

INTERCAMBIADORES DE CALOR

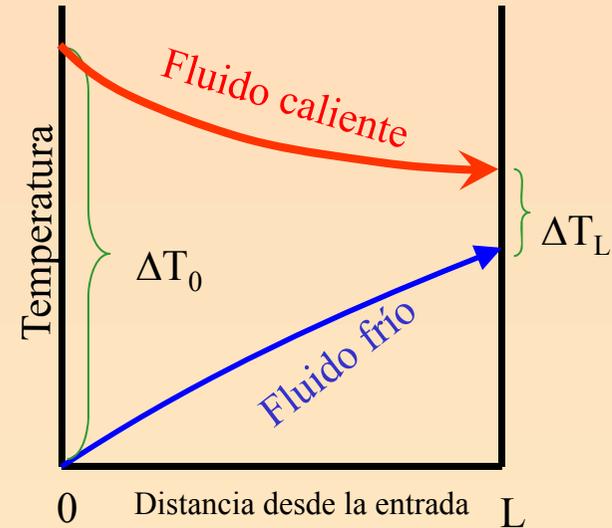
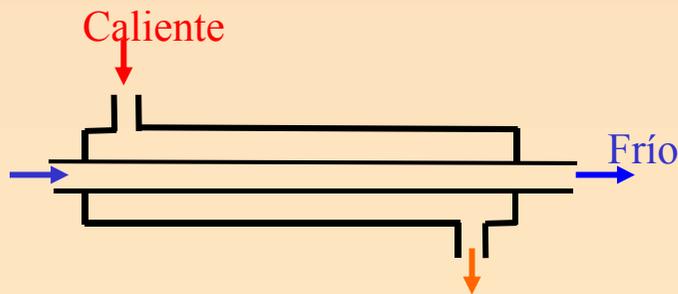
Indice

- Intercambiadores de calor. Utilidad. Tipos
- Estudio térmico de los intercambiadores de calor.
- Coeficiente global de transmisión de calor
- Metodología de cálculo de un intercambiador de calor.
 - Método de la DMLT.
 - Método de la Efectividad.

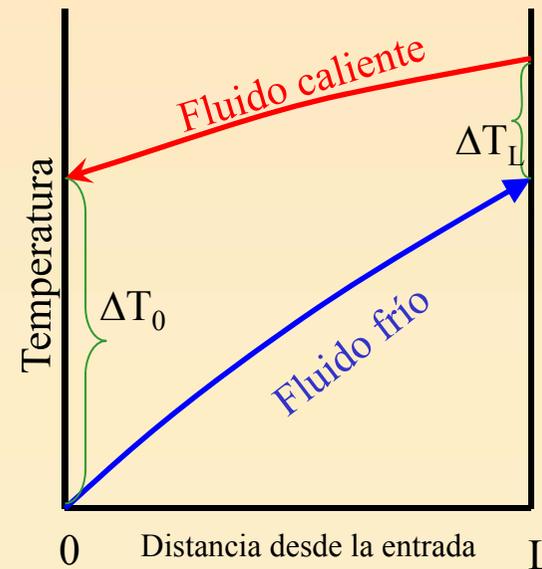
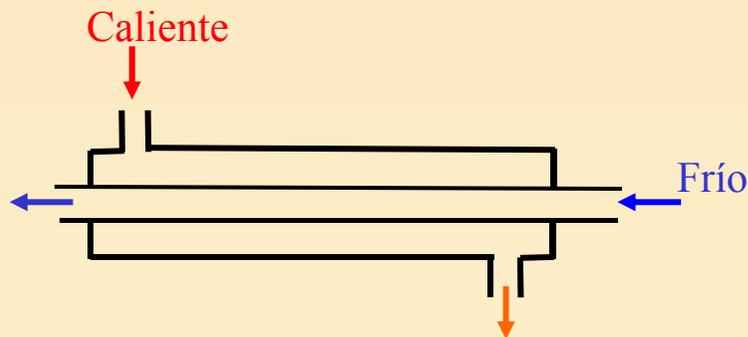
INTRODUCCION. CLASIFICACION

• POR EL SENTIDO DE CIRCULACIÓN DE LOS FLUIDOS.

- A. PARALELO
- FLUJO EQUICORRIENTE



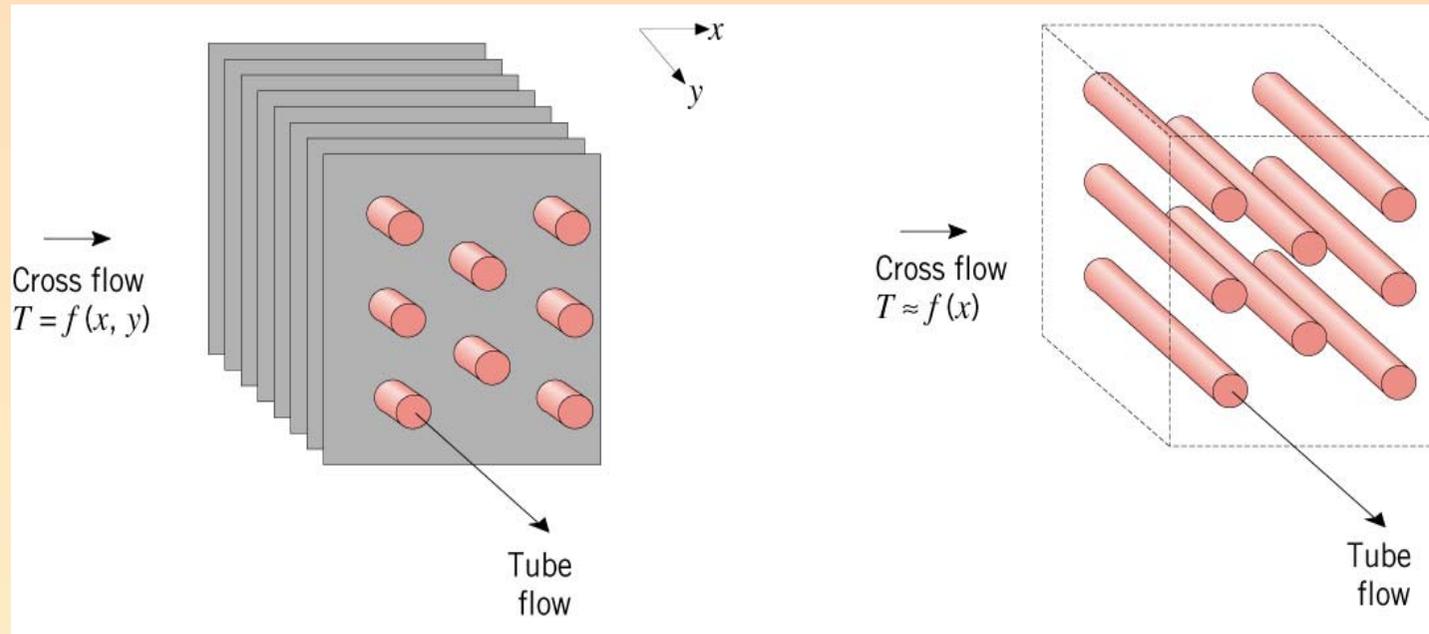
- FLUJO CONTRACORRIENTE



INTRODUCCION.

B. FLUJO CRUZADO

- MEZCLADO
- NO MEZCLADO



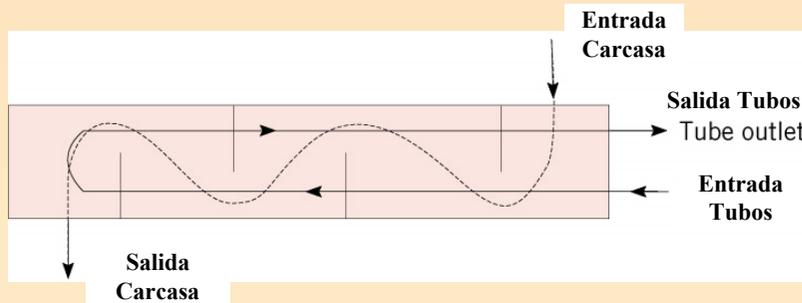
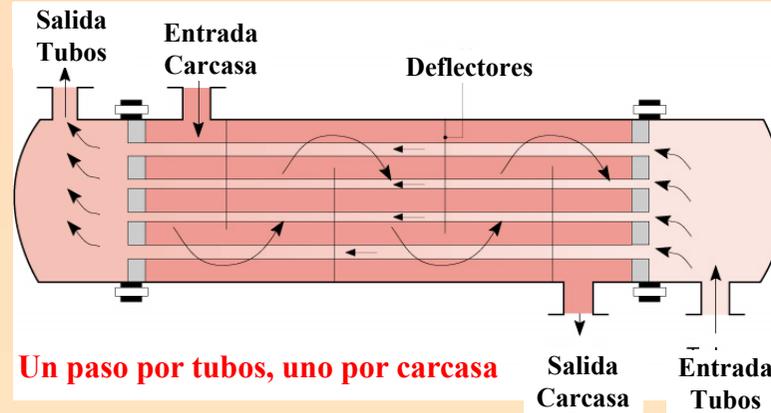
Ambos flujos sin mezclar

