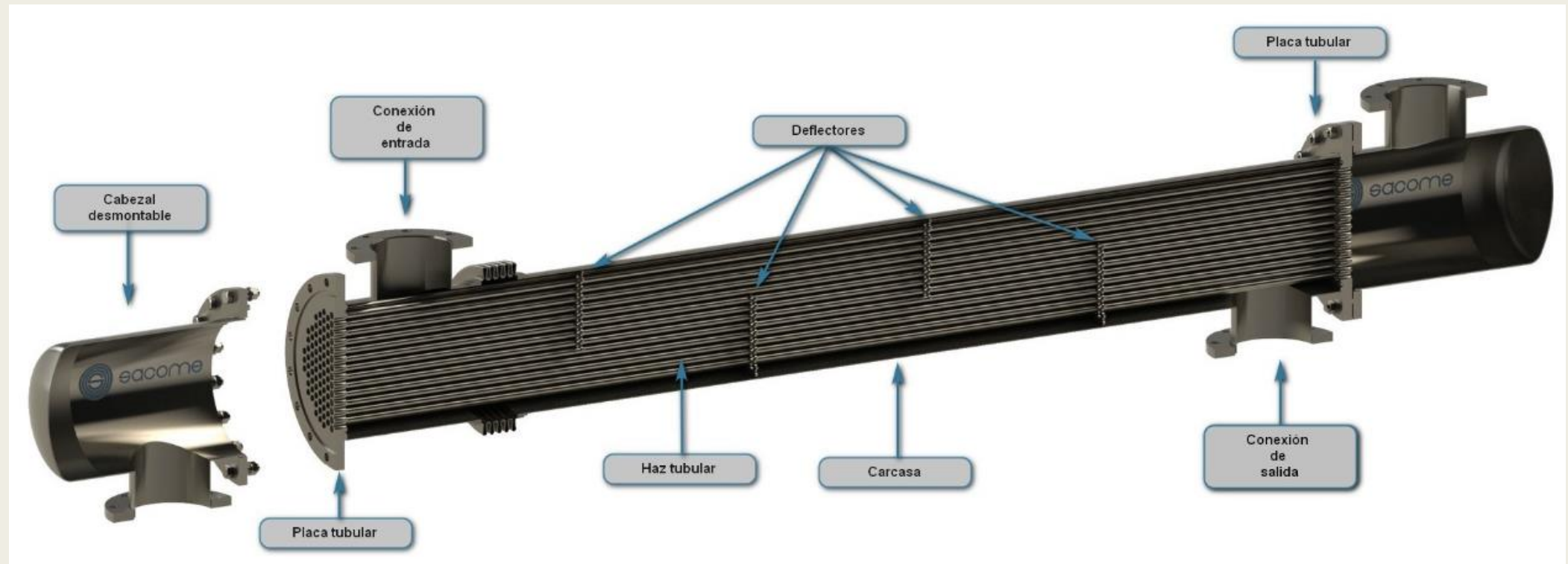
Aplicaciones Industriales: son aquellas aplicaciones destinadas a la industria química y petroquímica, en donde prima garantizar una larga vida útil, y la alta fiabilidad de los equipos.



- a) Un paso por la coraza y dos pasos por los tubos.
- b) Dos pasos por la coraza y cuatro pasos por los tubos.

Haz tubular: El haz tubular es el conjunto de tubos que proporcionan la superficie de transferencia de calor entre el fluido que circula por su interior y el fluido que circula por la carcasa. En este conjunto de tubos es donde se encuentra el producto a calentar.

Placa tubular: La placa tubular es una placa de metal que ha sido perforada o taladrada, donde se alojan los tubos que forman el intercambiador de calor tubular, los cuales se fijan mediante expansión o soldadura. En el caso de que se requiera una protección extra de las fugas puede utilizarse una doble placa tubular.





**Deflectores:** El principal objetivo de los deflectores es controlar la dirección general del flujo del lado de la carcasa.

**Carcasa y conexiones:** La carcasa es la envolvente del segundo fluido o fluido secundario. La carcasa generalmente es de sección circular y está hecha de una placa de acero conformado en forma cilíndrica y soldado longitudinalmente. La carcasa dispone de conexiones para la entrada y salida del fluido secundario.

**Cabezales desmontables:** Los cabezales desmontables son elementos conectados a las placas tubulares por ambos extremos del intercambiador de calor cuya misión es la de facilitar la circulación del producto por el haz tubular.

## Intercambiadores Compactos

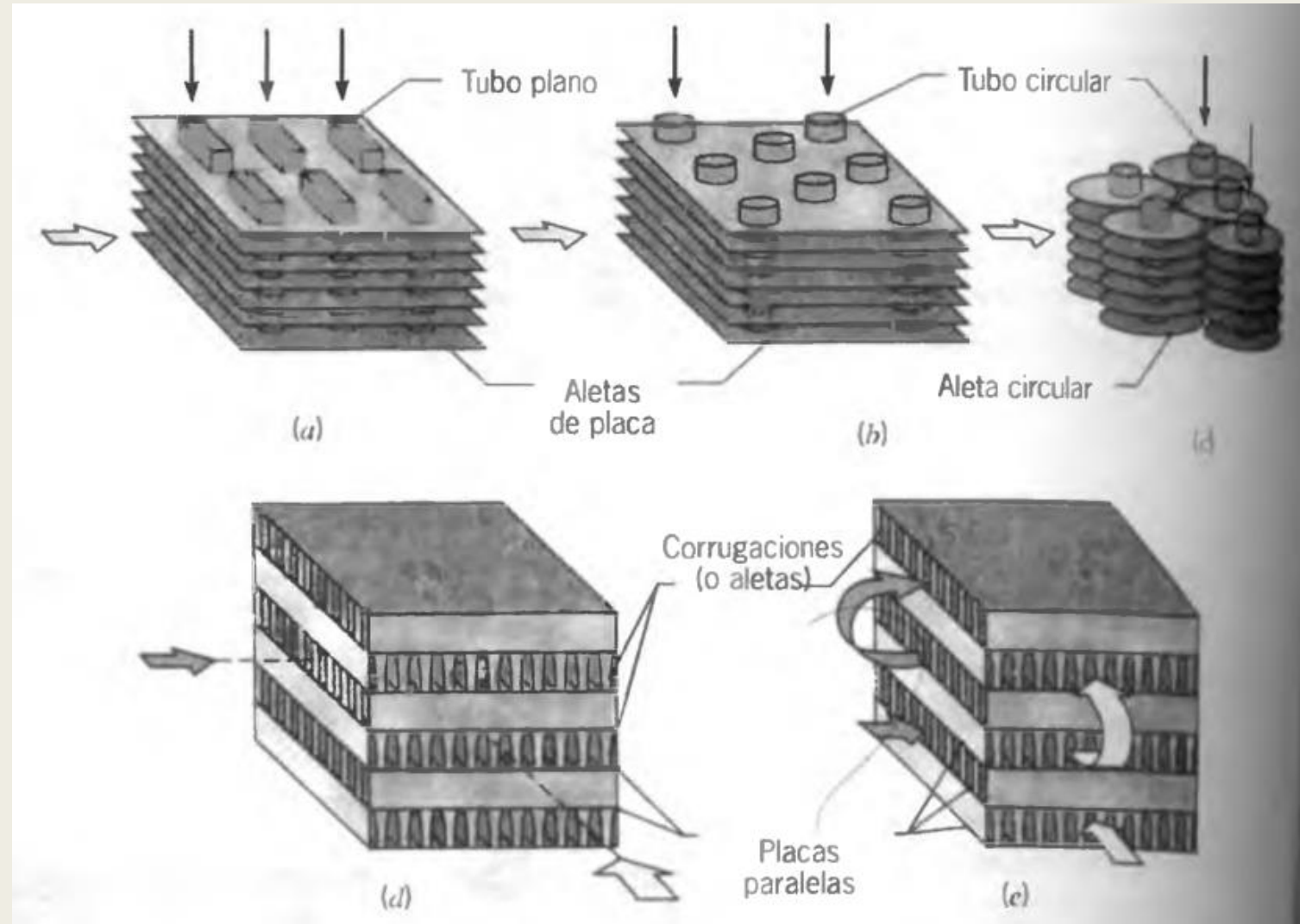
a) Tubos con aletas  
aletas continuas,  
tubos cuadrados

