

1. INTRODUCCIÓN
2. COEFICIENTES GLOBALES DE TRANSPORTE DE CALOR
3. DISEÑO DE CAMBIADORES: MÉTODO DTML
4. EFICACIA DE CAMBIADORES: MÉTODO NUT
5. CONSIDERACIONES DE DISEÑO



OBJETIVO: análisis térmico de cambiadores de calor

CAMBIADOR DE CALOR: dispositivo diseñado para facilitar el intercambio de calor entre dos fluidos a distinta temperatura.

APLICACIONES:

- calentamiento de espacios, acondicionamiento de edificios
- producción de potencia
- aporte de calor a corrientes de proceso
- eliminación de calor de corrientes de proceso
- recuperación de calor residual (Tecnología Pitch)

CONSIDERACIONES BÁSICAS

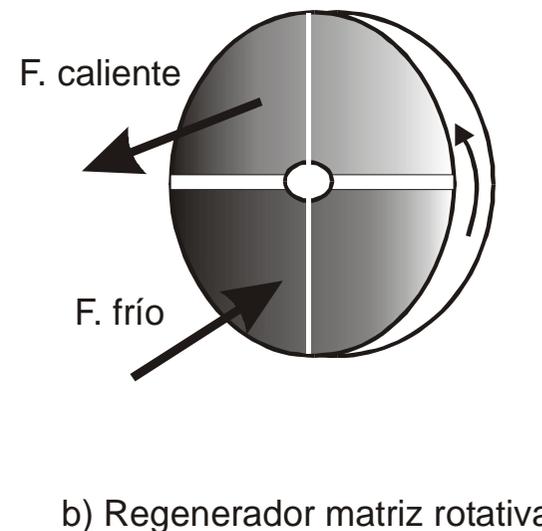
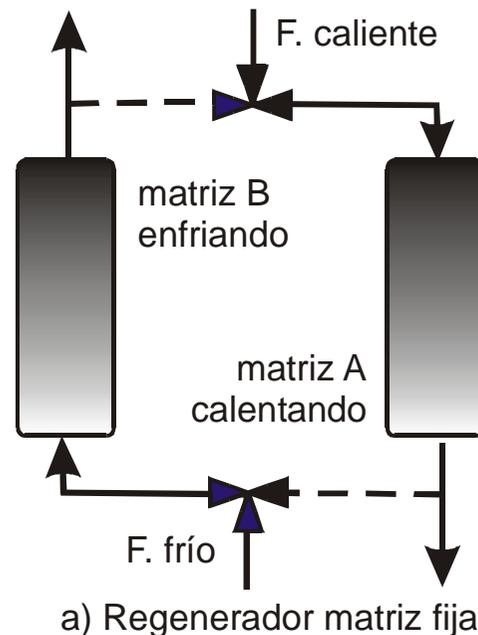
- Estrecha relación entre diferencia de T entre ambos fluidos y el área necesaria para el contacto.
- Debe procurarse que h en ambos fluidos sea similar.

Tipos de cambiadores en función del tipo de contacto

REGENERADORES: circulación alternativa del fluido frío y caliente por el mismo espacio del cambiador (NÚCLEO o MATRIZ). Este núcleo sirve como dispositivo de almacenamiento temporal de energía.

Tipos de regeneradores:

- Matriz fija → circulación periódica y alternada por la matriz. Operación por ciclos.
- Matriz rotativa → matriz con movimiento giratorio que expone distintas partes de su superficie a ambos fluidos.



Tipos de cambiadores en función del tipo de contacto

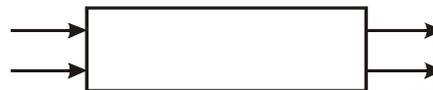
RECUPERADOR O CAMBIADOR CERRADO: circulación simultánea de fluido frío y caliente por el dispositivo. Separación de ambos por una pared sólida.

CAMBIADOR ABIERTO O DE CONTACTO DIRECTO: circulación simultánea y con mezcla del fluido frío y caliente (ej. torres de refrigeración, centrales térmicas, ...).

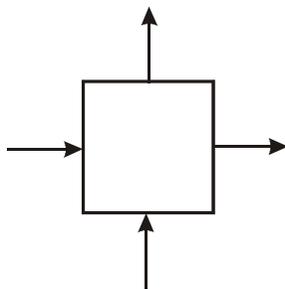
Tipos o patrones de flujo en cambiadores



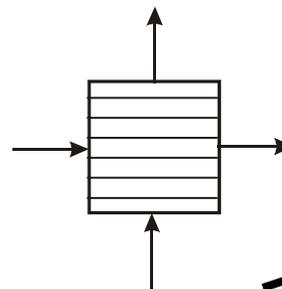
a) Flujo contracorriente



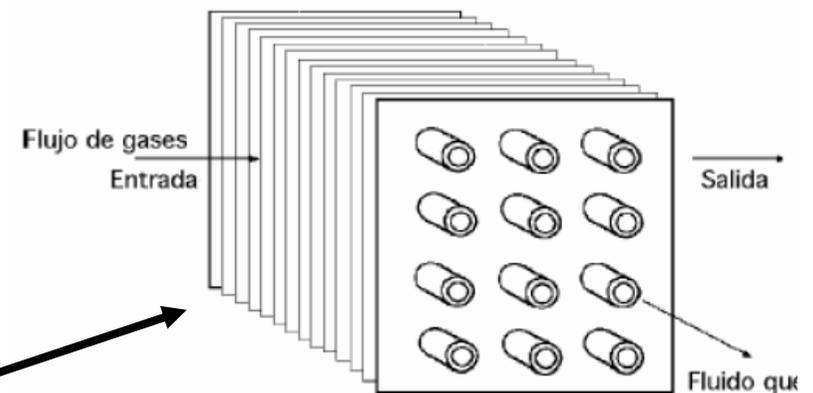
b) Flujo paralelo



c) Flujo cruzado (con mezcla)

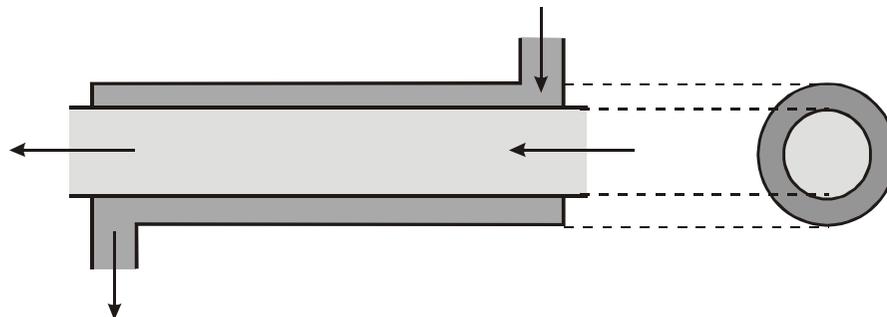


d) Flujo cruzado (sin mezcla)

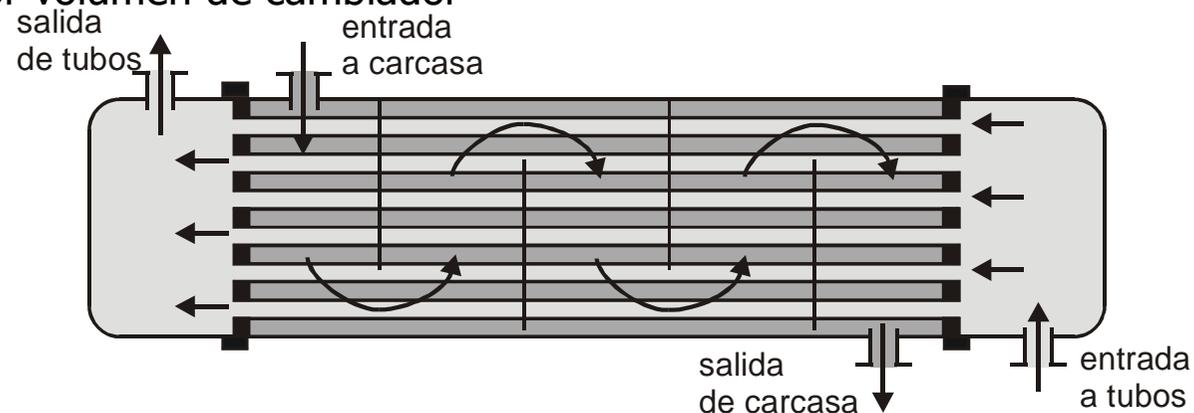


Tipos de cambiadores en función del tipo de construcción

CAMBIADOR DE TUBOS CONCÉNTRICOS: útiles para pequeñas superficies de intercambio.