Un flujo mezclado, otro sin mezclar

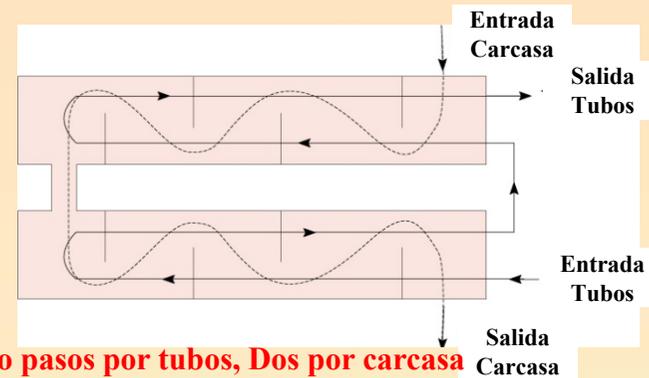
INTRODUCCION.

SEGÚN EL DISEÑO

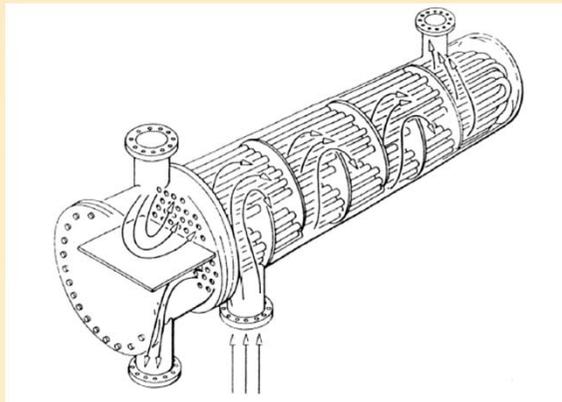
A. INTERCAMBIADORES DE CARCASA Y TUBOS



Dos pasos por tubos, uno por carcasa



Cuatro pasos por tubos, Dos por carcasa



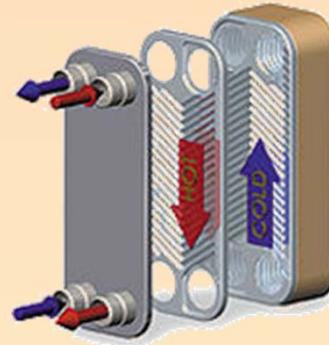
INTRODUCCION.

SEGÚN EL DISEÑO

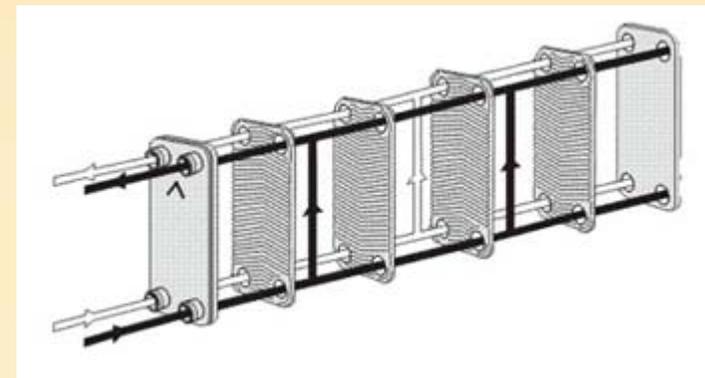
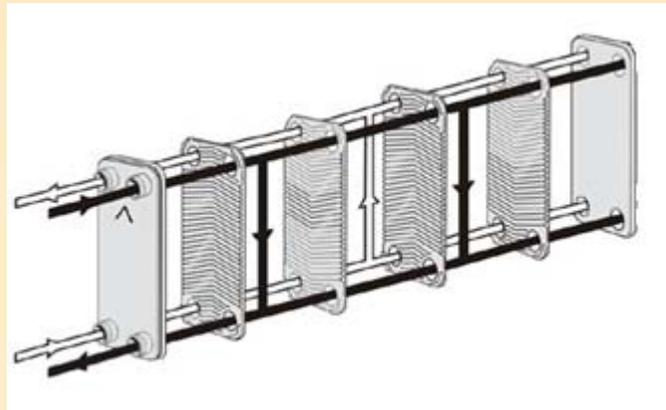
B. INTERCAMBIADORES DE PLACAS



CONTRACORRIENTE



EQUICORRIENTE

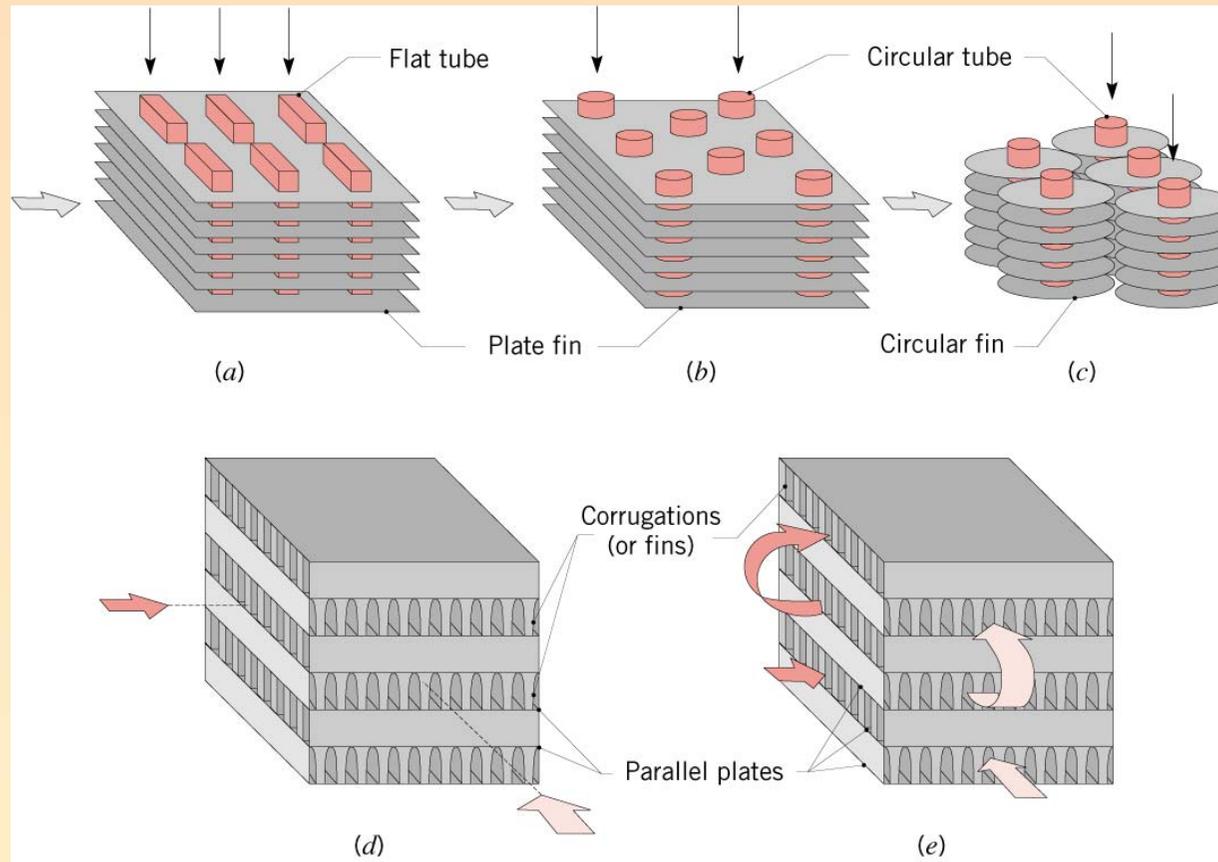


INTRODUCCION.