b) Tubos con aletas,  
aletas continuas,  
tubos circulares.

c) Tubos con aletas,  
tubos y aletas  
circulares.

d) Aletas de placas,  
de un solo paso.

e) Aletas de placa, multipaso.



# Ventajas y campo de aplicación de los intercambiadores de flujos cruzados

Las principales áreas de aplicación de los intercambiadores de flujos cruzados son aplicaciones para caudales superiores a 10.000 m<sup>3</sup>/h.

## **Ventajas de un intercambiador de flujos cruzados:**

- Instalación más sencilla, especialmente en unidades grandes.
- Precio más bajo del propio intercambiador.
- Solución más sencilla para la entrada y salida de aire.

# Uso de la diferencia de temperatura media logarítmica

Balance de energía

$$q = \dot{m}_h (i_{h,i} - i_{h,o})$$

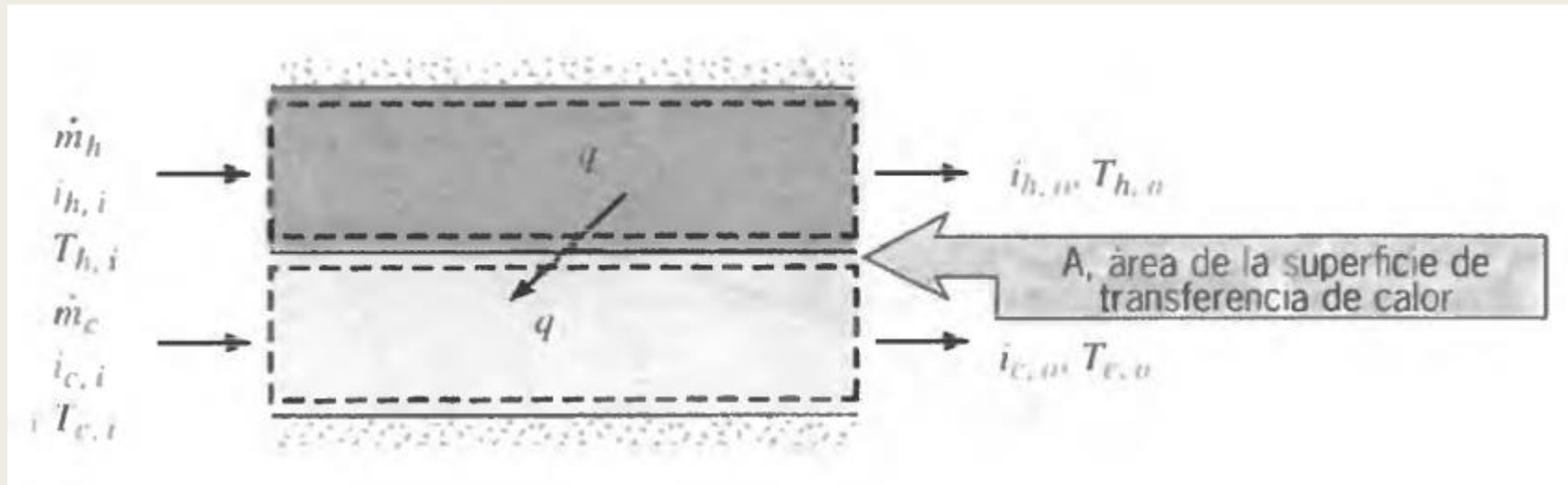
$$q = \dot{m}_c (i_{c,o} - i_{c,i})$$

Sin cambio de fase y calor específico constante

$$q = \dot{m}_h c_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o})$$

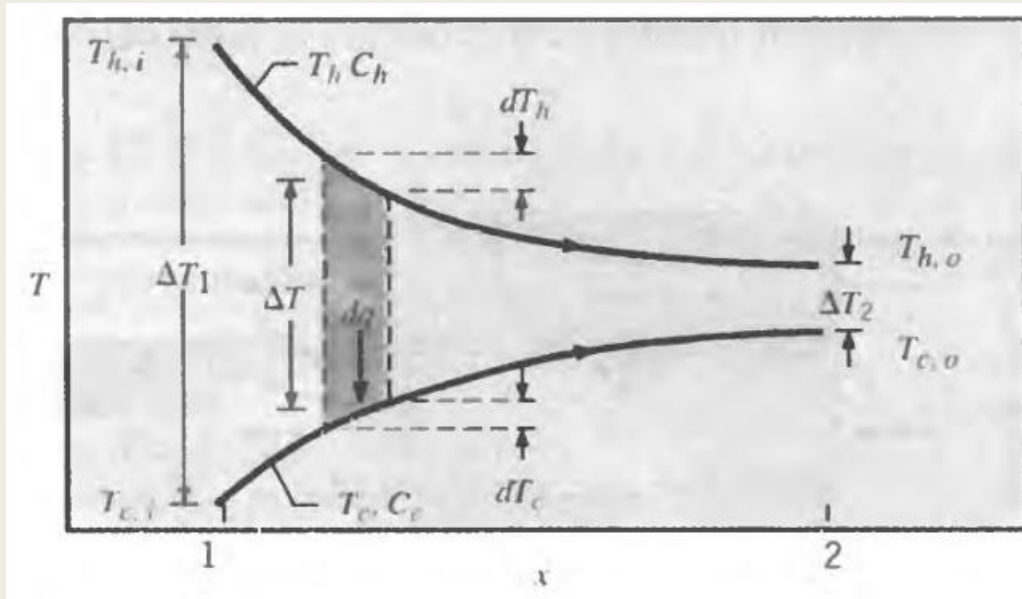
$$q = \dot{m}_c c_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,i})$$

$$\Delta T \equiv T_h - T_c$$



# FLUJO PARALELO

Capacitancia térmica



$$dq = -\dot{m}_h c_{p,h} dT_h \equiv -C_h dT_h$$

$$dq = \dot{m}_c c_{p,c} dT_c \equiv C_c dT_c$$

$$dq = U \Delta T dA$$

$$d(\Delta T) = dT_h - dT_c$$

$$d(\Delta T) = -dq \left( \frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c} \right)$$

$$\ln \left( \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right) = -UA \left( \frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c} \right)$$