CAMBIADOR DE CARCASA Y TUBOS: carcasa estanca en la que se sitúa un banco de tubos (circulando uno de los fluidos por la carcasa y el otro por el interior de los tubos). Mayor área por volumen de cambiador

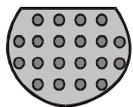
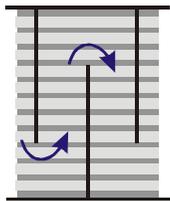


Tipos de cambiadores en función del tipo de construcción

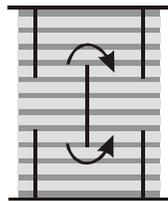
CAMBIADOR DE CARCASA Y TUBOS. Tipos de cambiador en función del patrón de flujo:

- **Flujo revertido:** utilización de pantallas o tabiques deflectores para mejorar h en el lado de la carcasa.

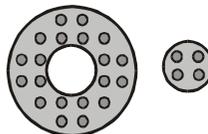
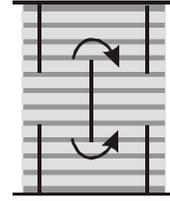
a) tabique deflector de segmento



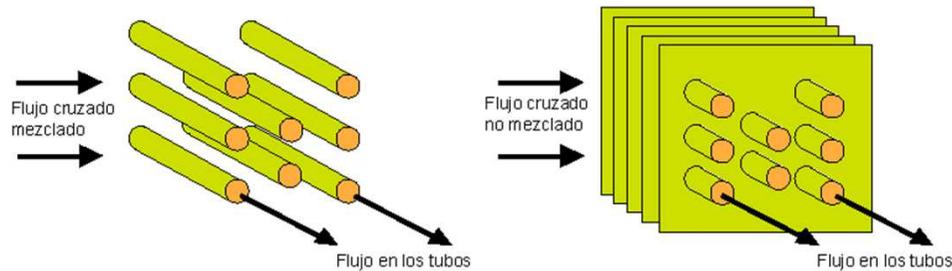
b) tabique deflector de bandas



c) tabique deflector de disco y anillo



- **Flujo cruzado:** flujo perpendicular al eje de los tubos. Se distinguen dos tipos: con y sin mezcla.



a) FLUJO CRUZADO MEZCLADO

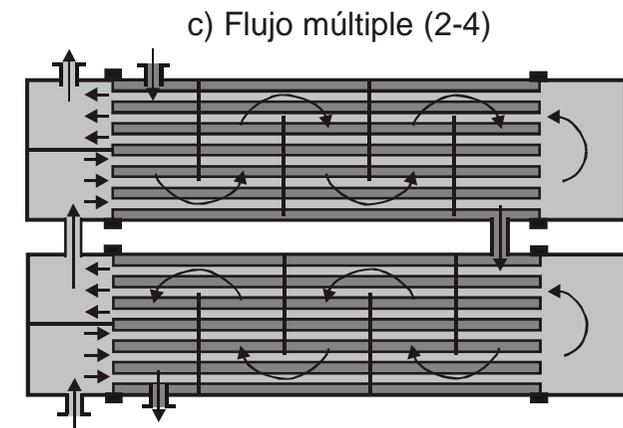
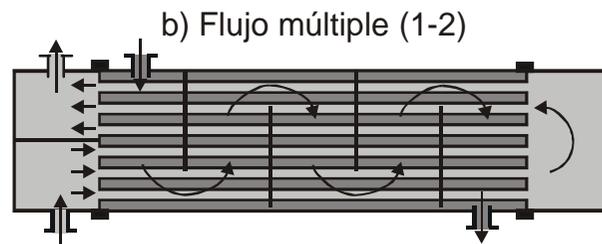
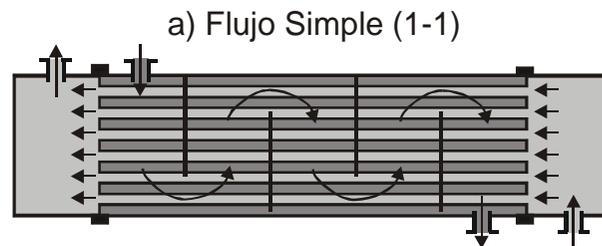
b) FLUJO CRUZADO NO MEZCLADO

Tipos de cambiadores en función del tipo de construcción

CAMBIADOR DE CARCASA Y TUBOS. Tipos en función del número de pasos

[n-n' (carcasa-tubos)]:

- Flujo simple.
- Flujo múltiple.



Selección del fluido que circula por tubos:

- Corrosivos
- Sucios
- Fluido caliente
- Fluido a menor presión
- El de menor viscosidad

Tipos de cambiadores en función del tipo de construcción

CAMBIADOR DE CARCASA Y TUBOS. Se diseñan según estándares publicados por Asociación de Fabricantes de Intercambiadores tubulares

TEMA: Tubular Exchanger Manufacturers Association

Clase R



Petróleo y Aplicaciones relacionadas

Clase C

Propósitos Generales

Clase B

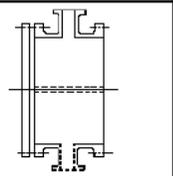
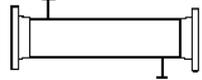
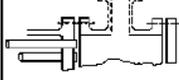
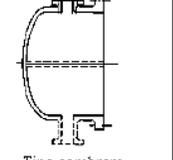
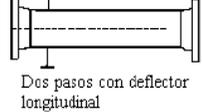
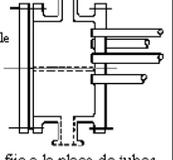
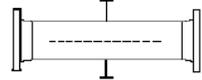
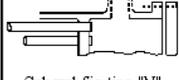
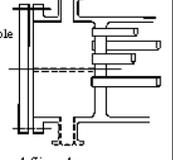
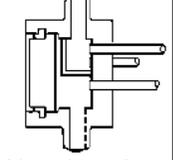
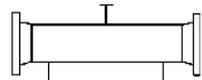
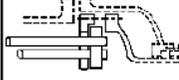
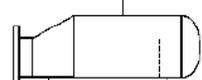
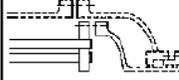
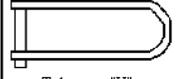


Procesos Químicos

Tipos de cambiadores en función del tipo de construcción

CAMBIADOR DE CARCASA Y TUBOS.

*Tipos de carcasa y cabezales
Nomenclatura TEMA*

	CABEZALES ANTERIORES: ESTACIONARIOS O FLUJOS	TIPOS DE CARCAZAS	CABEZALES POSTERIORES
A	 Canal y tapa removibles	E  Un solo paso	L  Cabezal fijo tipo "L"
B	 Tipo sombrero	F  Dos pasos con deflector longitudinal	M  Cabezal fijo tipo "M"
C	 Tapa removible Canal fijo a la placa de tubos	G  Flujo distribuido	N  Cabezal fijo tipo "N"
N	 Tapa removible Canal fijo a la carcasa	H  Doble flujo distribuido	P  Flotante externo
D	 Especial para altas presiones	J  Flujo dividido	S  Anillos divididos
		K  Rehervidor tipo kettle	T  Tracción continua
		X  Flujo cruzado	U  Tubos en "U"
			W  Flotante sellado externamente



Tipos de cambiadores en función del tipo de construcción

CAMBIADOR DE PLACAS Y MARCOS. Formado por un bastidor (placa fija+placa móvil) que presiona placas con juntas para dirigir el fluido.
 Distancia entre placas $\downarrow \downarrow \rightarrow \uparrow V \rightarrow \uparrow$ turbulencia
 Superficie de las placas acanalada $\rightarrow \uparrow A$ y turbulencia