SEGÚN EL DISEÑO

C. INTERCAMBIADORES COMPACTOS

Caracterizados por relaciones area/volumen elevadas

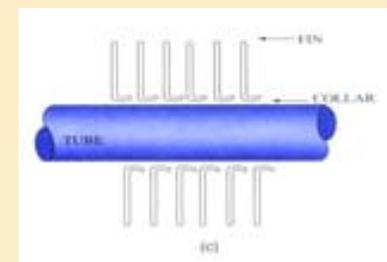
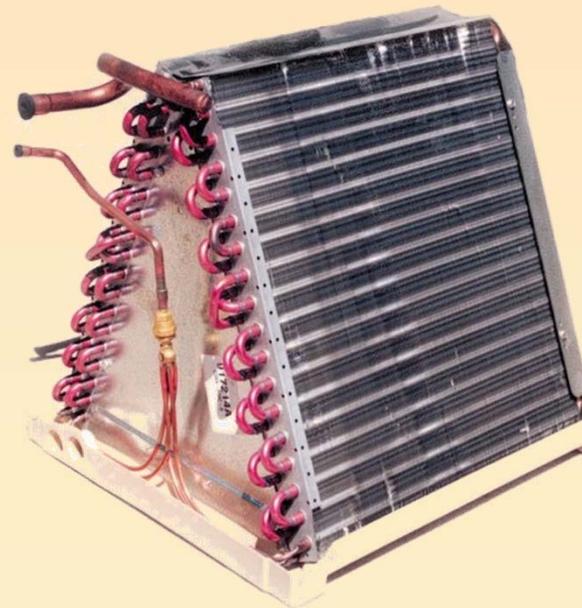
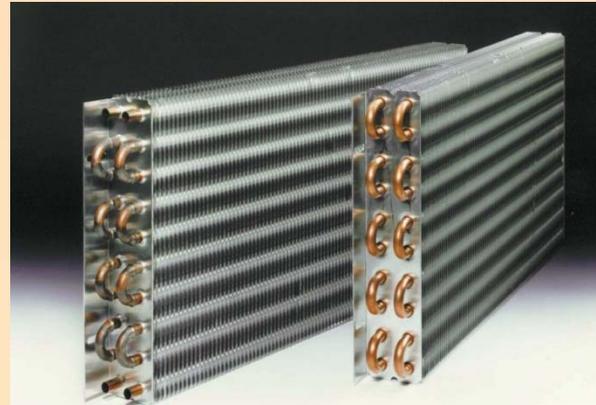


INTRODUCCION.

SEGÚN EL DISEÑO

C. INTERCAMBIADORES COMPACTOS

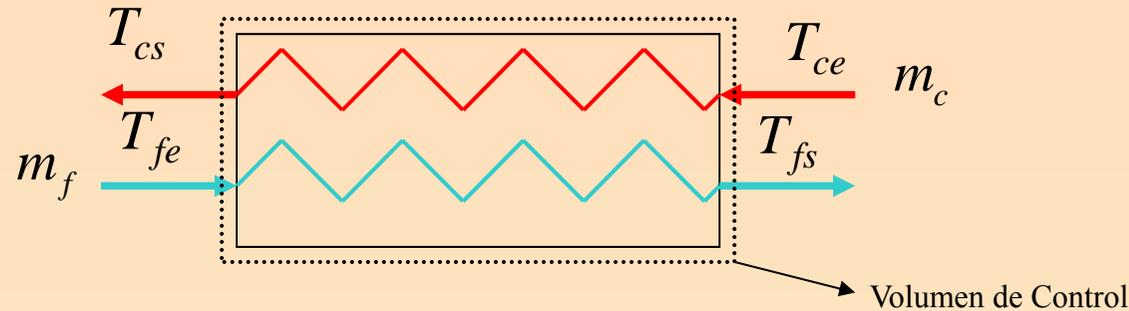
- Con Aire
 - De tubos y aletas



ESTUDIO TÉRMICO DEL INTERCAMBIADOR

Balances de Energía en un Intercambiador

$m = \text{caudal másico}$



$$q = m_c (h_{ce} - h_{cs}) = m_f (h_{fs} - h_{fe})$$

Si se introduce la aproximación

$$\Delta h \approx c_p \Delta T$$

Válida para líquidos y gases a baja presión sin **cambio de fase**

$$q = m_c C_{pc} (T_{ce} - T_{cs}) = m_f C_{pf} (T_{fs} - T_{fe})$$

ESTUDIO TÉRMICO DEL INTERCAMBIADOR

Coeficiente global de transmisión de calor (U)

Definición UA:

$$\delta q = U \cdot (T_i - T_e) \cdot dA$$

$$UA = \frac{1}{R_{conv,f} + R_{cond} + R_{conv,c} + R_{f,f} + R_{f,c}} = U_{ref} A_{ref}$$

Orden de magnitud

COMBINACIÓN DE FLUIDOS	$U (W / m^2 \cdot K)$
• Agua-agua	850-1700
• Agua-aceite	110-350
• Condensador de vapor (agua en los tubos)	1000-6000
• Condensador que funciona con amoníaco (agua en tubos)	800-1400
• Condensador que funciona con alcohol (agua en tubos)	250-700
• Intercambiador de tubos aleteados (agua en tubos, aire en flujo cruzado)	25-50

ESTUDIO TÉRMICO DEL INTERCAMBIADOR

RESISTIVIDAD

Parámetro similar a la resistencia térmica pero independiente del área de intercambio de calor.

$$r = R \cdot A$$

FACTOR DE ENSUCIAMIENTO

Se define el *factor de ensuciamiento* (“*fouling factor*”), tiene en cuenta la deposición de suciedad:

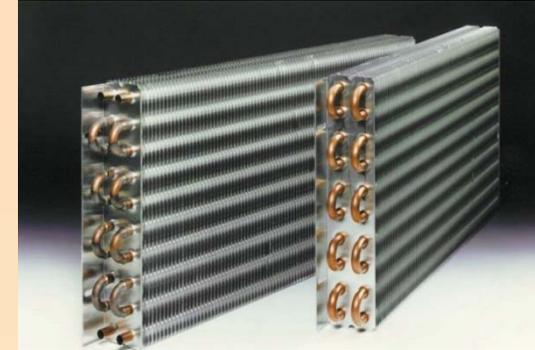
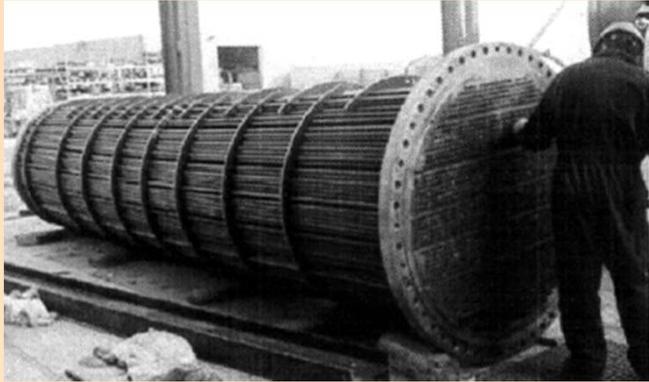
$$r_f \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

La *resistencia térmica* provocada por la capa de ensuciamiento en una superficie A será, por tanto:

$$R_f = \frac{r_f}{A}$$

FLUIDO	$R_f (m^2 \cdot K / W)$
• Agua de mar y agua de alimentación del evaporador tratada (por debajo de 50°C)	0.0001
• Agua de mar y agua de alimentación del evaporador tratada (por encima de 50°C)	0.0002
• Agua de río (por debajo de 50°C)	0.0002-0.001
• Fuel oil	0.0009
• Líquidos refrigerantes	0.0002
• Vapor (comportamiento no oleoso)	0.0001

METODOLOGÍA DE CALCULO



Hipótesis

- Ausencia de Conducción Axial
- Propiedades termofísicas constantes
- Coeficientes de Convección constantes

-METODOLOGÍA DE LA DMLT

-METODOLOGÍA DE LA EFECTIVIDAD.