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

$$q = UA \Delta T_{ml}$$

- Flujo paralelo

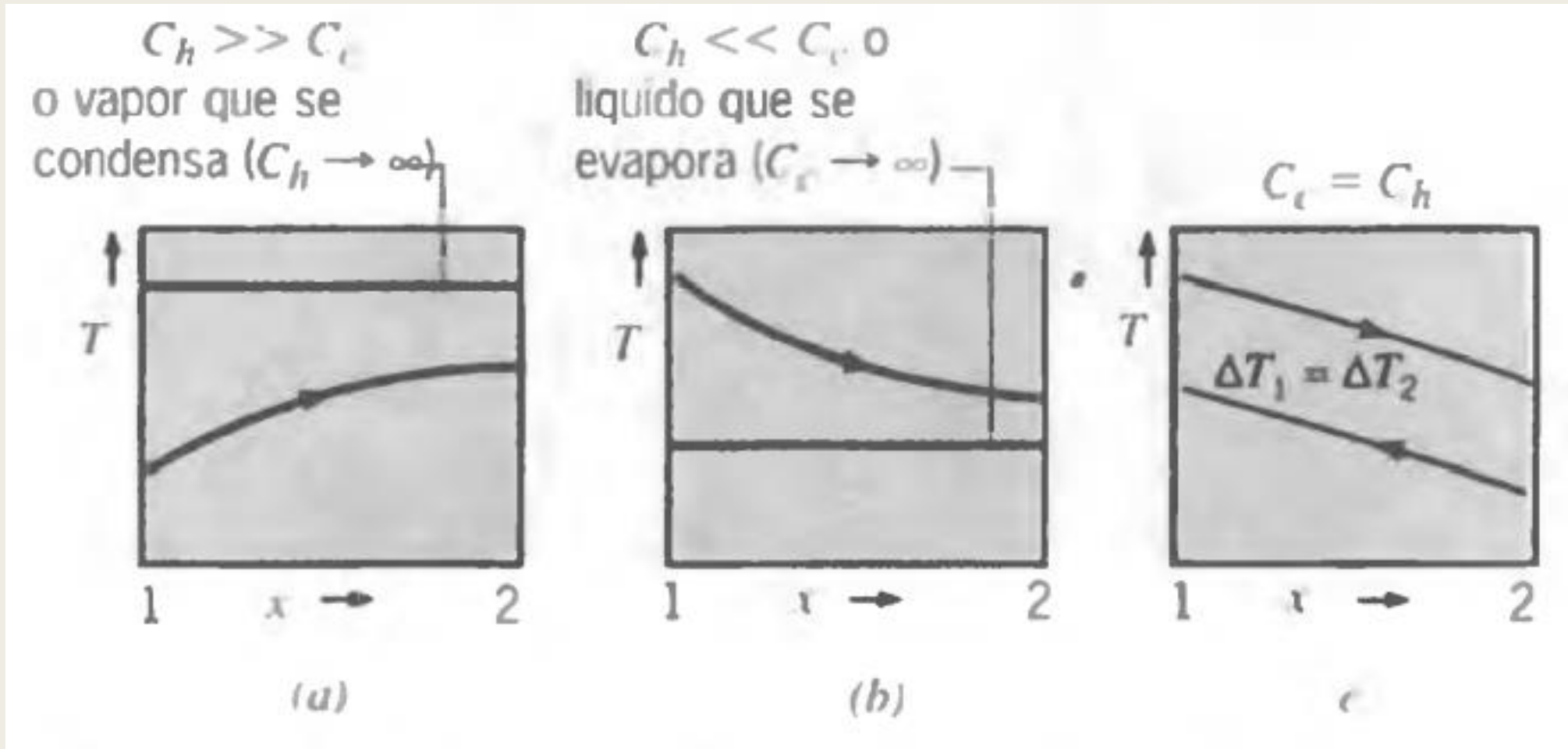
$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$$

$$\left[ \begin{array}{l} \Delta T_1 \equiv T_{h,1} - T_{c,1} = T_{h,i} - T_{c,i} \\ \Delta T_2 \equiv T_{h,2} - T_{c,2} = T_{h,o} - T_{c,o} \end{array} \right]$$

- Flujo contracorriente

$$\left[ \begin{array}{l} \Delta T_1 \equiv T_{h,1} - T_{c,1} = T_{h,i} - T_{c,o} \\ \Delta T_2 \equiv T_{h,2} - T_{c,2} = T_{h,o} - T_{c,i} \end{array} \right]$$

# Condiciones especiales

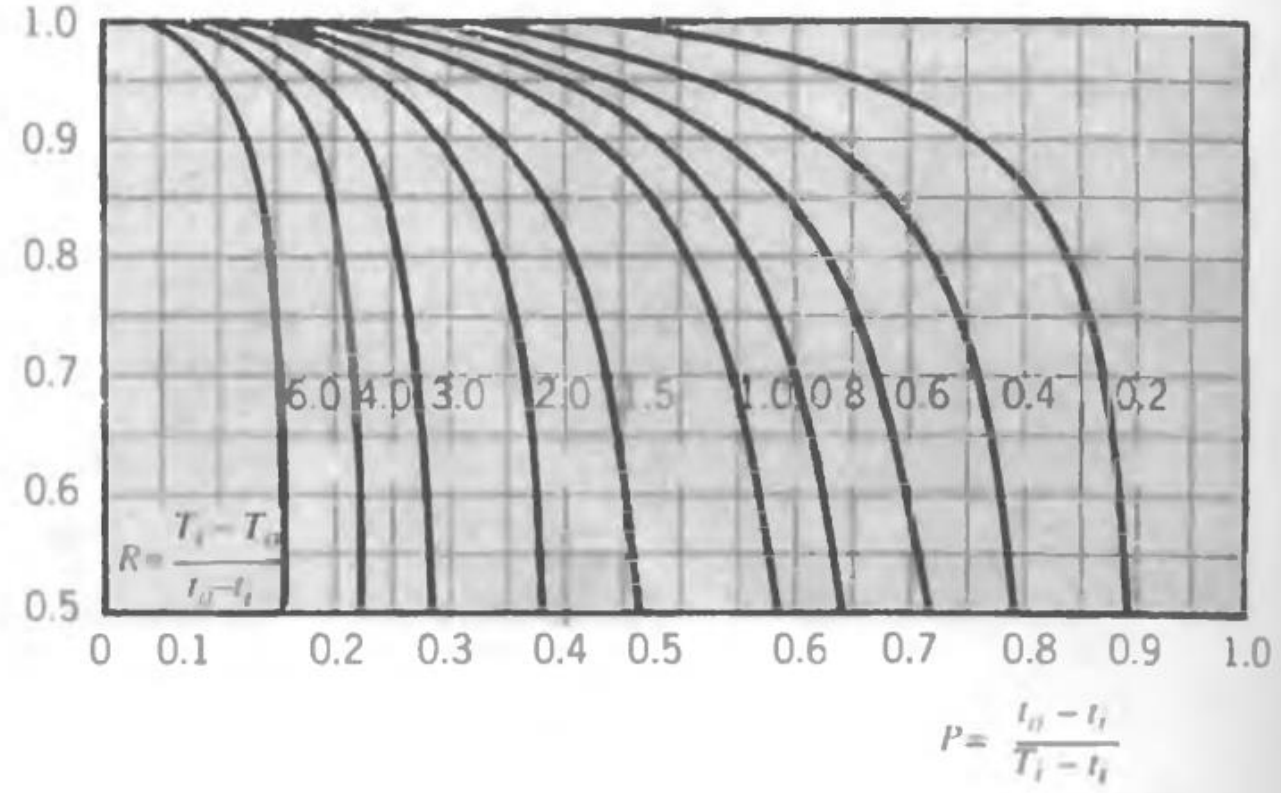
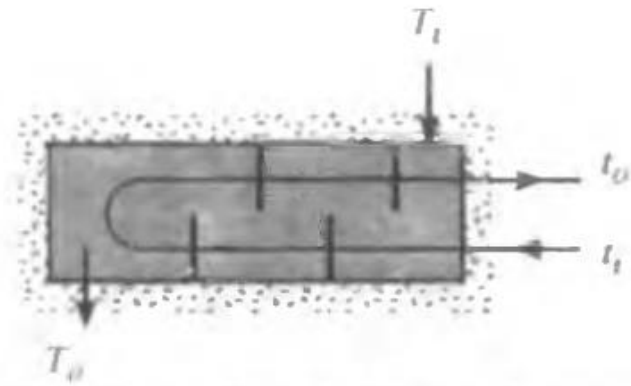