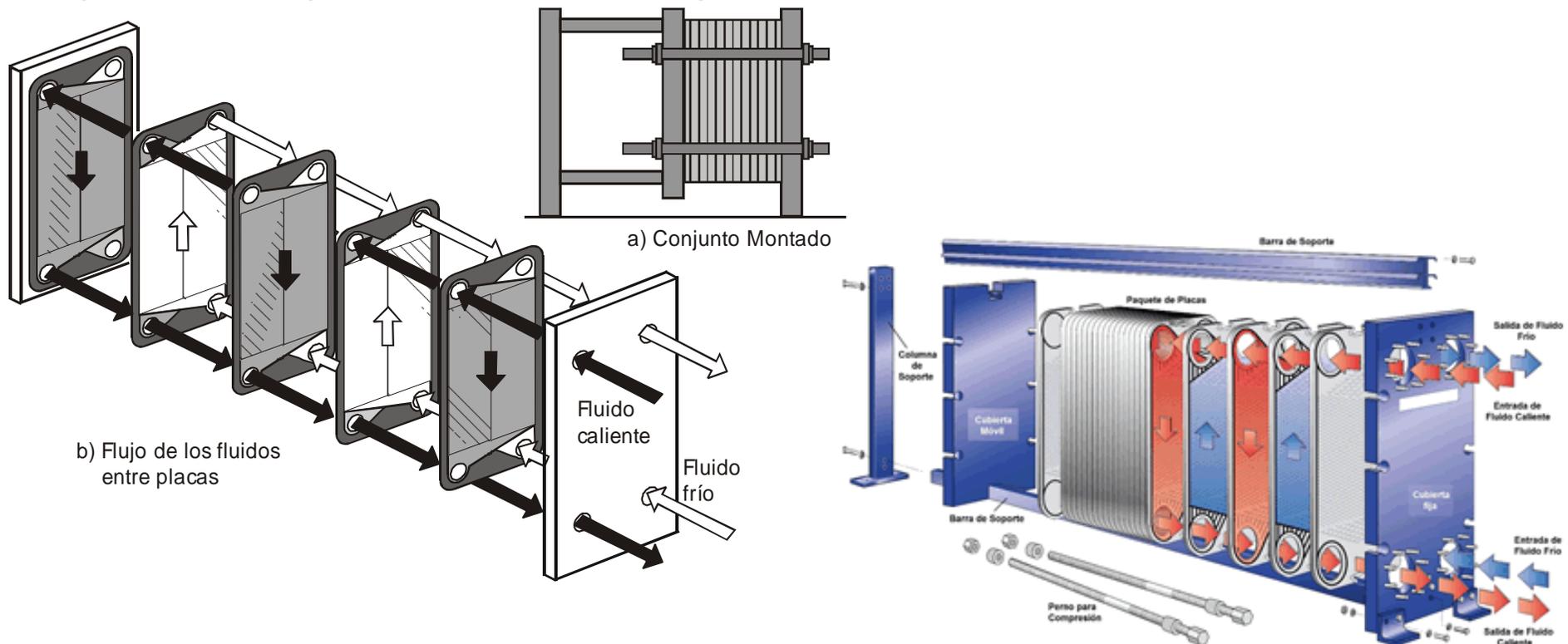
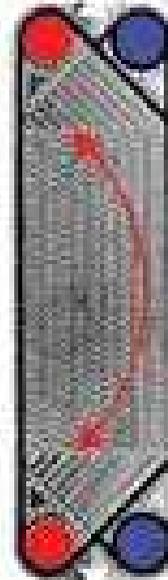


Figura 2: Intercambiador de Calor de Placas.

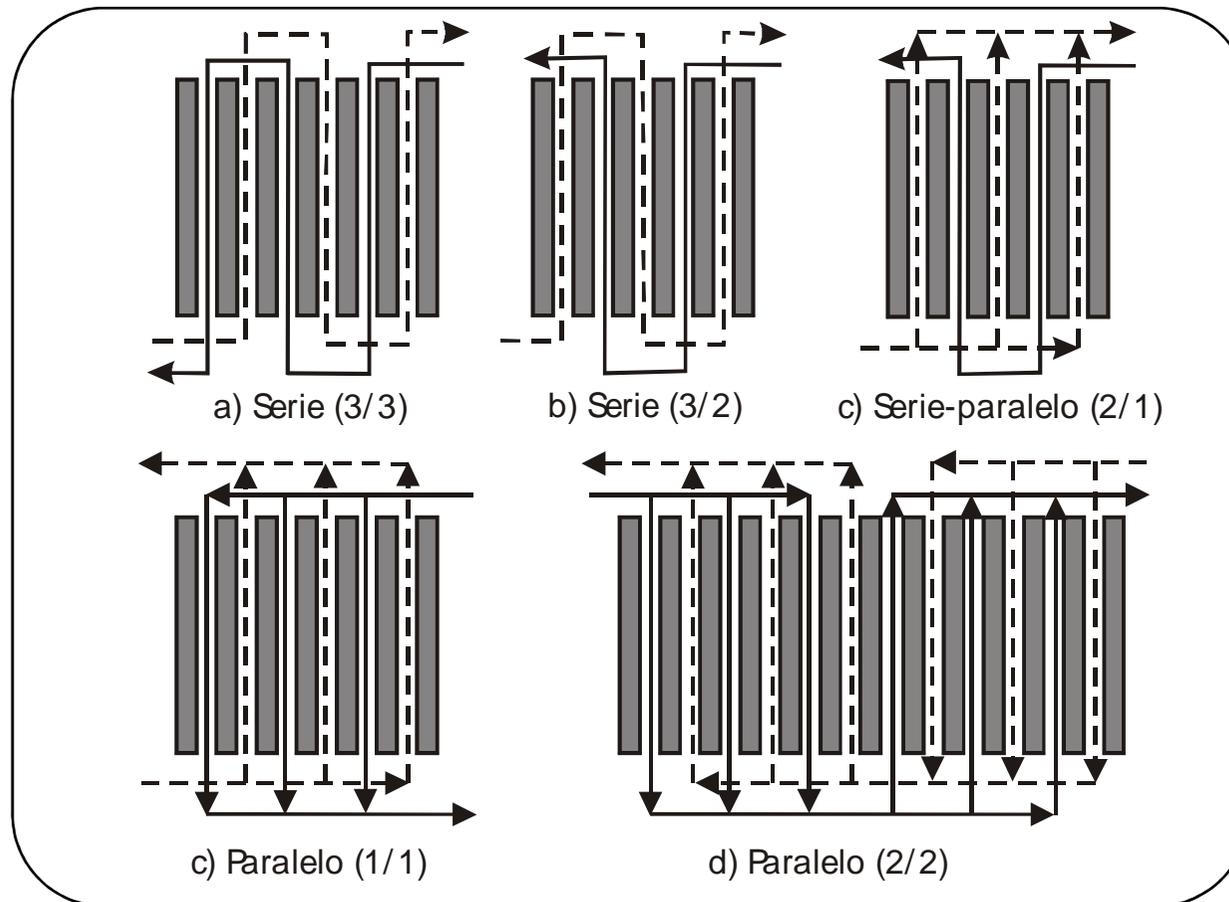
Tipos de cambiadores en función del tipo de construcción CAMBIADOR DE PLACAS Y MARCOS.



Tipos de cambiadores en función del tipo de construcción

CAMBIADOR DE PLACAS Y MARCOS.