METODOLOGÍA DE LA DMLT

Balance de calor en un dx

$$dq = U dA (T_c - T_f) = -m_f Cp_f dT_f = -m_c Cp_c dT_c$$

Balance de calor entre 0 y x

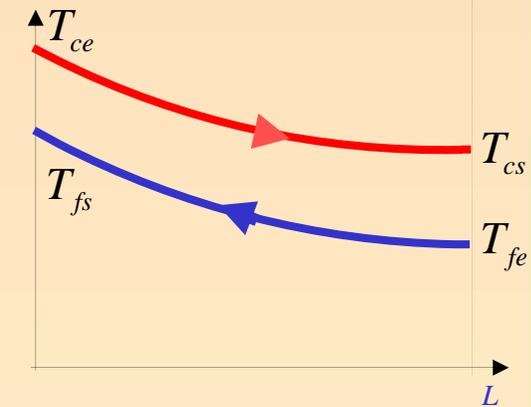
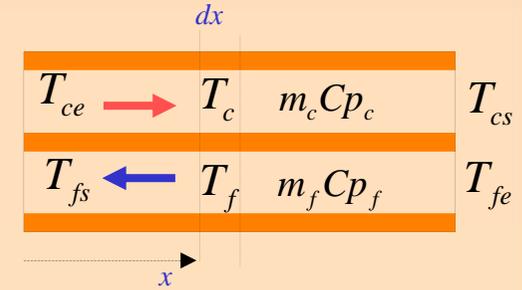
$$m_f Cp_f (T_{fs} - T_f) = m_c Cp_c (T_{ce} - T_c) \quad \rightarrow \quad T_f = T_{fs} - \frac{m_c Cp_c}{m_f Cp_f} (T_{ce} - T_c)$$

Sustituyendo en la 1ª ecuación y separando variables

$$\frac{U dA}{m_c Cp_c} = \frac{dT_c}{(T_f - T_c)} = \frac{dT_c}{T_{fs} - \frac{m_c Cp_c}{m_f Cp_f} T_{ce} - \left[1 - \frac{m_c Cp_c}{m_f Cp_f}\right] T_c}$$

Integrando a lo largo de todo el intercambiador

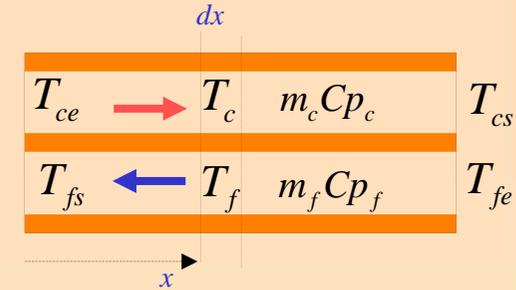
$$\frac{UA}{m_c Cp_c} = \frac{-1}{\left(1 - \frac{m_c Cp_c}{m_f Cp_f}\right)} \ln \left[\frac{T_{fs} - \frac{m_c Cp_c}{m_f Cp_f} T_{ce} - \left[1 - \frac{m_c Cp_c}{m_f Cp_f}\right] T_{cs}}{T_{fs} - \frac{m_c Cp_c}{m_f Cp_f} T_{ce} - \left[1 - \frac{m_c Cp_c}{m_f Cp_f}\right] T_{ce}} \right]$$



METODOLOGÍA DE LA DMLT

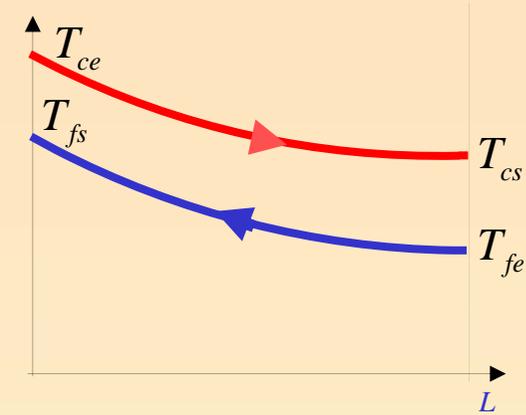
Operando

$$\frac{UA}{m_c Cp_c} = \frac{-1}{\left(1 - \frac{m_c Cp_c}{m_f Cp_f}\right)} \ln \left[\frac{T_{fs} - \frac{m_c Cp_c}{m_f Cp_f} T_{ce} - \left[1 - \frac{m_c Cp_c}{m_f Cp_f}\right] T_{cs}}{T_{fs} - T_{ce}} \right]$$



La relación de capacidades se obtiene mediante un balance de calor entre 0 y L

$$m_f Cp_f (T_{fs} - T_{fe}) = m_c Cp_c (T_{ce} - T_{cs}) \quad \rightarrow \quad \frac{m_c Cp_c}{m_f Cp_f} = \frac{T_{fs} - T_{fe}}{T_{ce} - T_{cs}}$$



Sustituyendo y operando

$$\frac{UA}{m_c Cp_c} = \frac{-(T_{ce} - T_{cs})}{T_{ce} - T_{cs} - (T_{fs} - T_{fe})} \ln \left[\frac{T_{fs} - T_{cs} + T_{fe} - T_{fs}}{T_{fs} - T_{ce}} \right]$$

finalmente

$$q_{real} = m_c Cp_c (T_{ce} - T_{cs}) = UA \frac{(T_{ce} - T_{fs}) - (T_{cs} - T_{fe})}{\ln \frac{T_{ce} - T_{fs}}{T_{cs} - T_{fe}}} = m_f Cp_f (T_{fs} - T_{fe})$$

$$q = UA DMLT_{contracorriente}$$

METODOLOGÍA DE LA DMLT. GENERALIZACION

Se generaliza el método de la DMLT a otras configuraciones (intercambiadores de carcasa y tubo, y de flujo cruzado).

Para ello se define un factor de corrección F de tal forma que:

$$q_{real} = m_c C p_c (T_{ce} - T_{cs}) = UA \text{ DMLT}_{intercambiador} = m_f C p_f (T_{fs} - T_{fe})$$

$$DMLT_{intercambiador} = DMLT_{contracorriente} \cdot F(R, P) = \frac{(T_{ce} - T_{fs}) - (T_{cs} - T_{fe})}{\ln \frac{T_{ce} - T_{fs}}{T_{cs} - T_{fe}}} F(R, P)$$

$$R = \frac{(T_1 - T_2)}{(t_2 - t_1)} \quad P = \frac{(t_2 - t_1)}{(T_1 - t_1)}$$

Para cada configuración se dispone de *expresiones analíticas o gráficas*, que proporcionan el valor de F en función de los parámetros R y P .

Si R ó P valen 0, el factor de corrección $F=1$ (independe. de la configuración)

METODOLOGÍA DE LA DMLT. GENERALIZACION

TEMA 4. INTERCAMBIADORES

1. Intercambidores (2h)

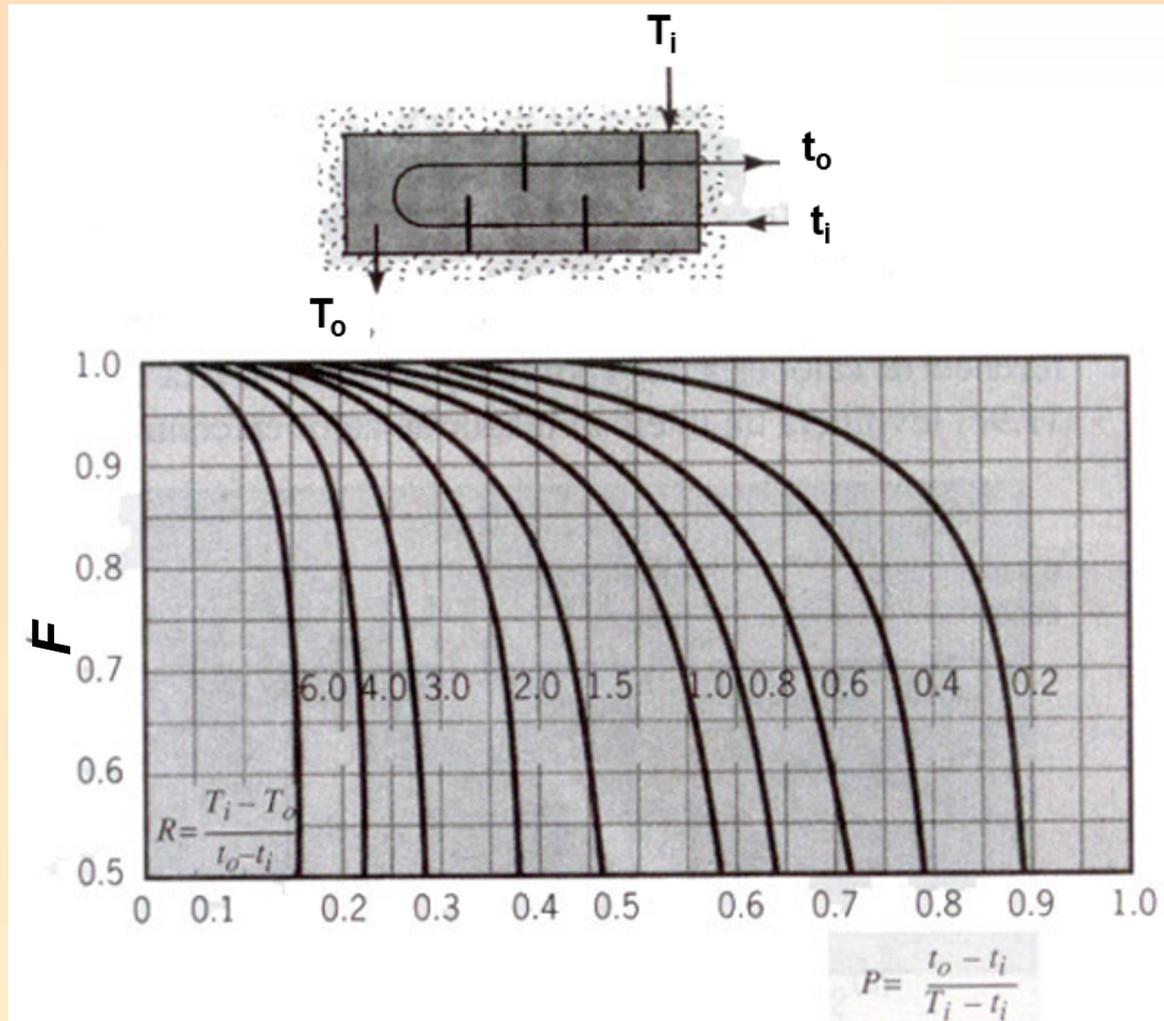


Figura 11.10. Factor de corrección para un intercambiador de coraza y tubo con una coraza y cualquier múltiplo de tubo (dos, cuatro, etc, pasos de tubo)