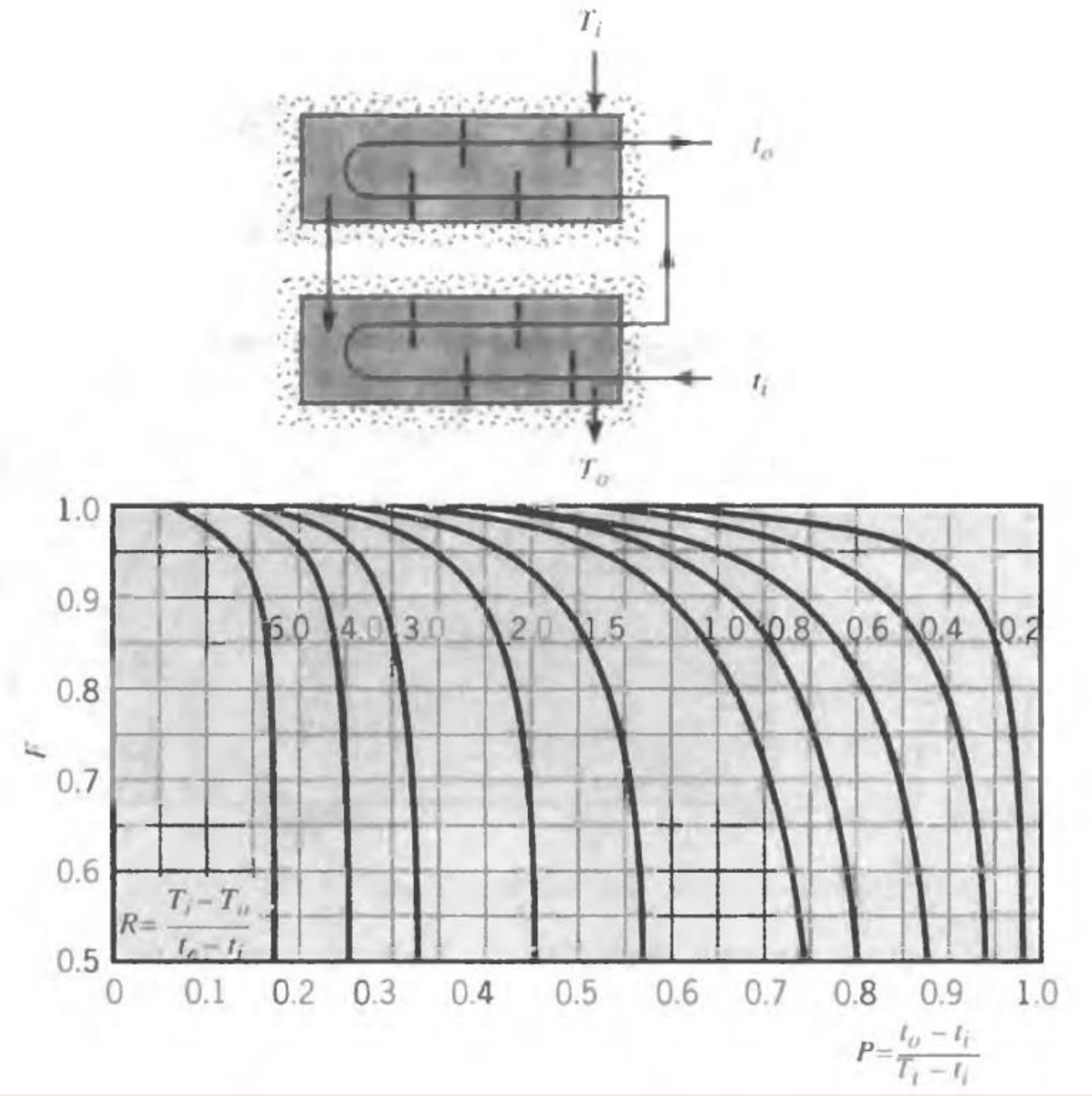
# Ecuaciones para una coraza y cualquier múltiplo de tubos

$$\Delta T_{ml} = F \Delta T_{ml,CF}$$

$$\Delta T_1 = T_{h,i} - T_{c,o} \text{ y } \Delta T_2 = T_{h,o} - T_{c,i}$$







# Explicación general del método NUT

Podría definirse como una medida adimensional que representa la relación entre la capacidad de transferencia de calor real en un intercambiador de calor y la capacidad de transferencia de calor si el proceso ocurriera de manera ideal.

$$NUT = \frac{UA}{\dot{m}C_{\min}}$$

Donde:

- $U$  es el coeficiente global de transferencia de calor (en  $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ ).
- $A$  es el área de transferencia de calor (en  $m^2$ ).
- $\dot{m}$  es el flujo másico del fluido caliente o frío (en  $\frac{kg}{s}$ ).
- $C_{\min}$  es la capacidad térmica mínima entre los dos fluidos (en  $\frac{J}{kg \cdot K}$ ).

# Interpretación del $NUT$

Un valor de  $NUT$  mayor indica una mayor efectividad del intercambiador de calor, es decir, una mayor transferencia de calor.

Si  $NUT$  es igual a 0, el intercambiador de calor no está transfiriendo calor.

Si  $NUT$  es igual a 1, el intercambiador de calor está transfiriendo la máxima cantidad de calor posible dadas las condiciones de operación.

**Determinación de la efectividad del intercambiador de calor ( $\epsilon$ ):** La efectividad del intercambiador de calor ( $\epsilon$ ) se relaciona con el  $NUT$  y se puede calcular mediante relaciones empíricas o mediante correlaciones específicas para diferentes tipos de intercambiadores de calor.