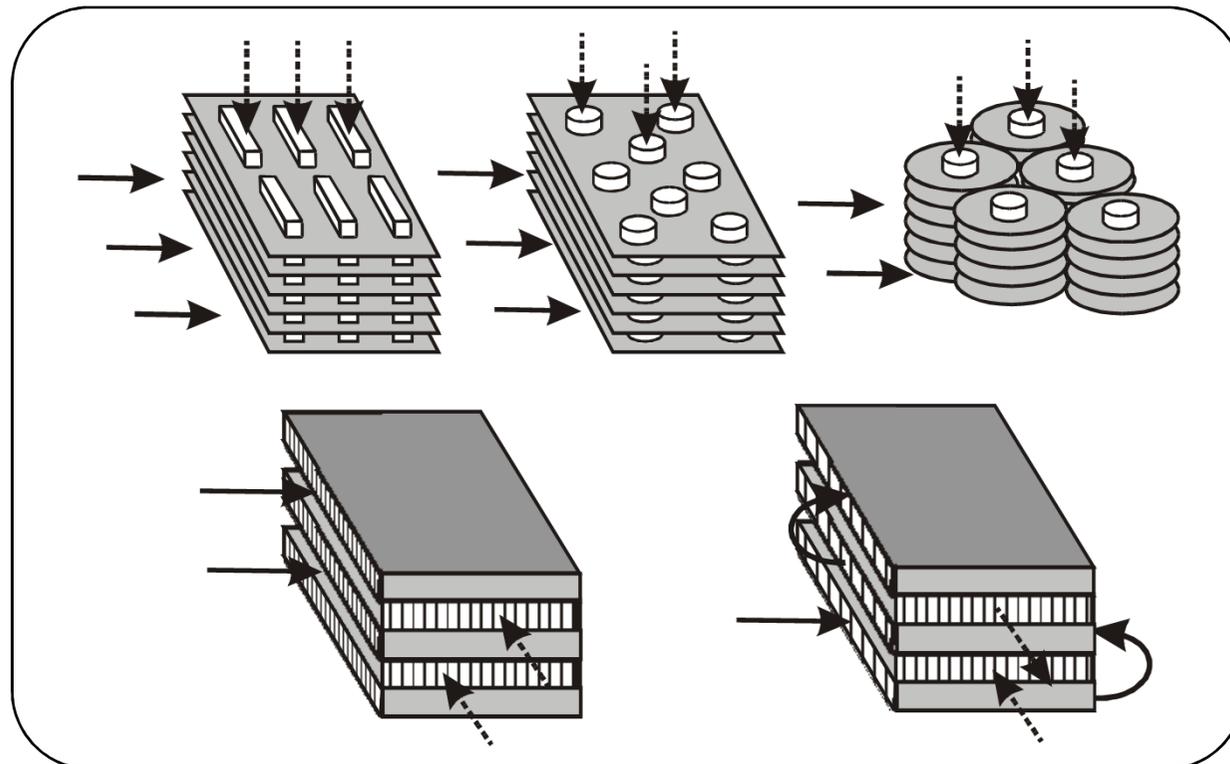
Patrones de flujo



Tipos de cambiadores en función del tipo de construcción

CAMBIADOR COMPACTO. Formados por bancos muy densos de tubos unidos por placas. Elevada relación área contacto/volumen ($>700 \text{ m}^2/\text{m}^3$). Al menos uno de los fluidos suele ser gas.

Ejemplos



Tipos de cambiadores en función del servicio

- CALENTADOR
- CONDENSADOR
- REHERVIDOR
- SOBRECALENTADOR
- VAPORIZADOR
- GENERADOR DE VAPOR
- ENFRIADOR
- REFRIGERADOR

2. Coeficientes globales de transporte de calor

ANÁLISIS TÉRMICO DE CAMBIADORES $\rightarrow Q = f(U, A, F.I.)$

$A \rightarrow$ superficie de contacto (superficie perpendicular a la transmisión de calor).

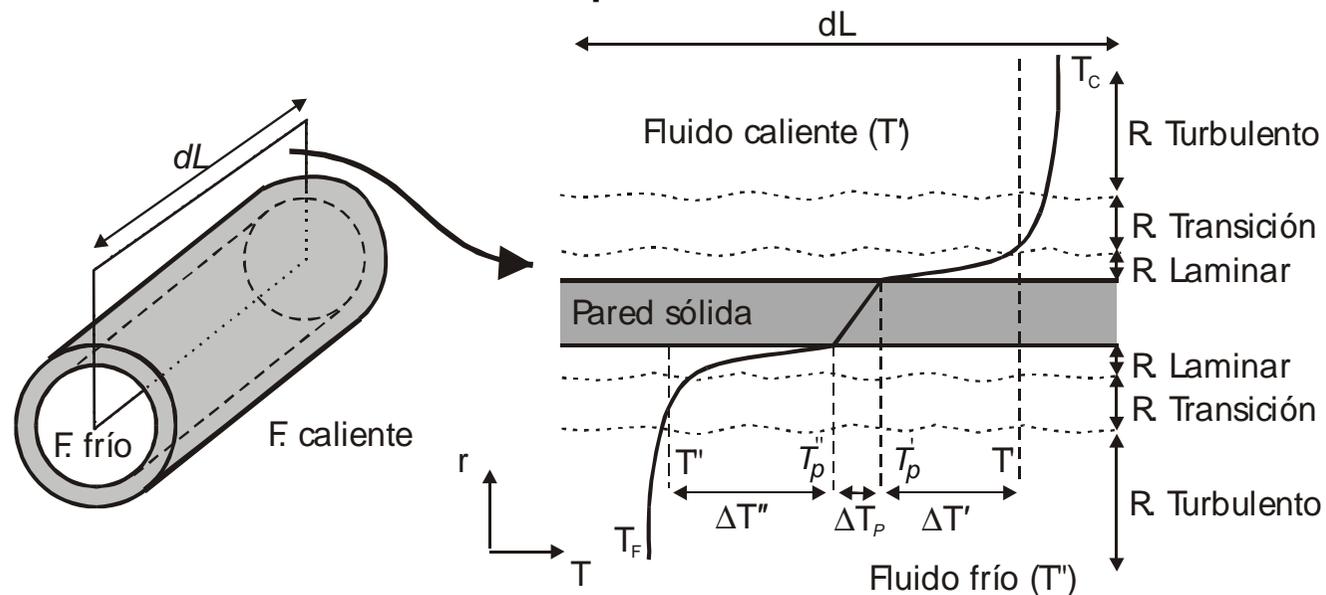
$F.I. \rightarrow$ diferencia de T entre fluido frío y fluido caliente.

$U \rightarrow$ COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSMISIÓN DE CALOR. $U = f(\text{resistencias al transporte})$.

OBJETIVO \rightarrow CÁLCULO DEL COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSMISIÓN DE CALOR A PARTIR DE LAS RESISTENCIAS AL TRANSPORTE DEL SISTEMA.

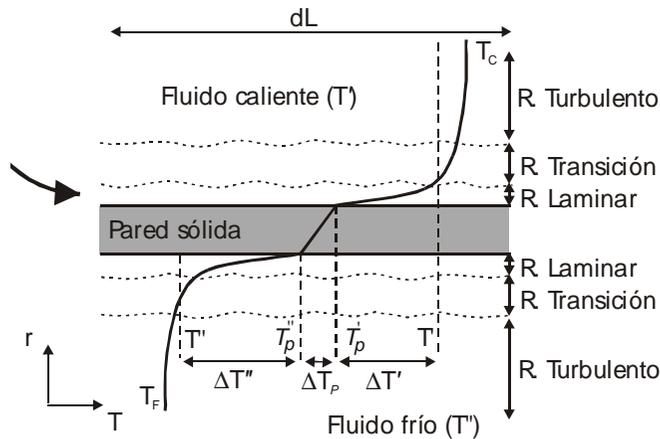
SISTEMA: elemento diferencial de conducción cilíndrica por la que circula un fluido frío e intercambia calor con un fluido caliente en el exterior. Régimen estacionario.

Perfil radial de temperaturas en un elemento diferencial de cambiador



2. Coeficientes globales de transporte de calor

RÉGIMEN ESTACIONARIO → $Q_{TOTAL} = Q_{F.CALIENTE} = Q_{TUBO} = Q_{F.FRÍO} = cte$



$$dQ = \frac{T' - T'_p}{1} = \frac{T'_p - T''_p}{e} = \frac{T''_p - T''}{1} = \frac{T' - T''}{\frac{1}{h' \cdot dA'} + \frac{e}{k \cdot dA_{ml}} + \frac{1}{h'' \cdot dA''}} = \frac{T' - T''}{UdA}$$

$$\frac{1}{UdA} = \frac{1}{h' dA'} + \frac{e}{k dA_{ml}} + \frac{1}{h'' dA''} \therefore \frac{1}{U} = \frac{1}{h' \frac{dA'}{dA}} + \frac{e}{k \frac{dA_{ml}}{dA}} + \frac{1}{h'' \frac{dA''}{dA}}$$

¿dA? → cualquiera de las áreas que aparecen en las resistencias individuales → cambia el valor de U.

$$UdA = U' dA' = U_{ml} dA_{ml} = U'' dA''$$

Tubos cilíndricos → $dA = \pi D dL \Rightarrow \frac{1}{U} = \frac{1}{h' \frac{D'}{D}} + \frac{e}{k \frac{D_{ml}}{D}} + \frac{1}{h'' \frac{D''}{D}}$

Si e ↓↓↓ ⇒ $\frac{1}{U} = \frac{1}{h'} + \frac{e}{k} + \frac{1}{h''} \Rightarrow U = U' = U_{ml} = U''$



2. Coeficientes globales de transporte de calor

Coeficiente global de transmisión de calor ($\text{W/m}^2 \text{K}$)