METODOLOGÍA DE LA DMLT. GENERALIZACION

TEMA 4. INTERCAMBIADORES

1. Intercambiadores (2h)

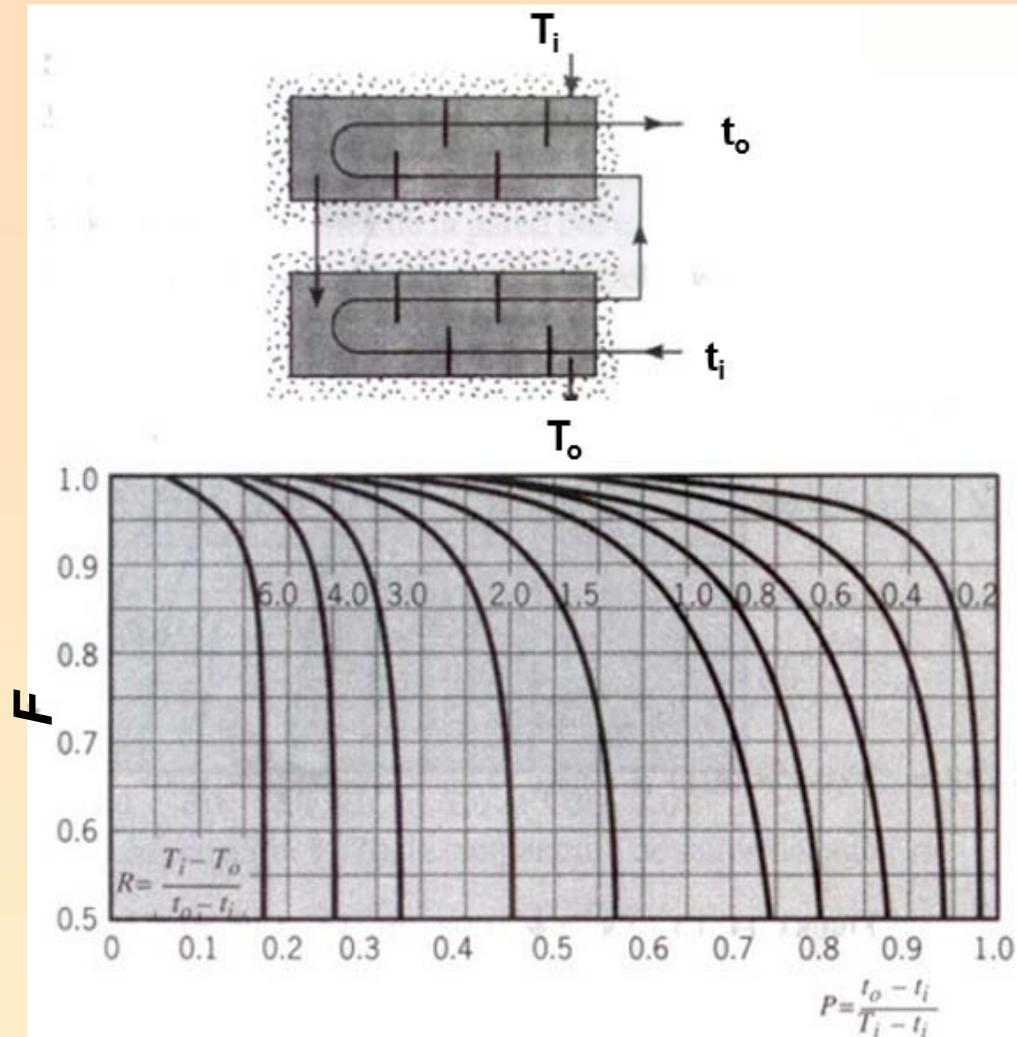


Figura 11.11. Factor de corrección para un intercambiador de calor de coraza y tubo con dos pasos por la coraza y cualquier múltiplo de cuatro pasos de tubo (cuatro, ocho, etc... pasos de tubo)

METODOLOGÍA DE LA DMLT. GENERALIZACION

TEMA 4. INTERCAMBIADORES

1. Intercambiadores (2h)

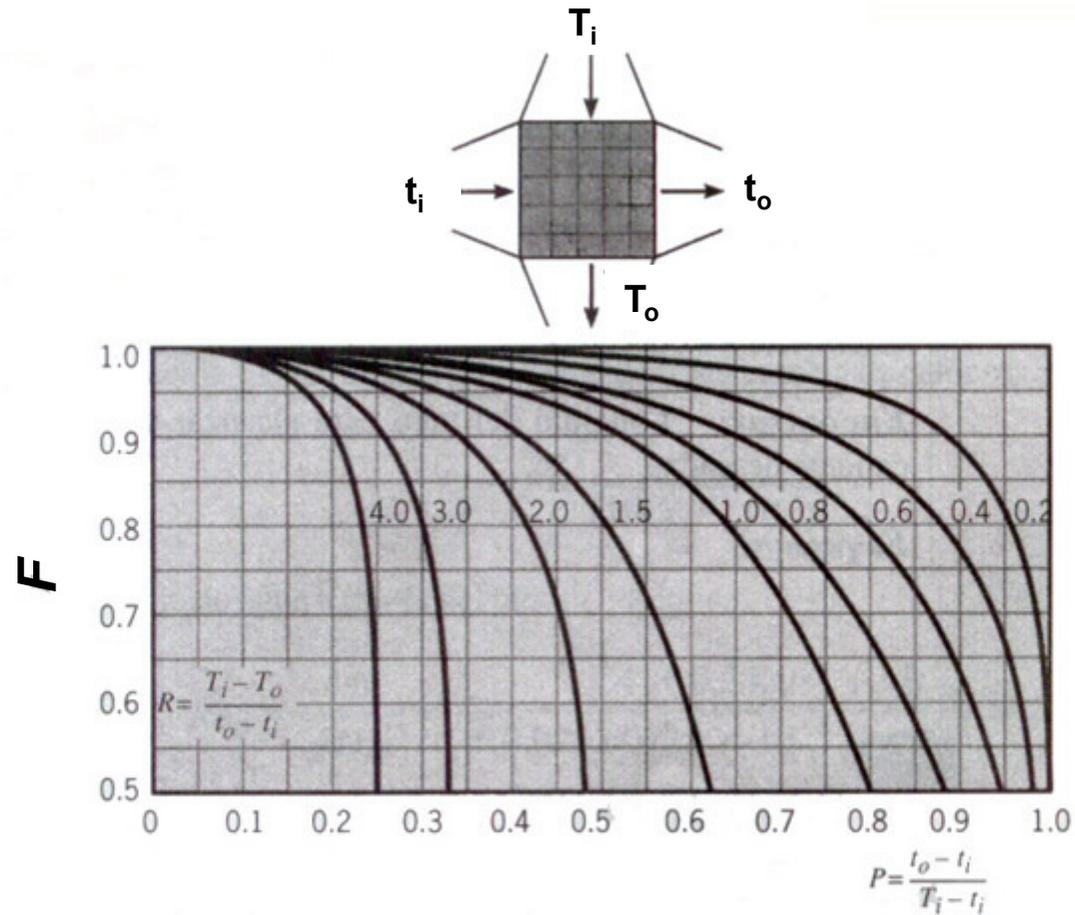


FIGURA 11.12 Factor de corrección para un intercambiador de calor de un solo paso en flujo cruzado con ambos fluidos no mezclados.