# Método de eficiencia - NUT

Máxima transferencia de calor posible

$$C_c < C_h: \quad q_{\text{máx}} = C_c(T_{h,i} - T_{c,i})$$

$$q_{\text{máx}} = C_{\text{mín}}(T_{h,i} - T_{c,i})$$

$$C_h < C_c: \quad q_{\text{máx}} = C_h(T_{h,i} - T_{c,i})$$

Eficiencia

$$\varepsilon \equiv \frac{q}{q_{\text{máx}}}$$

$$\varepsilon \equiv \frac{C_h(T_{h,i} - T_{h,o})}{C_{\text{mín}}(T_{h,i} - T_{c,i})}$$

$$\varepsilon = \frac{C_c(T_{c,o} - T_{c,i})}{C_{\text{mín}}(T_{h,i} - T_{c,i})}$$

$$q = \varepsilon C_{\text{mín}}(T_{h,i} - T_{c,i})$$

$$\varepsilon = f\left(\text{NUT}, \frac{C_{\text{mín}}}{C_{\text{máx}}}\right)$$

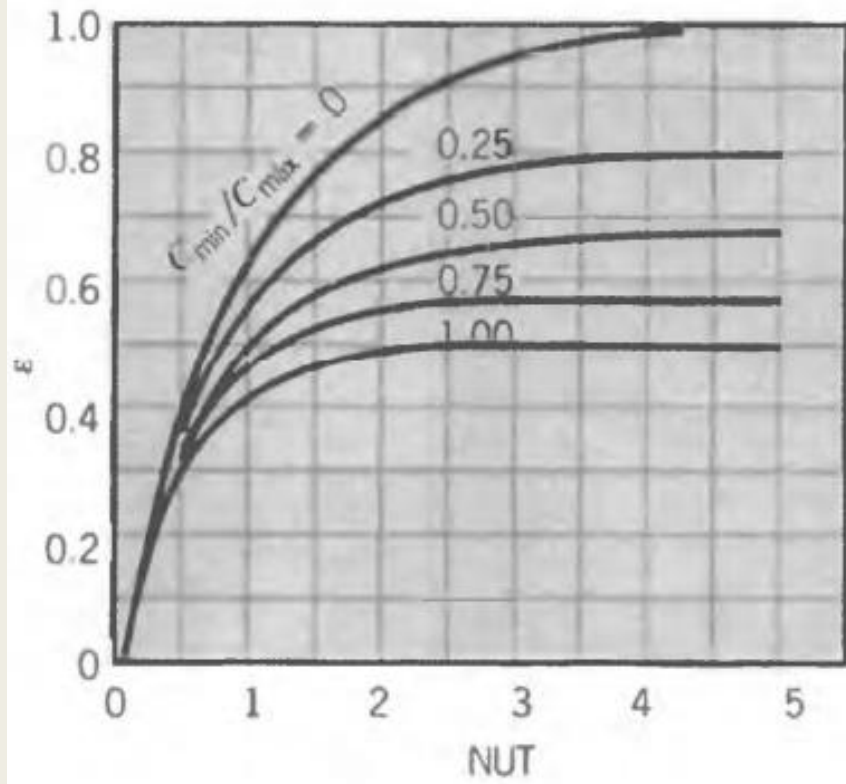
$$\text{NUT} \equiv \frac{UA}{C_{\text{mín}}}$$

# Relaciones de eficiencia

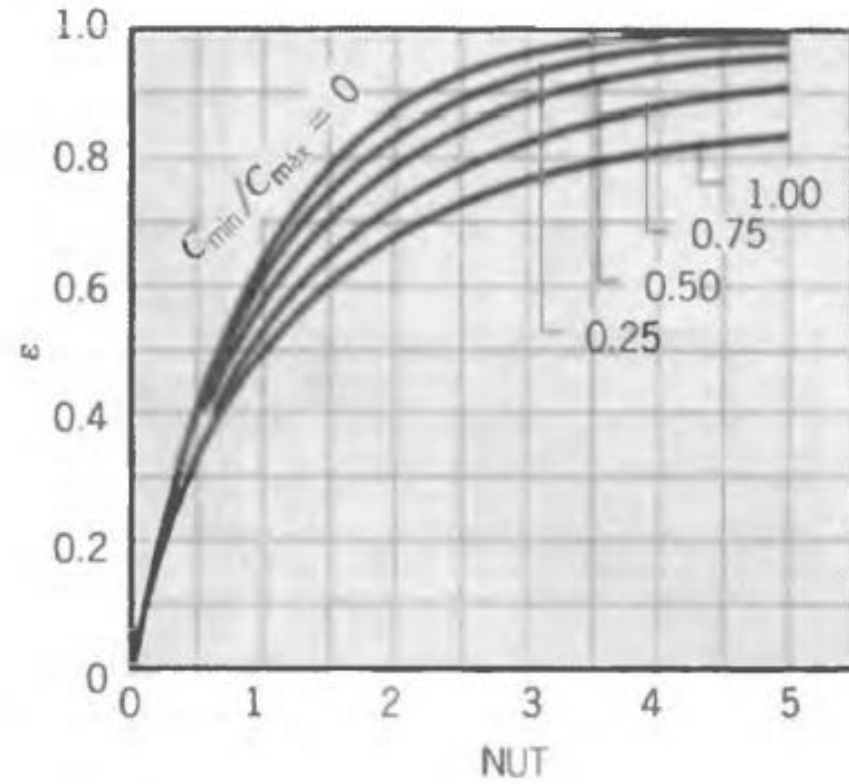
Arreglo de flujo	Relación
<b>Tubos concéntricos</b>	
Flujo paralelo	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NUT(1 + C_r)]}{1 + C_r}$
Contraflujo	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NUT(1 - C_r)]}{1 - C_r \exp[-NUT(1 - C_r)]} \quad (C_r < 1)$
	$\varepsilon = \frac{NUT}{1 + NUT} \quad (C_r = 1)$
<b>Coraza y tubos</b>	
Un paso por la coraza (2, 4, ... pasos de tubo)	$\varepsilon_1 = 2 \left\{ 1 + C_r + (1 + C_r^2)^{1/2} \right. \\ \left. \times \frac{1 + \exp[-NUT(1 + C_r^2)^{1/2}]}{1 - \exp[-NUT(1 + C_r^2)^{1/2}]} \right\}^{-1}$
n Pasos por la coraza (2n, 4n, ... pasos de tubo)	$\varepsilon = \left[ \left( \frac{1 - \varepsilon_1 C_r}{1 - \varepsilon_1} \right)^n - 1 \right] \left[ \left( \frac{1 - \varepsilon_1 C_r}{1 - \varepsilon_1} \right)^n - C_r \right]^{-1}$
<b>Doble cruzado (un solo paso)</b>	
ambos fluidos sin mezclar	$\varepsilon = 1 - \exp \left[ \left( \frac{1}{C_r} \right) (NUT)^{0.22} \{ \exp[-C_r(NUT)^{0.78}] - 1 \} \right]$
$C_{min}$ (mezclado), $C_{max}$ (sin mezclar)	$\varepsilon = \left( \frac{1}{C_r} \right) (1 - \exp \{ -C_r [1 - \exp(-NUT)] \})$
$C_{min}$ (mezclado), $C_{max}$ (sin mezclar)	$\varepsilon = 1 - \exp \{ -C_r^{-1} [1 - \exp[-C_r(NUT)]] \}$
Para los intercambiadores ( $C_r = 0$ )	$\varepsilon = 1 - \exp(-NUT)$