A↓ Flujo De→	Gas (CN)	Gas (CF)	Líquido (CN)	Líquido (CF)	Líquido en ebullición
Gas (CN)	Recinto-aire exterior 1-2	Supercalentadores 3-10		Cámaras de combustión 10-40	Calderas de vapor 10-40
Gas (CF)		Cambiador de calor 10-30	Calderas de gas 10-50		
Líquido (CN)			Baño de aceite de calefacción 25-500	Serpentín de frío en tanque 500-1500	
Líquido (CF)	Radiador de calefacción 5-15	Enfriadores de gas 10-50	Serpentín de calef. en tanque 50-2000	Cambiador de calor 900-2500	Evaporador 300-1000
Vapor condensando	Radiador de vapor 5-20	Calentador de aire 10-50	Camisa de vapor de tanques 150-1000	Condensador 300-4000	Evaporador 300-6000

2. Coeficientes globales de transporte de calor

Ensuciamiento

Ensuciamiento { Deposición de sales e impurezas (CaCO_3)
Reacciones fluido-material conducción (oxidación)
Crecimiento de microorganismos (algas) } Resistencia adicional con k baja

ENSUCIAMIENTO \uparrow con tpo. $\rightarrow \downarrow Q \rightarrow \rightarrow$ **LIMPIEZA**

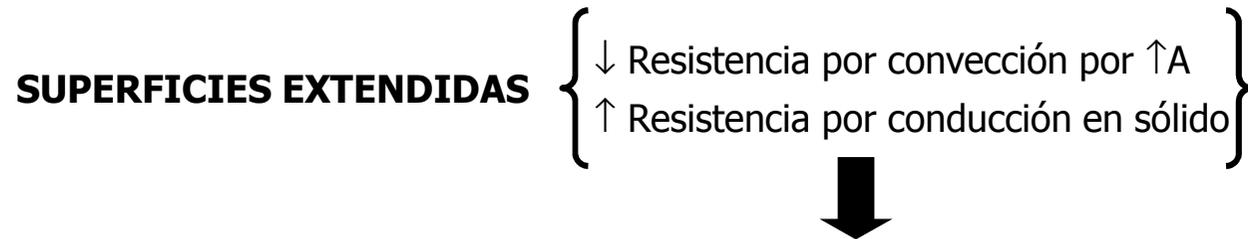
Resistencia de depósitos = f (naturaleza, tiempo de servicio, T) \rightarrow Espesor y área desconocidos, además variables con el tiempo.

Cálculo de resistencia de depósitos \rightarrow experimentalmente con U_s (en uso) y U_L (limpio): $\frac{1}{U_s A} = \frac{1}{U_L A} + \frac{R'}{A'} + \frac{R''}{A''}$

Factores de ensuciamiento para tubos cilíndricos

Fluido	Factor de ensuciamiento ($\text{m}^2 \text{KW}^{-1}$)
Agua de río	0,00008 – 0,0003
Agua de mar	0,0003 – 0,001
Agua urbana (blanda)	0,0002 – 0,0003
Agua urbana (dura)	0,0005 – 0,001
Condensado de vapor de agua	0,0002 – 0,0006
Vapor de agua	0,0001 – 0,0005
Aire y gases industriales	0,0002 – 0,0005
Gases de combustión	0,0002 – 0,0005
Vapores y líquidos orgánicos	0,0002
Productos orgánicos hirviendo	0,0004
Condensado de productos orgánicos	0,002
Disoluciones salinas acuosas	0,0002 – 0,0003

Superficies extendidas



EFICACIA TOTAL DE SUPERFICIE EXTENDIDA (η_0)

$$\eta_0 = 1 - \frac{N A_A}{A} (1 - \eta_A)$$

N: nº de aletas
 A: área total
 A_A : área aletas
 η_A : eficacia aleta individual [f(geometría, tamaño)]

MODIFICACIÓN EN CÁLCULO DE U:

$$\frac{1}{U \cdot dA} = \frac{1}{\eta'_0 \cdot h' \cdot dA'} + \frac{R'}{\eta'_0 \cdot dA'} + \frac{e}{k \cdot dA_{ml}} + \frac{R''}{\eta''_0 \cdot dA''} + \frac{1}{\eta''_0 \cdot h'' \cdot dA''}$$

DISEÑO

Elección del tipo de cambiador
Cálculo del área de intercambio

Ecuación disponible para cálculo de T , m ó Q → **BALANCE DE ENERGÍA**

Sin cambio de fase → $Q = m' Cp'(T'_1 - T'_2) = m'' Cp''(T''_2 - T''_1)$

1: entrada
2: salida

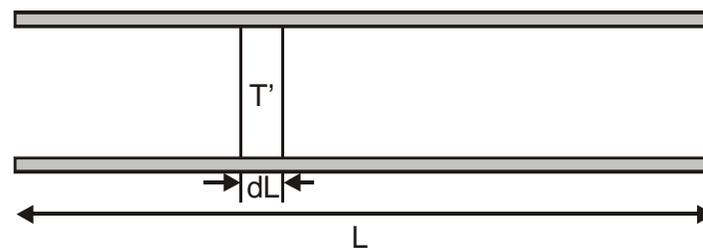
Con cambio de fase (ej. fluido frío) → $Q = m' Cp'(T'_1 - T'_2) = m'' \lambda''$

Ecuación disponible para cálculo de **ÁREA** → **ECUACIÓN DE DISEÑO**

$$dQ = U dA (T' - T'')$$

CÁLCULO DEL ÁREA

$$\int_0^A dA = A = \int_0^{Q_0} \frac{dQ}{U \cdot (T' - T'')} = \int_0^{Q_0} \frac{dQ}{U \cdot \Delta T}$$