METODOLOGÍA DE LA DMLT. GENERALIZACION

TEMA 4. INTERCAMBIADORES

1. Intercambiadores (2h)

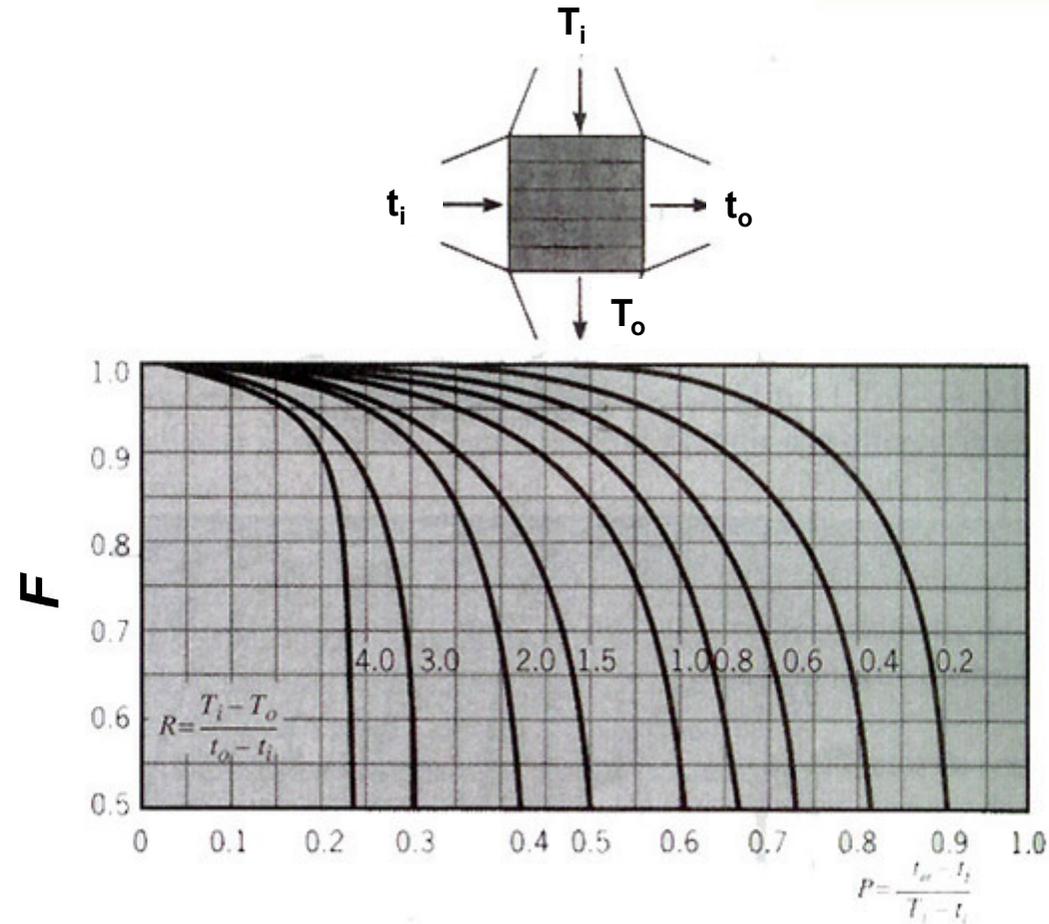
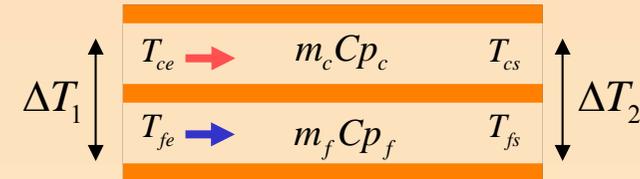


Figura 1.13. Factor de corrección para un intercambiador de un solo paso cruzado con un fluido mezclado y el otro sin mezclar

METODOLOGÍA DE LA DMLT. CASO ESPECIAL EQUICORRIENTE

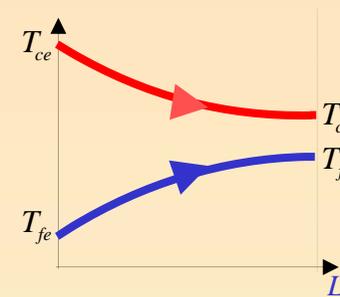
$$q = m_c Cp_c (T_{ce} - T_{cs}) = UA DMLT_{equicorriente} = m_f Cp_f (T_{fs} - T_{fe})$$

Definiendo en este caso la DMLT como:



$$DMLT_{equicorriente} = \frac{(\Delta T_1) - (\Delta T_2)}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$

Se cumple



$$q = m_c Cp_c (T_{ce} - T_{cs}) = UA \frac{(T_{ce} - T_{fe}) - (T_{cs} - T_{fs})}{\ln \frac{T_{ce} - T_{fe}}{T_{cs} - T_{fs}}} = m_f Cp_f (T_{fs} - T_{fe}) \Rightarrow F=1$$

METODOLOGÍA DE LA EFICIENCIA

Si sólo se conocen las temperaturas de entrada de ambos flujos, la metodología DMLT requiere un proceso iterativo. En tales condiciones es preferible el método de la eficiencia:

Eficiencia:
$$\varepsilon = \frac{q}{q_{\max}} \quad q_{\max} = (T_{ce} - T_{fe})(mCp)_{\min}$$

Relación de capacidades:
$$C_r = \frac{(mCp)_{\min}}{(mCp)_{\max}} = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \quad \begin{array}{l} C_f = (mCp)_f \\ C_c = (mCp)_c \end{array}$$

Número de unidades de transferencia de calor NTU:
$$NTU = \frac{UA}{(mCp)_{\min}}$$

Para cada tipología de intercambiador existe una relación del tipo

$$\varepsilon = f(C_r, NTU) \quad \Rightarrow \quad NTU = f(C_r, \varepsilon)$$

METODOLOGÍA DE LA EFICIENCIA

Ejemplo contracorriente

Supongamos (en caso contrario sería análogo) $(mCp)_{min} = m_c Cp_c$ $(mCp)_{max} = m_f Cp_f$

De la definición de eficiencia

$$\varepsilon = \frac{q_{real}}{q_{max}} = \frac{m_c Cp_c (T_{ce} - T_{cs})}{(mCp)_{min} (T_{ce} - T_{fe})} = \frac{(T_{ce} - T_{cs})}{(T_{ce} - T_{fe})}$$

Operando

$$1 - \varepsilon = \frac{T_{ce} - T_{fe} - (T_{ce} - T_{cs})}{T_{ce} - T_{fe}} = \frac{T_{cs} - T_{fe}}{T_{ce} - T_{fe}}$$

De la relación de capacidades caloríficas

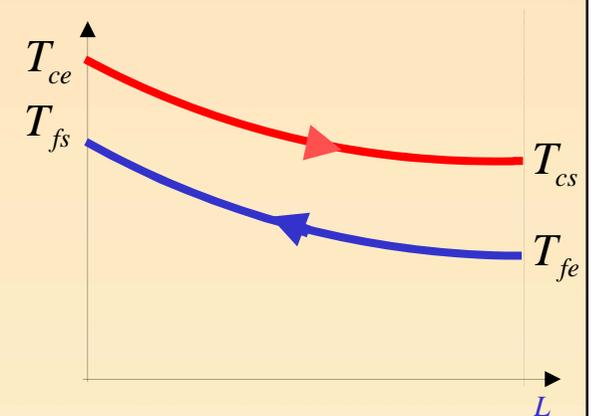
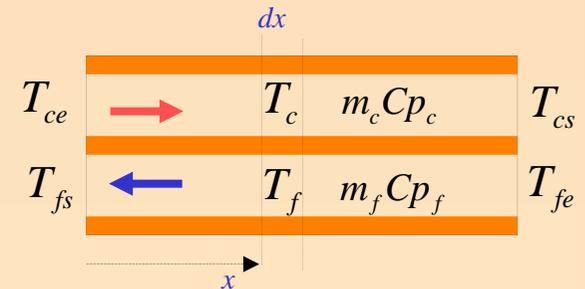
$$Cr = \frac{(mCp)_{min}}{(mCp)_{max}} = \frac{m_c Cp_c}{m_f Cp_f} = \frac{q / (T_{ce} - T_{cs})}{q / (T_{fs} - T_{fe})} = \frac{T_{fs} - T_{fe}}{T_{ce} - T_{cs}}$$

Operando

$$1 - Cr = \frac{(T_{ce} - T_{cs}) - (T_{fs} - T_{fe})}{T_{ce} - T_{cs}}$$

Pudiendo escribir

$$1 - \varepsilon Cr = 1 - \frac{T_{ce} - T_{cs}}{T_{ce} - T_{fe}} \frac{T_{fs} - T_{fe}}{T_{ce} - T_{cs}} = \frac{T_{ce} - T_{fs}}{T_{ce} - T_{fe}}$$



$$\frac{1 - \varepsilon Cr}{1 - \varepsilon} = \frac{T_{ce} - T_{fs}}{T_{cs} - T_{fe}}$$