# Relaciones del NUT

Arreglo de flujo	Relación
<b>Tubos concéntricos</b>	
Flujo paralelo	$\text{NUT} = -\frac{\ln [1 - \varepsilon(1 + C_r)]}{1 + C_r}$
Contraflujo	$\text{NUT} = \frac{1}{C_r - 1} \ln \left( \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon C_r - 1} \right) \quad (C_r < 1)$
	$\text{NUT} = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \quad (C_r = 1)$
<b>Coraza y tubos</b>	
Un paso de coraza (2, 4, . . . pasos de tubo)	$\text{NUT} = -(1 + C_r^2)^{-1/2} \ln \left( \frac{E - 1}{E + 1} \right)$ $E = \frac{2/\varepsilon_1 - (1 + C_r)}{(1 + C_r^2)^{1/2}}$
$n$ Pasos de coraza ( $2n, 4n, . . .$ pasos de tubo)	<p>Use las ecuaciones 11.31b y 11.31c con</p> $\varepsilon_1 = \frac{F - 1}{F - C_r}, \quad F = \left( \frac{\varepsilon C_r - 1}{\varepsilon - 1} \right)^{1/n}$
<b>Flujo cruzado (un solo paso)</b>	
$C_{\max}$ (mezclado), $C_{\min}$ (sin mezclar)	$\text{NUT} = -\ln \left[ 1 + \left( \frac{1}{C_r} \right) \ln (1 - \varepsilon C_r) \right]$
$C_{\min}$ (mezclado), $C_{\max}$ (sin mezclar)	$\text{NUT} = -\left( \frac{1}{C_r} \right) \ln [C_r \ln (1 - \varepsilon) + 1]$
<b>Todos los intercambiadores (<math>C_r = 0</math>)</b>	$\text{NUT} = -\ln (1 - \varepsilon)$