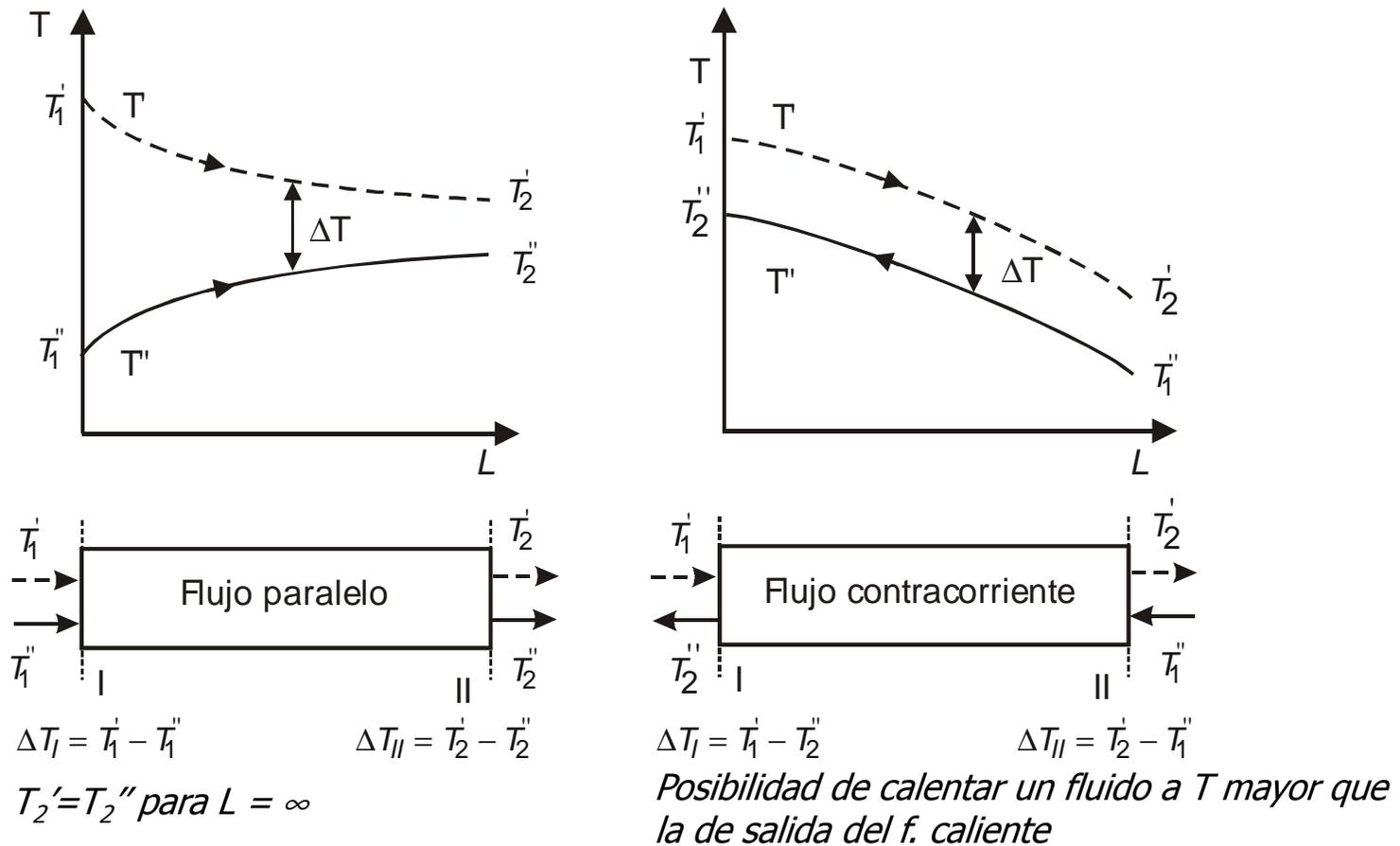


T varía a lo largo del cambiador → variación de propiedades físicas de fluidos → $h \neq cte$ → $U \neq cte$

NECESARIO CONOCER PERFIL DE T LONGITUDINAL (función del tipo de cambiador) → permite conocer la FUERZA IMPULSORA ($T' - T''$) en cualquier sección del cambiador.

3.1. Cambiador de tubos concéntricos

Distribución de temperaturas a lo largo del cambiador



3.1. Cambiador de tubos concéntricos

3.1. Coeficiente global constante

ΔT y ΔP moderadas \rightarrow propiedades físicas \approx ctes. \rightarrow valores medios de h y k \rightarrow valor medio y cte. de U

Balance entálpico en elemento diferencial (flujo en contracorriente):

$$\left. \begin{aligned} dQ &= -m' \cdot c'_p \cdot dT' \\ dQ &= m'' \cdot c''_p \cdot dT'' \end{aligned} \right\} \begin{aligned} dT' &= \frac{-dQ}{m' \cdot c'_p}; & dT'' &= \frac{dQ}{m'' \cdot c''_p} \end{aligned} \xrightarrow{-} dT' - dT'' = d(T' - T'') = -dQ \left(\frac{1}{m' \cdot c'_p} + \frac{1}{m'' \cdot c''_p} \right)$$

Ecuación de diseño $dQ = U(T' - T'')dA$

Sustituyendo esta ecuación en la de diseño e integrando entre la salida y la entrada del cambiador (I y II respectivamente):

$$\int_I^{II} \frac{d(T' - T'')}{T' - T''} = -U \left(\frac{1}{m' \cdot c'_p} + \frac{1}{m'' \cdot c''_p} \right) \int_I^{II} dA$$

$$\ln(T' - T'')_{II} - \ln(T' - T'')_I = -UA \left(\frac{1}{m' \cdot c'_p} + \frac{1}{m'' \cdot c''_p} \right)$$

$$\ln \frac{(T' - T'')_{II}}{(T' - T'')_I} = -UA \left(\frac{1}{m' \cdot c'_p} + \frac{1}{m'' \cdot c''_p} \right)$$

Integrando a su vez las ecuaciones de balance entálpico entre los mismos límites:

$$\int_I^{II} dT' = \int_I^{II} \frac{-dQ}{m' \cdot c'_p} \quad (T'_{II} - T'_I) = \frac{Q}{m' \cdot c'_p}$$

$$\int_I^{II} dT'' = \int_I^{II} \frac{dQ}{m'' \cdot c''_p} \quad (T''_{II} - T''_I) = -\frac{Q}{m'' \cdot c''_p}$$

3. Diseño de cambiadores: método DTML

Sustituyendo en la ecuación de diseño integrada las masas térmicas ($m C_p$) por su relación con T y Q según los balances térmicos:

$$\ln \frac{(T' - T'')_{II}}{(T' - T'')_I} = -UA \left(\frac{T''_{II} - T'_I}{-Q} + \frac{T'_{II} - T'_I}{Q} \right)$$

Reordenando la ecuación:

$$\ln \frac{\Delta T_{II}}{\Delta T_I} = -\frac{UA}{Q} (T''_I - T''_{II} + T'_{II} - T'_I) = -\frac{UA}{Q} [(T'_{II} - T''_{II}) + (T'_I - T'_I)]$$

$$\ln \frac{\Delta T_I}{\Delta T_{II}} = \frac{UA}{Q} [(T''_I - T'_I) - (T''_{II} - T'_{II})]$$

$$Q = UA \frac{[(T''_I - T'_I) - (T''_{II} - T'_{II})]}{\ln \frac{\Delta T_I}{\Delta T_{II}}} = UA \frac{\Delta T_I - \Delta T_{II}}{\ln \frac{\Delta T_I}{\Delta T_{II}}}$$

ΔT_{ml} (pointing to the fraction in the equation)

$$Q_0 = UA \Delta T_{ml}$$

Si variación de U es apreciable pero moderada \rightarrow división del cambiador en tramos en los que se pueda considerar U cte. y obtener el área de cada tramo

3.2. Coeficiente global variable

Suponer una variación de U con T . Habitualmente se supone variación lineal $\rightarrow U = a + bT$

$$A = \int_0^{Q_0} \frac{dQ}{(a + b \cdot \Delta T) \cdot \Delta T} \Rightarrow Q_0 = A \cdot (U \cdot \Delta T)_{mlc} \quad (U \cdot \Delta T)_{mlc} = \frac{\Delta T_{II} \cdot U_I - \Delta T_I \cdot U_{II}}{\ln \frac{\Delta T_{II} \cdot U_I}{\Delta T_I \cdot U_{II}}}$$

Si variación de U no lineal: resolver por tramos en los que se pueda suponer variación lineal

3.2. Cambiador de carcasa y tubos

Difícil integración de la ecuación de diseño → cálculo del área con ecuación de diseño de tubos concéntricos modificada con un factor de corrección F_T

$$Q_0 = U \cdot A \cdot \Delta T_m = U \cdot A \cdot (\Delta T_{ml}) F_T \rightarrow \Delta T_{ml} \text{ de tubos concéntricos en contracorr.}$$

SIGNIFICADO Y CÁLCULO DE F_T

$$F_T = \frac{\Delta T_m}{\Delta T_{ml}} = \frac{\Delta T_m}{\frac{(T_1' - T_2'') - (T_2' - T_1'')}{\ln \frac{(T_1' - T_2'')}{(T_2' - T_1'')}}} \leq 1$$

Tiene en cuenta que la fuerza impulsora media es menor en cambiador de carcasa y tubos que en concéntrico

1

$$F_T = \frac{(\Delta T_{ml})_{C-T}}{(\Delta T_{ml})_{\text{Tubos concéntricos}}} = f(Z, \eta_c) \quad Z = \frac{m'' Cp''}{m' Cp'} = \frac{T_1' - T_2'}{T_2'' - T_1''} = \frac{\downarrow T \text{ en fluido caliente}}{\uparrow T \text{ en fluido frío}}$$

$$\eta_c = \frac{(Q \text{ recibido por F.F. real})}{(Q \text{ recibido por F.F. máximo})} = \frac{m'' Cp'' (T_2'' - T_1'')}{m'' Cp'' (T_1' - T_1'')}$$

Si $T_2'' = T_1'$

3.2. Cambiador de carcasa y tubos

RENDIMIENTO DE UN CAMBIADOR DE CALOR

Z < 1 → mayor variación de T en F. frío

$$\text{RENDIMIENTO DE CALEFACCIÓN} \Rightarrow \eta_c = \frac{(\text{Q recibido por F. F. real})}{(\text{Q recibido por F. F. máximo})} = \frac{m'' c_p'' (T_2'' - T_1'')}{m'' c_p'' (T_1' - T_1'')} = z \eta_c$$