METODOLOGÍA DE LA EFICIENCIA

En intercambiadores en **contracorriente** se cumplía :

$$q = m_c C p_c (T_{ce} - T_{cs}) = UA \frac{(T_{ce} - T_{fs}) - (T_{cs} - T_{fe})}{\ln \frac{(T_{ce} - T_{fs})}{(T_{cs} - T_{fe})}}$$

Reescribiéndose como :

$$\ln \frac{(T_{ce} - T_{fs})}{(T_{cs} - T_{fe})} = \frac{UA}{m_c C p_c} \frac{(T_{ce} - T_{fs}) - (T_{cs} - T_{fe})}{(T_{ce} - T_{cs})}$$

Teniendo en cuenta la definición del NTU,
y haciendo uso de las anteriores relaciones :

$$\ln \frac{1 - \varepsilon Cr}{1 - \varepsilon} = NTU (1 - Cr)$$

De donde despejando :

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{-NTU(1-Cr)}}{1 - Cr e^{-NTU(1-Cr)}}$$

$$NTU = \frac{\ln \frac{1 - \varepsilon Cr}{1 - \varepsilon}}{(1 - Cr)}$$

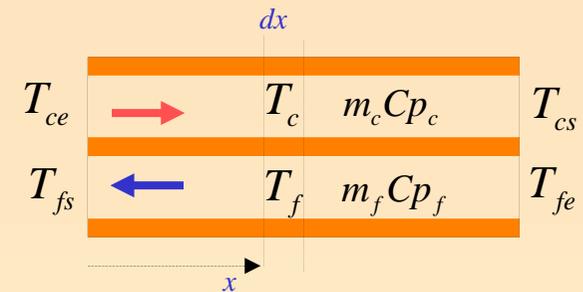
$$\text{Si } Cr=1 \quad \varepsilon = \frac{NTU}{NTU + 1}$$

$$\text{Si } Cr=1 \quad NTU = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}$$

$$\frac{1 - \varepsilon Cr}{1 - \varepsilon} = \frac{T_{ce} - T_{fs}}{T_{cs} - T_{fe}}$$

$$1 - Cr = \frac{(T_{ce} - T_{cs}) - (T_{fs} - T_{fe})}{T_{ce} - T_{cs}}$$

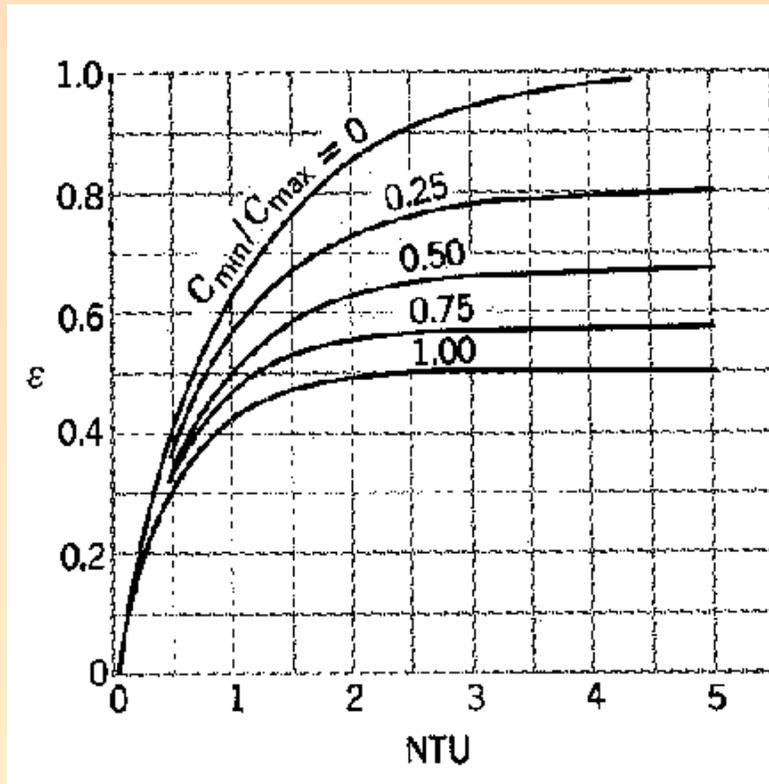
$$NTU = \frac{UA}{(mCp)_{\min}} = \frac{UA}{m_c C p_c}$$