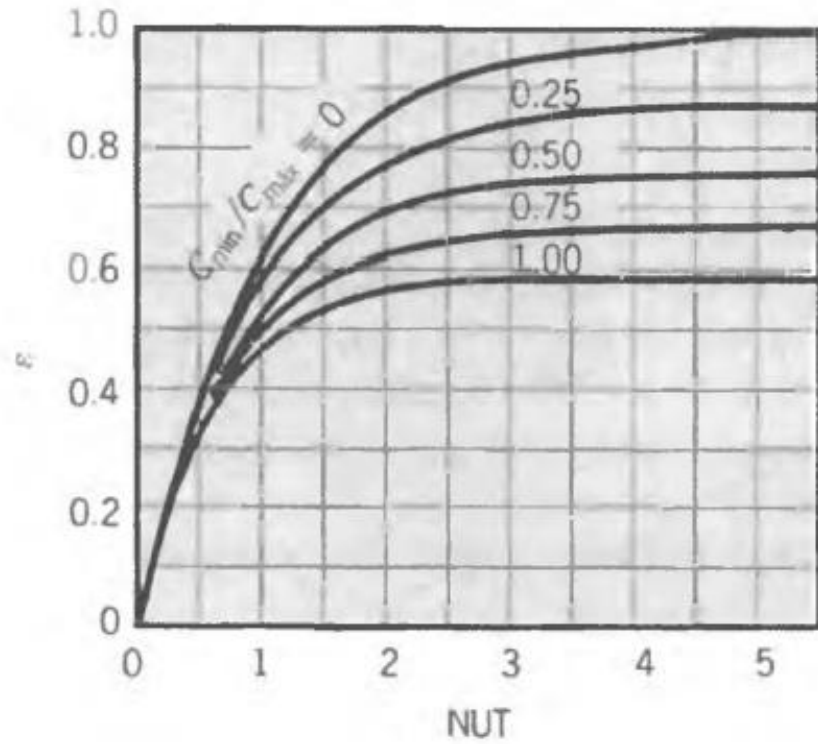


**FIGURA 11.14** Eficiencia de un intercambiador de calor de flujo paralelo (ecuación 11.29).

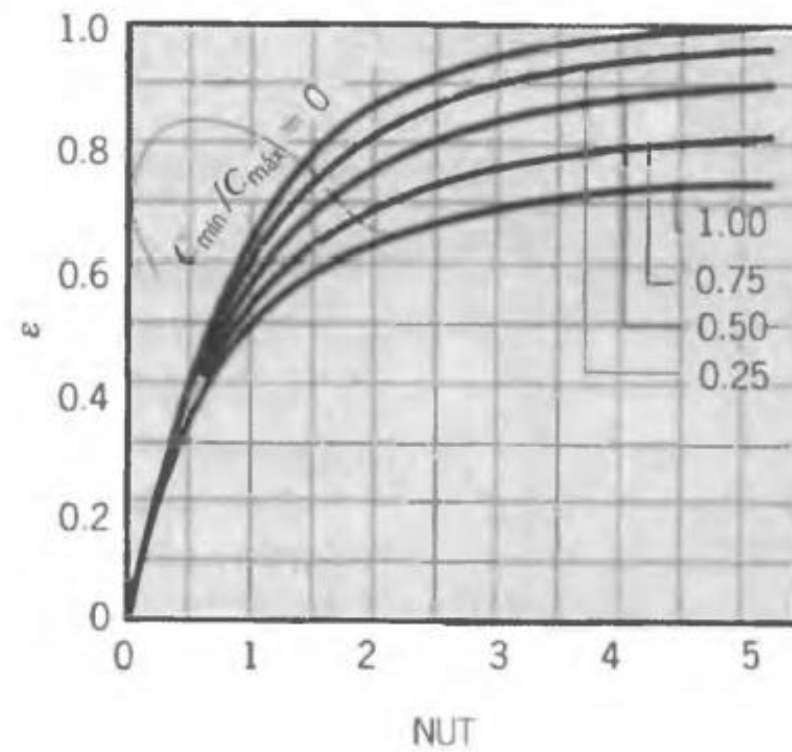


**FIGURA 11.15** Eficiencia de un intercambiador de calor de contraflujo (ecuación 11.30).

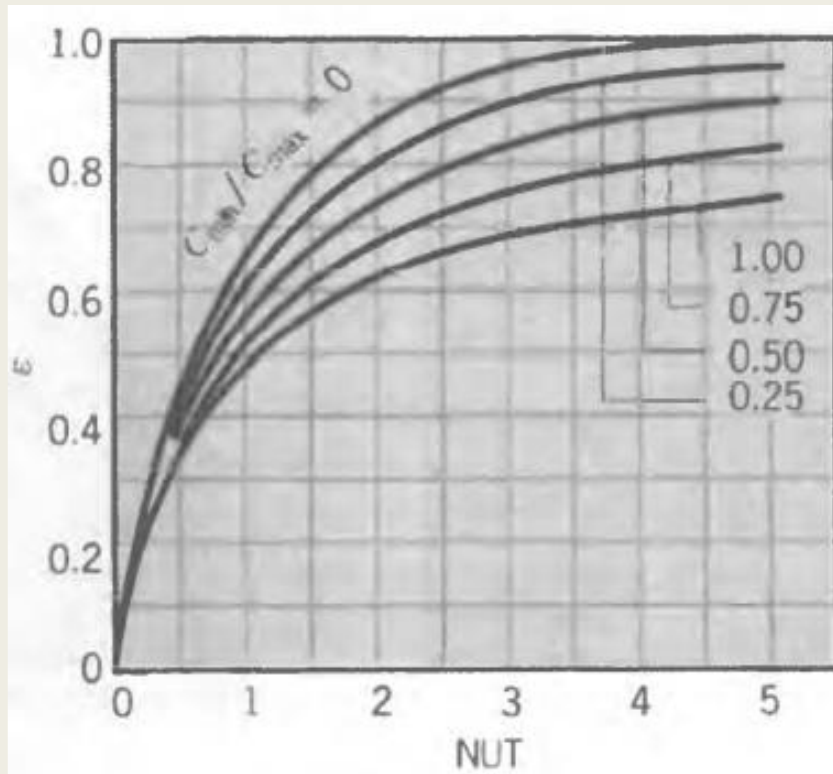




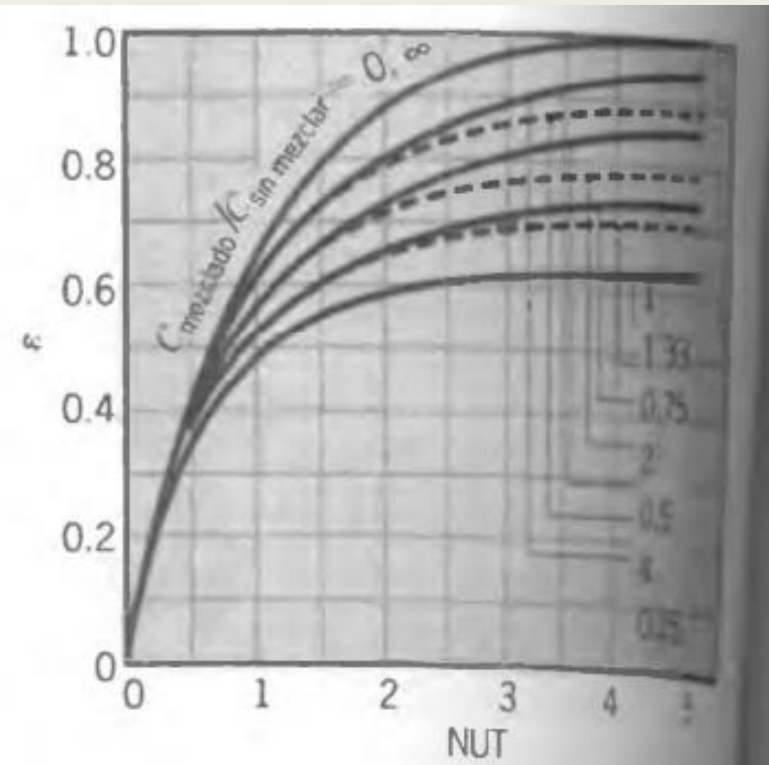
**FIGURA 11.16** Eficiencia de un intercambiador de calor de coraza y tubos con una coraza y cualquier múltiplo de dos pasos por los tubos (dos, cuatro, etc., pasos de tubo) (ecuación 11.31).



**FIGURA 11.17** Eficiencia de un intercambiador de calor de coraza y tubos con dos pasos de coraza y cualquier múltiplo de cuatro pasos por los tubos (cuatro, ocho, etc., pasos de tubo) (ecuación 11.32 con  $n = 2$ ).



**FIGURA 11.18** Eficiencia de un intercambiador de calor de flujo cruzado de un solo paso con ambos fluidos sin mezclar (ecuación 11.33).



**FIGURA 11.19** Eficiencia de un intercambiador de calor de flujo cruzado de un solo paso con un fluido mezclado y el otro sin mezclar (ecuaciones 11.34, 11.35).

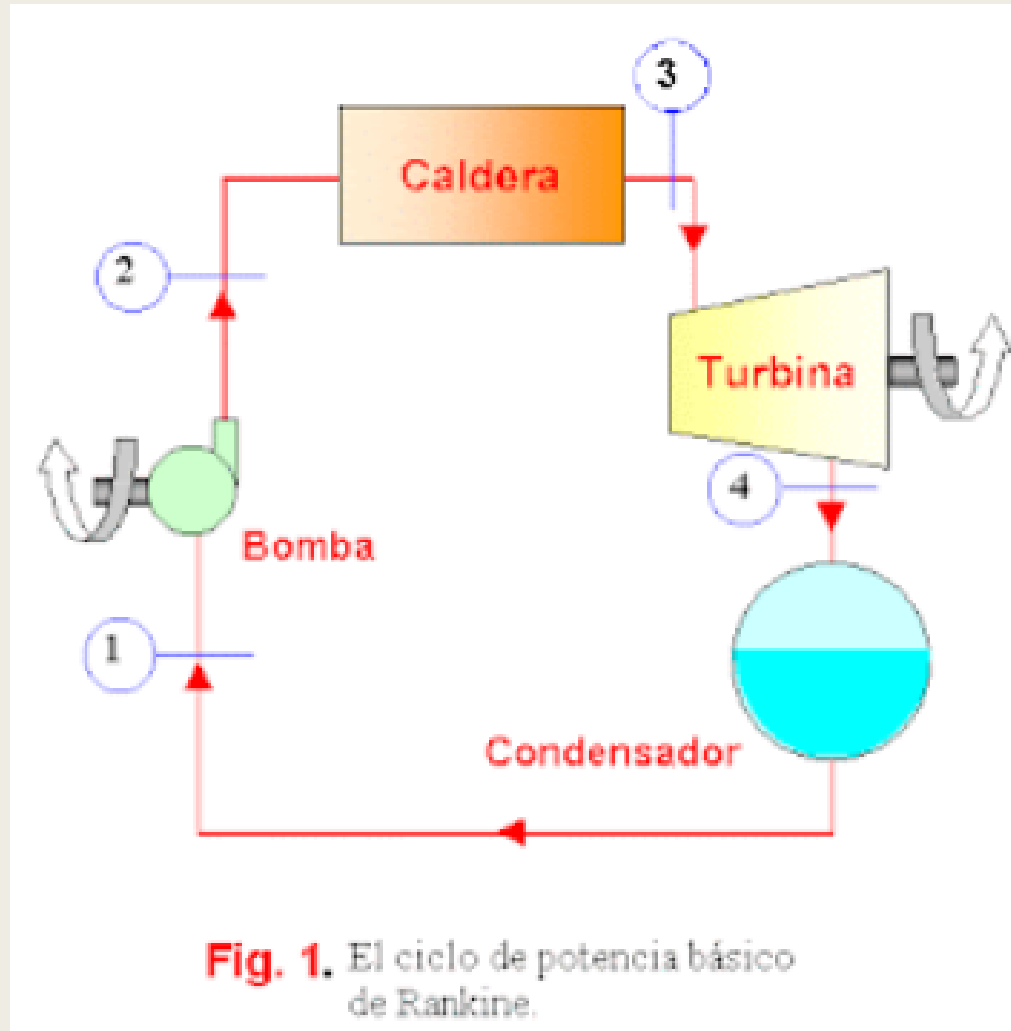
# EQUIPOS DE INTERCAMBIO DE CALOR CON CAMBIO DE FASE

# CONDENSADORES

El condensador del vapor, es un componente importante del ciclo del vapor en instalaciones de generación de potencia. Es un recinto cerrado en el cual el vapor sale de la turbina y se fuerza para ceder su calor latente de la vaporización. Es un componente necesario del ciclo del vapor por dos razones. La primera, convierte el vapor usado nuevamente en agua para regresarla al generador o a la caldera de vapor como agua de alimentación. Esto baja el costo operacional de la planta permitiendo reutilizar el agua de alimentación, y resulta más fácil bombear un líquido que el vapor. La segunda razón, aumenta la eficiencia del ciclo permitiendo que el ciclo funcione opere con los gradientes más grandes posibles de temperatura y presión entre la fuente de calor (caldera) y el sumidero de calor (condensador).