Si $T_2'' = T_1'$

Z > 1 → mayor variación de T en F. caliente

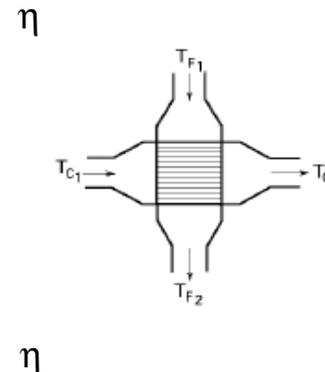
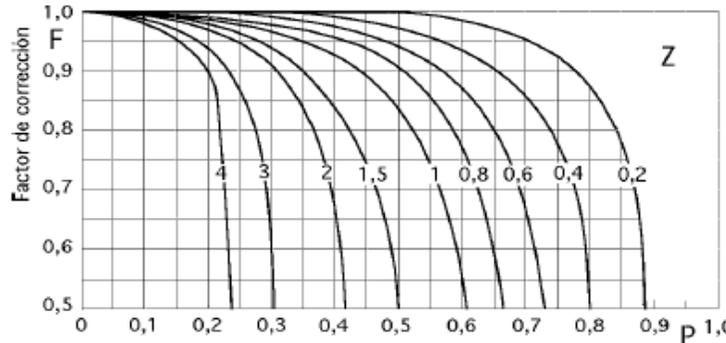
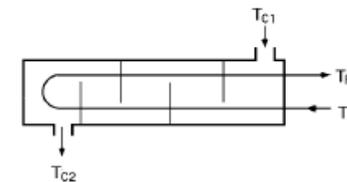
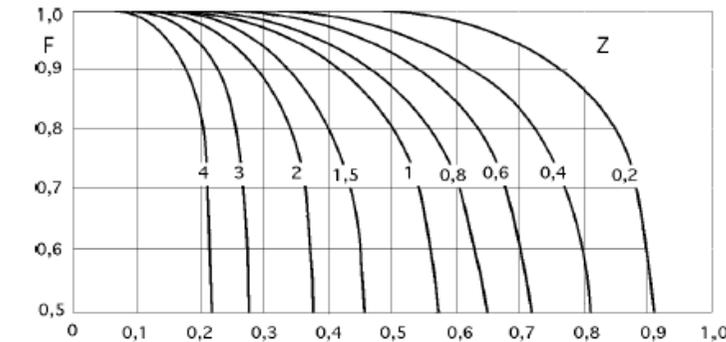
$$\text{RENDIMIENTO DE ENFRIAMIENTO} \Rightarrow \eta_E = \frac{(\text{Q cedido por F. C. real})}{(\text{Q cedido por F. C. máximo})} = \frac{m' c_p' (T_1' - T_2')}{m' c_p' (T_1' - T_1'')} = z \eta_c$$

Si $T_2'' = T_1'$

3.2. Cambiador de carcasa y tubos

2

$$F_T = \frac{(\Delta T_{ml})_{C-T}}{(\Delta T_{ml})_{\text{Tubos concéntricos}}} = f(Z, \eta) \begin{cases} Z = \frac{m_t C_{p_t}}{m_c C_{p_c}} = \frac{T_{1c} - T_{2c}}{T_{2t} - T_{1t}} \\ \eta = \frac{T_{2t} - T_{1t}}{T_{1c} - T_{1t}} \end{cases} \quad \begin{array}{l} c: \text{carcasa} \\ t: \text{tubos} \end{array}$$



3

CAMBIO DE FASE → $F_T = 1$

3.3. Cambiador de placas y marcos

Superficies acanaladas → Rég. turbulento para $Re > 10-500$ → mejor intercambio de calor
reducción de ensuciamiento por ↑ turbulencia

Elevada versatilidad → modificación de área de contacto por cambio de número de placas

Ecuación de diseño análoga a la de carcasa y tubos: $Q_0 = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml} \cdot F_T$

CÁLCULO DE F_T

$F_T = f$ (tipo de flujo, número de pasos)

Relación de caudales: 0,66-1,5 → Flujo paralelo y 1 paso → $F_T \approx 1$

Otras relaciones de caudales → Gráficas

CÁLCULO DE U

En este caso $A' = A_{ml} = A''$ → $U' = U_{ml} = U''$

Régimen laminar: $Re < 400$ →	$h_c = 0,742 \cdot c_p \cdot G \cdot Re^{-0,62} \cdot Pr^{-0,667} \frac{\mu}{\mu_0}$
Régimen turbulento: $Re > 400$ →	$h_c = 0,2536 \cdot \frac{k}{D_e} \cdot Re^{0,65} \cdot Pr^{0,4}$

G → velocidad másica

D_e → diámetro equivalente (2δ)

4. Eficacia de cambiadores: método NUT

Apropiado cuando el balance de energía no puede proporcionar los datos desconocidos de m , T o Q .

$$\text{Eficacia} \Rightarrow \varepsilon = \frac{Q}{Q_{\max}}$$

Q_{\max} → Caudal de calor máximo que se podría transferir en un cambiador de calor de superficie infinita

$$Q_{\max} = (m C_p)_{\min} (T'_1 - T''_1)$$

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{\max}} = \frac{Q}{(m C_p)_{\min} (T'_1 - T''_1)} \quad Q = \varepsilon Q_{\max} = \varepsilon (m C_p)_{\min} (T'_1 - T''_1)$$

f (tipo de cambiador; disposición de flujo)

En caso de conocer todas las temperaturas:

$$Z \leq 1 \quad \therefore \quad \varepsilon = \frac{m'' \cdot c_p'' \cdot (T_2'' - T_1'')}{(m \cdot c_p)_{\min} \cdot (T_1' - T_1'')} = \frac{(T_2'' - T_1'')}{(T_1' - T_1'')} \quad (\varepsilon = \eta_C)$$

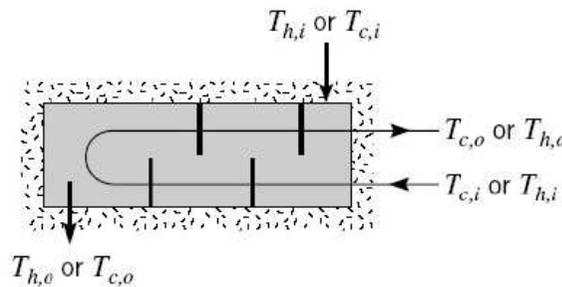
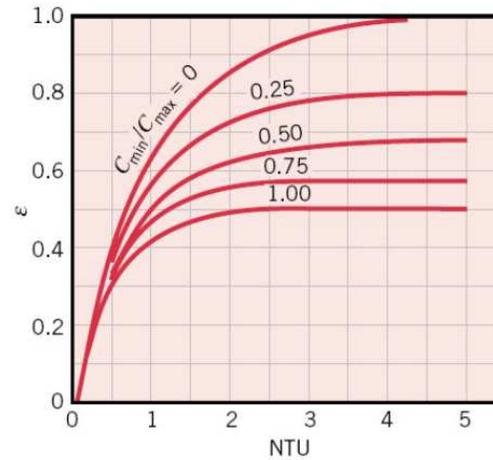
$$Z > 1 \quad \therefore \quad \varepsilon = \frac{m' \cdot c_p' \cdot (T_1' - T_2')}{(m \cdot c_p)_{\min} \cdot (T_1' - T_1'')} = \frac{(T_1' - T_2')}{(T_1' - T_1'')} \quad (\varepsilon = \eta_E)$$

$$\varepsilon = f \left(\frac{U \cdot A}{(m \cdot c_p)_{\min}}, \frac{(m \cdot c_p)_{\min}}{(m \cdot c_p)_{\max}} \right) = f(\text{NUT}, C_R) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Gráficas} \\ \text{Ecuaciones} \end{array} \right.$$

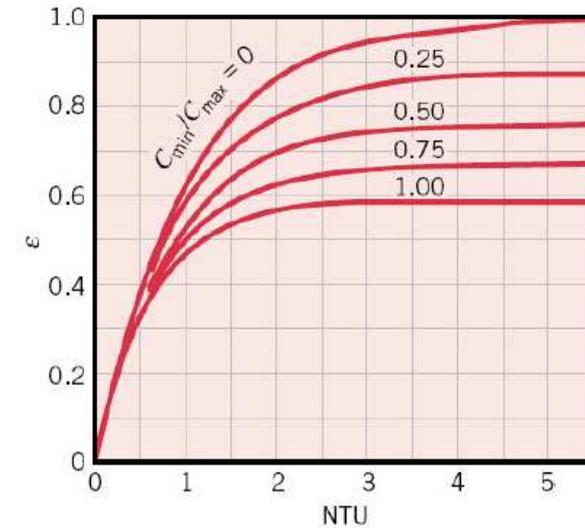
4. Eficacia de cambiadores: método NUT

Eficacia vs NUT

Tubos concéntricos-flujo paralelo



Carcasa-tubos
1-2n pasos por tubos





4. Eficacia de cambiadores: método NUT

Tabla 21-3. Relaciones de las eficacias de los cambiadores de calor.

Tubos concéntricos	
Flujo paralelo	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NUT \cdot (1 + C_R)]}{1 + C_R}$
Flujo contracorriente	$C_R < 1 \quad \varepsilon = \frac{1 - \exp[-NUT \cdot (1 - C_R)]}{1 - C_R \cdot \exp[-NUT \cdot (1 - C_R)]}$ $C_R = 1 \quad \varepsilon = \frac{NUT}{1 + NUT}$
Carcasa y tubos	
Un paso carcasa (2, 4, ... por tubos)	$\varepsilon_1 = 2 \left\{ \frac{1 + \exp[-NUT \cdot (1 + C_R^2)^{1/2}]}{1 - \exp[-NUT \cdot (1 + C_R^2)^{1/2}]} \right\}^{-1}$
n pasos carcasa (2n, 4n, ... por tubos)	$\varepsilon = \left[\left(\frac{1 - \varepsilon_1 \cdot C_R}{1 - \varepsilon_1} \right)^n - 1 \right] \cdot \left[\left(\frac{1 - \varepsilon_1 \cdot C_R}{1 - \varepsilon_1} \right)^n - C_R \right]^{-1}$
Flujo cruzado	
Sin mezclar	$\varepsilon = 1 - \exp\left[\frac{1}{C_R} \cdot (NUT)^{0,22} \cdot \left[\exp(-C_R \cdot (NUT)^{0,78}) - 1 \right] \right]$
$(mC_p)_{max}$ mezclado, $(mC_p)_{min}$ sin mezcla	$\varepsilon = (1/C_R) \cdot (1 - \exp[-C_R \cdot (1 - \exp(-NUT))])$
$(mC_p)_{min}$ mezclado, $(mC_p)_{max}$ sin mezcla	$\varepsilon = 1 - \exp[-(1/C_R) \cdot (1 - \exp(-C_R \cdot NUT))]$
Todos los cambiadores	
$C_R = 0$	$\varepsilon = 1 - \exp[-NUT]$

Tabla 21-4. Relaciones de los NUT de los cambiadores de calor.

Tubos concéntricos	
Flujo paralelo	$NUT = -\frac{\ln[1 - \varepsilon \cdot (1 + C_R)]}{1 + C_R}$
Flujo contracorriente	$C_R < 1 \quad NUT = \frac{1}{C_R - 1} \cdot \ln\left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon \cdot C_R - 1} \right)$ $C_R = 1 \quad NUT = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}$
Carcasa y tubos	
Un paso carcasa (2, 4, ... por tubos)	$NUT = -(1 + C_R^2)^{-1/2} \cdot \ln\left(\frac{E - 1}{E + 1} \right) \therefore E = \frac{2/\varepsilon_1 - (1 + C_R)}{(1 + C_R^2)^{1/2}}$
n pasos carcasa (2n, 4n, ... tubos)	Ecuaciones de n=1 con: $\varepsilon_1 = \frac{F - 1}{F - C_R}$; $F = \left(\frac{\varepsilon \cdot C_R - 1}{\varepsilon - 1} \right)^{1/n}$
Flujo cruzado	
$(mC_p)_{max}$ mezclado, $(mC_p)_{min}$ sin mezcla	$NUT = -\ln[1 + (1/C_R) \cdot \ln(1 - \varepsilon \cdot C_R)]$
$(mC_p)_{min}$ mezclado, $(mC_p)_{max}$ sin mezcla	$NUT = -(1/C_R) \cdot \ln[C_R \cdot \ln(1 - \varepsilon) + 1]$
Todos los cambiadores	
$C_R = 0$	$NUT = -\ln(1 - \varepsilon)$

Aumento de eficacia

Aumento de la velocidad de transporte (útiles si \uparrow de velocidad tpte. compensa \uparrow costes):

Métodos activos: requieren consumo de energía externa (Ej. vibración de superficies, agit. fluido, ...)

Métodos pasivos: aumentan superficie de T.Q. (Ej. aletas, superficies onduladas, tratamiento de superficies, ...). En la práctica implican consumo extra de energía por aumento de pérdida de carga.

El aumento de eficacia, aumento de velocidad de tpte. o aumento de U permite:

1. reducir el área de tpte. para una aplicación determinada \rightarrow equipo de menor tamaño.
2. aumentar caudal de fluido, para un cambiador determinado.
3. trabajar con fuerzas impulsoras menores

$$Q = U A \Delta T_{ml}$$

Aumento de eficacia

Métodos para aumentar la eficacia y su aplicación

Método	Aplicación				
	C. Natural	C. Forzada	Ebullición: CN sup. Sumerg	Ebullición: CF flujo	Condensación
Aletas	H	H	H	O	H
Ondulaciones	O	H	O	H	H
Dispositivos de desplazamiento	-	O	-	O	-
Dispositivos de giro	-	H	-	H	-
Superficies tratadas	-	H	H	O	H

H: Habitual; O: Ocasional

ADQUISICIÓN = f (ESPECIFICACIONES, COSTE)

1. **Caudal de calor intercambiado** → parámetro fundamental
2. **Coste**
 - Inmovilizado → si es posible equipo de catálogo
 - Deben tenerse en cuenta los costes de operación y mantenimiento.
3. **Potencia de bombeo.**
 - Cuanto menor es el caudal circulante menores las pérdidas de carga y el coste de operación, pero mayor tamaño del cambiador. En general al duplicar el caudal másico se divide el inmovilizado por dos y se multiplican los costes de bombeo por 8.
 - Velocidades típicas para líquidos: 0,7-7 m/s, para gases: 3-30 m/s.
 - Las velocidades bajas evitan problemas de erosión, vibraciones y ruido.
4. **Tamaño y peso** → mejor cuanto más pequeño y ligero. Sobre todo en tecnologías automotrices y aeroespaciales.
5. **Tipo** → función del tipo de fluidos, las limitaciones de espacio y peso, cambios de fase,
6. **Materiales** → temperaturas inferiores a 150°C y 15 atm: no es necesario considerar esfuerzos térmicos y estructurales. Diferencias de T superiores a 50°C hacen necesario el análisis serio de expansión térmica. Posibilidad de manejar fluidos corrosivos.
7. **Otras consideraciones** → Hermeticidad (fluidos tóxicos o muy costosos). Seguridad y fiabilidad. Existencia de otros cambiadores en planta. Ruidosidad. ...

Guía aplicada a la selección del tipo de cambiador.

Aplicación	Observaciones
Viscosidad baja ($\mu < 10$ cp)	El de placas y marcos requiere menos área. Si la presión o temperatura son altas, se utiliza el de carcasa y tubos.
Líquidos de baja viscosidad y vapor	Si el fluido no es corrosivo, el de carcasa y tubos (acero al carbono). Para fluidos corrosivos o condiciones higiénicas (ej: alimentos) si la presión es moderada: el de placas.
Viscosidad media ($10 < \mu < 100$ cp)	Placas y marcos. Si el contenido de sólidos es alto, mejor el de espiral.
Viscosidad alta ($\mu > 100$ cp)	El de placas y marcos es muy adecuado pues el flujo es turbulento a menores velocidades. Si la viscosidad es muy elevada, el de espiral es incluso mejor.
Líquidos con tendencia a ensuciamiento	Los de espiral y platos, especialmente el último, debido a la facilidad de limpieza. Cuando el fluido lleva sólidos fibrosos el de espiral es mejor.
Suspensiones y pulpas	El de espiral, pues puede utilizarse con un contenido en sólidos de hasta 50%.
Fluidos sensibles al calor	El de placas y marcos, aunque cuando coincide que es también muy viscoso, el de espiral es mejor.
Enfriamiento con aire	Superficies extendidas (aerorefrigerantes).
Gas o aire a presión	El de placas, si la presión y temperatura es moderada. Caso contrario: carcasa y tubos, láminas o espiral.
Condensadores	El de carcasa y tubos, si el fluido no es corrosivo. En caso contrario, los de espiral o láminas son adecuados.
Alta presión (35 bar) o alta temperatura (500°C)	Carcasa y tubos.
Fluidos muy corrosivos	Cambiadores de grafito.