# Funcionamiento

A



Un radiador de calefacción es un intercambiador térmico que difunde en el aire ambiente por radiación y convección el calor que le ha sido aportado por un fluido caliente que circula dentro o por efecto Joule.

Los radiadores se conciben de tal modo que difundan lo máximo de calor, lo que explica sus formas dibujadas a menudo complejas que deben exponer el máximo de superficie caliente al contacto del aire ambiente.

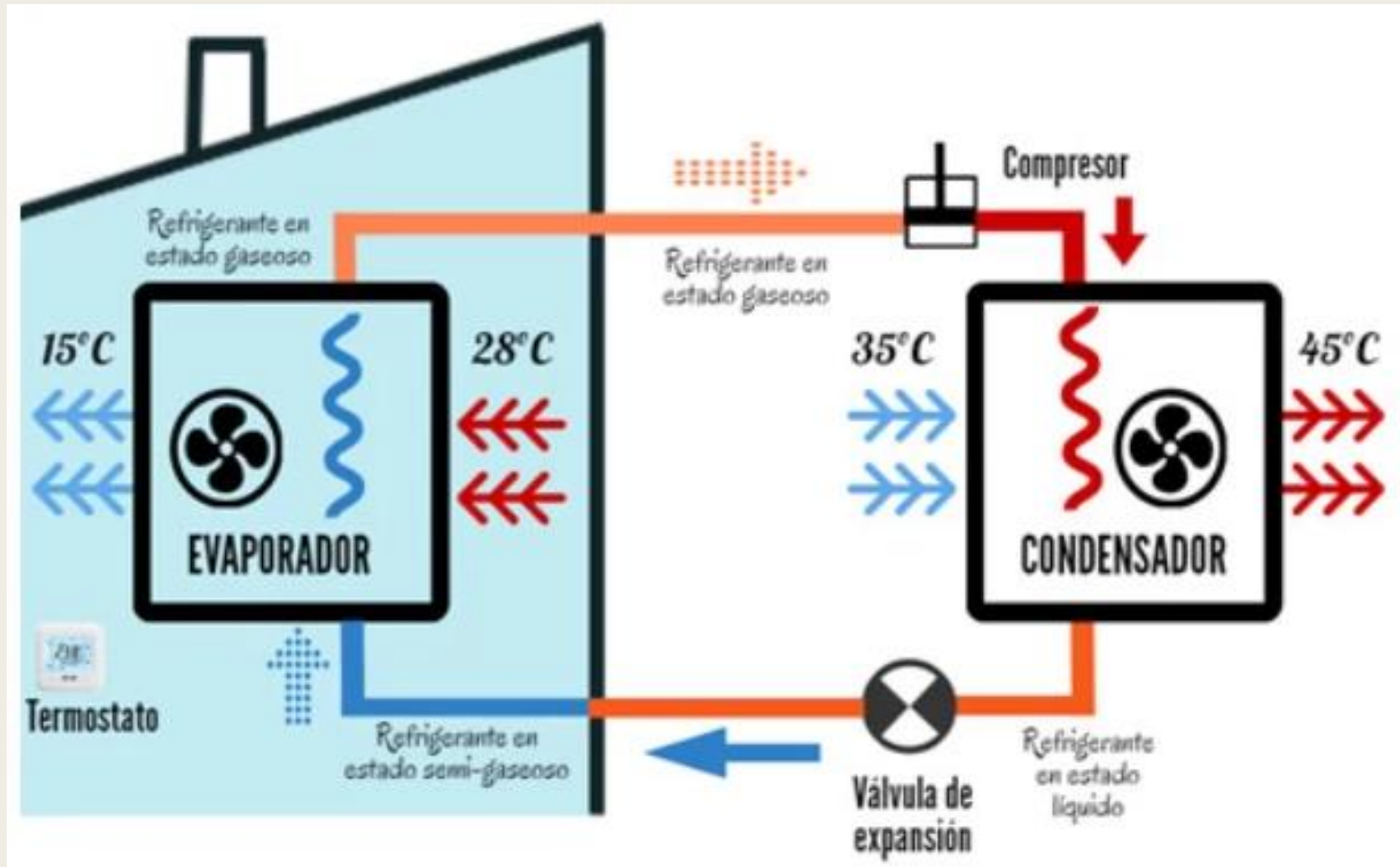
## Tipos de Radiadores

Radiador en fundición, radiador de aletas de aleación, radiador por acumulación, el panel radiante, radiador decorativo, radiador inyectando a gas, etc.



# EVAPORADORES

## Ciclo de refrigeración



# Componentes

## Sistema sencillo de aire acondicionado





# Accesorios

## Elementos del ciclo



### La válvula de expansión

La válvula de expansión libera de la presión al gas refrigerante, que al atravesarla comienza el cambio de estado de líquido a gaseoso. Este proceso termina de producirse en el evaporador.



### El compresor

Comprime el gas que llega desde evaporador en estado gaseoso. El compresor aumenta la presión del gas refrigerante que continúa hacia el condensador, donde cambiará a estado líquido.

# Funcionamiento

El circuito frigorífico basa su funcionamiento en un proceso cíclico en el que un gas refrigerante va cambiando de estado. Cuando el gas refrigerante entra en estado gaseoso en el compresor, éste genera una fuerza sobre él comprimiéndolo y aumentando su presión. Al aumentar esta presión, el gas continúa su camino pasando por el Condensador, donde cambia su estado de gaseoso a líquido. En este proceso de cambio de estado, tiene lugar el intercambio térmico, el refrigerante cede su calor al aire que está atravesando el condensador, impulsado por ventiladores.

Luego, el refrigerante llega a la válvula de expansión que tiene la función opuesta al compresor: libera la presión del gas, lo que genera una nueva conversión de estado líquido a gaseoso. En el evaporador se completa este proceso que requiere de gran cantidad de energía. Es por eso que el gas, que tenía una temperatura muy baja, comienza a absorber el calor del aire de la estancia.

A la vez que el refrigerante está circulando por el interior del evaporador, el aire caliente del interior de la casa está pasando a través del evaporador gracias al trabajo de los ventiladores. El refrigerante absorbe en este punto el calor del aire, que sale de la unidad interior Split mucho más frío. Después de este proceso, el refrigerante, ahora ya en estado gaseoso y más caliente, se dirige de nuevo hacia el compresor donde volverá a cumplirse todo el ciclo.

# BIBLIOGRAFIA

- Fundamentos de transferencia de calor – Frank P. Incropera – Cuarta edición.
- Principios de operaciones unitarias – Alan S. Foust – Segunda edición.
- Operaciones unitarias en ingeniería química – Warren N. McCabe – Séptima edición.