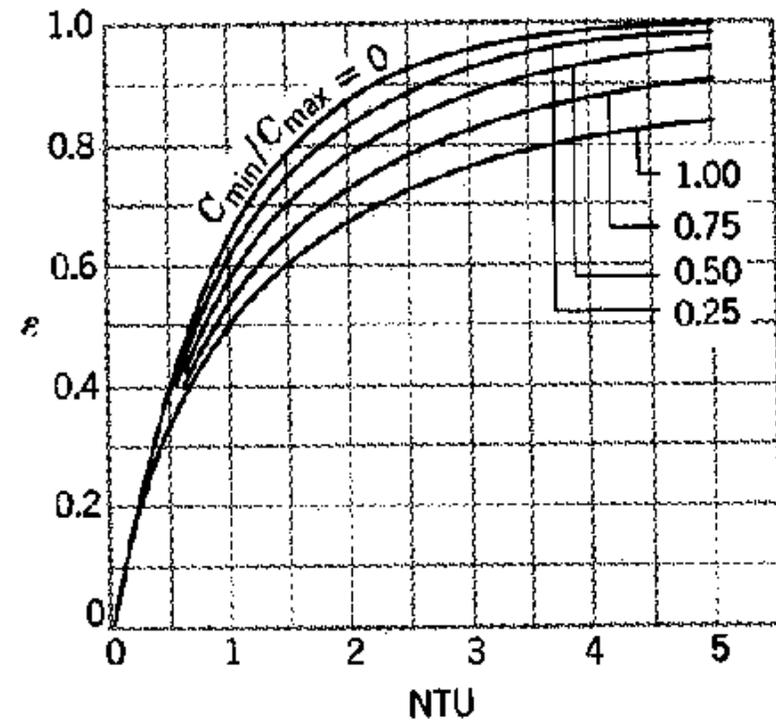
METODOLOGÍA DE LA EFICIENCIA

TEMA 4. INTERCAMBIADORES

1. Intercambiadores (2h)



Equicorriente

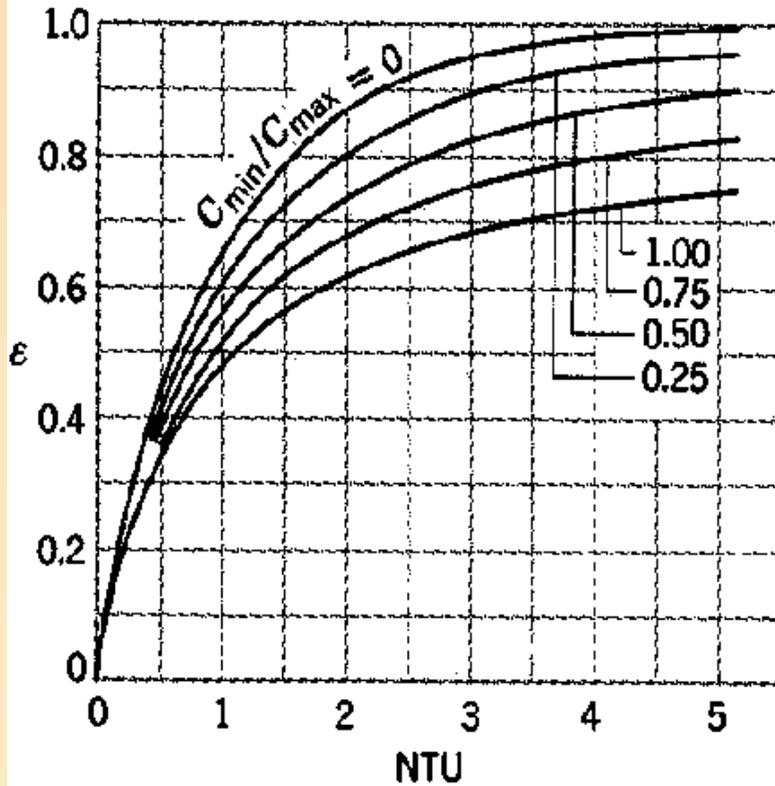


Contracorriente

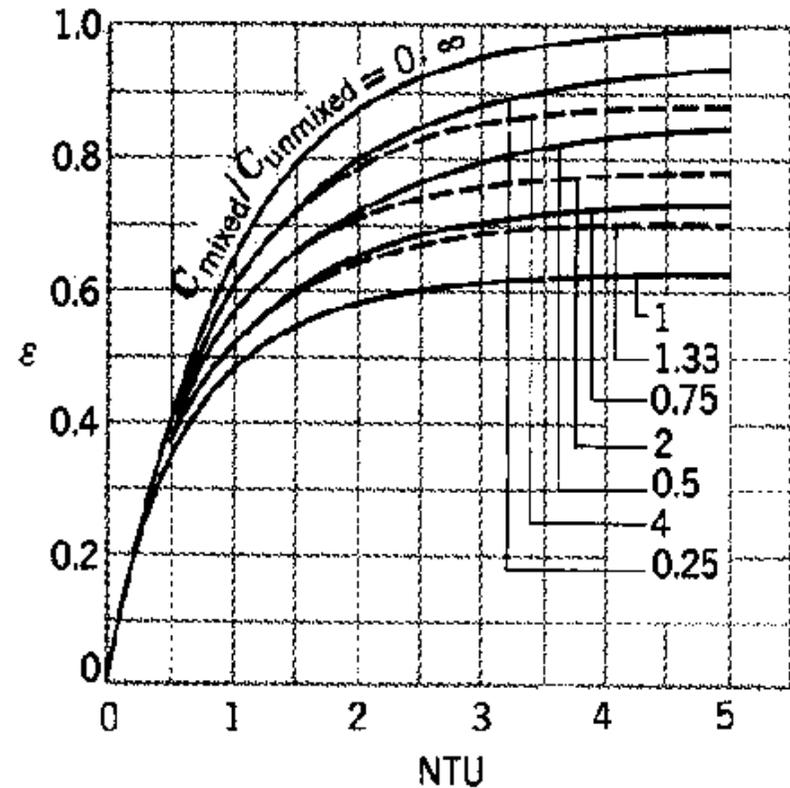
METODOLOGÍA DE LA EFICIENCIA

TEMA 4. INTERCAMBIADORES

1. Intercambiadores (2h)



*Flujo cruzado:
ambas corrientes sin mezclar*



*Flujo cruzado:
una corriente mezclada
y la otra sin mezclar*

METODOLOGÍA DE LA EFICIENCIA

TABLE 11.3 Heat Exchanger Effectiveness Relations [5]

Flow Arrangement	Relation
Concentric tube	
Parallel flow	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 + C_r)]}{1 + C_r} \quad (11.28a)$
Counterflow	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - C_r)]}{1 - C_r \exp[-NTU(1 - C_r)]} \quad (C_r < 1)$
	$\varepsilon = \frac{NTU}{1 + NTU} \quad (C_r = 1) \quad (11.29a)$
Shell-and-tube	
One shell pass (2, 4, . . . tube passes)	$\varepsilon_1 = 2 \left\{ 1 + C_r + (1 + C_r^2)^{1/2} \times \frac{1 + \exp[-(NTU)_1(1 + C_r^2)^{1/2}]}{1 - \exp[-(NTU)_1(1 + C_r^2)^{1/2}]} \right\}^{-1} \quad (11.30a)$
<i>n</i> Shell passes (2 <i>n</i> , 4 <i>n</i> , . . . tube passes)	$\varepsilon = \left[\left(\frac{1 - \varepsilon_1 C_r}{1 - \varepsilon_1} \right)^n - 1 \right] \left[\left(\frac{1 - \varepsilon_1 C_r}{1 - \varepsilon_1} \right)^n - C_r \right]^{-1} \quad (11.31a)$
Cross-flow (single pass)	
Both fluids unmixed	$\varepsilon = 1 - \exp \left[\left(\frac{1}{C_r} \right) (NTU)^{0.22} \{ \exp[-C_r(NTU)^{0.78}] - 1 \} \right] \quad (11.32)$
C_{\max} (mixed), C_{\min} (unmixed)	$\varepsilon = \left(\frac{1}{C_r} \right) (1 - \exp \{ -C_r [1 - \exp(-NTU)] \}) \quad (11.33a)$
C_{\min} (mixed), C_{\max} (unmixed)	$\varepsilon = 1 - \exp(-C_r^{-1} \{ 1 - \exp[-C_r(NTU)] \}) \quad (11.34a)$
All exchangers ($C_r = 0$)	$\varepsilon = 1 - \exp(-NTU) \quad (11.35a)$

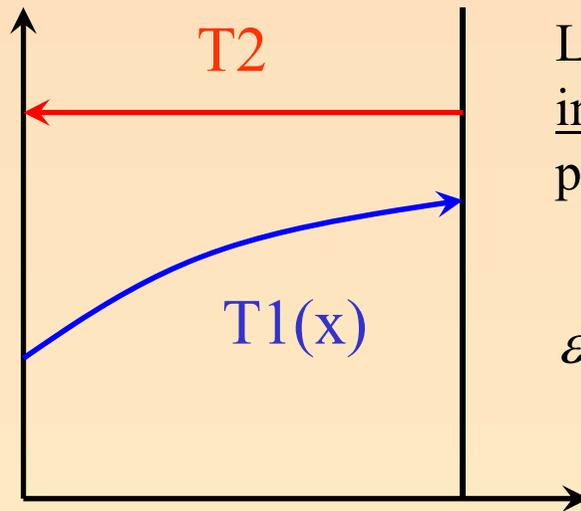
METODOLOGÍA DE LA EFICIENCIA

TABLE 11.4 Heat Exchanger NTU Relations

Flow Arrangement	Relation
Concentric tube	
Parallel flow	$NTU = -\frac{\ln [1 - \varepsilon(1 + C_r)]}{1 + C_r}$ (11.28b)
Counterflow	$NTU = \frac{1}{C_r - 1} \ln\left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon C_r - 1}\right)$ ($C_r < 1$)
	$NTU = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}$ ($C_r = 1$) (11.29b)
Shell-and-tube	
One shell pass (2, 4, . . . tube passes)	$(NTU)_1 = -(1 + C_r^2)^{-1/2} \ln\left(\frac{E - 1}{E + 1}\right)$ (11.30b)
	$E = \frac{2/\varepsilon_1 - (1 + C_r)}{(1 + C_r^2)^{1/2}}$ (11.30c)
n Shell passes ($2n, 4n, . . .$ tube passes)	Use Equations 11.30b and 11.30c with $\varepsilon_1 = \frac{F - 1}{F - C_r}$ $F = \left(\frac{\varepsilon C_r - 1}{\varepsilon - 1}\right)^{1/n}$ $NTU = n(NTU)_1$ (11.31b, c, d)
Cross-flow (single pass)	
C_{\max} (mixed), C_{\min} (unmixed)	$NTU = -\ln\left[1 + \left(\frac{1}{C_r}\right) \ln(1 - \varepsilon C_r)\right]$ (11.33b)
C_{\min} (mixed), C_{\max} (unmixed)	$NTU = -\left(\frac{1}{C_r}\right) \ln[C_r \ln(1 - \varepsilon) + 1]$ (11.34b)
All exchangers ($C_r = 0$)	$NTU = -\ln(1 - \varepsilon)$ (11.35b) ²⁷

METODOLOGÍA DE LA EFICIENCIA. CASO PARTICULAR

Para cualquier tipo de intercambiado cuando uno de los flujos se mantiene a temperatura constante (cambio de fase), o el producto mC_p de una corriente es mucho mayor que la otra.



La distribución de temperaturas es la misma independientemente del tipo de intercambiador, por lo tanto existe una única relación

$$\varepsilon = f(C_r, NTU) \Rightarrow NTU = f(C_r, \varepsilon)$$

En este caso se cumplirá

$$(mC_p)_{\max} \gg (mC_p)_{\min}$$

$$Cr = \frac{(mC_p)_{\min}}{(mC_p)_{\max}} \approx 0$$

Y aplicándolo al intercambiador a contracorriente

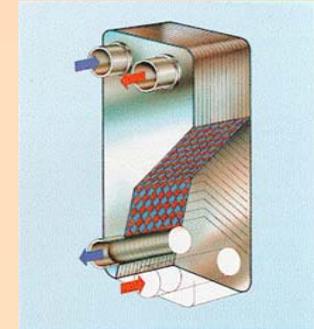
$$\varepsilon = \frac{1 - e^{-NTU(1-Cr)}}{1 - Cr e^{-NTU(1-Cr)}} = 1 - e^{-NTU}$$

Relación válida para cualquier tipo de intercambiador cuando una de las corrientes cambia de fase

METODOS. RESUMEN

Calor intercambiado

$$q_{real} = m_c Cp_c (T_{ce} - T_{cs}) = m_f Cp_f (T_{fs} - T_{fe})$$



Variables

$(mCp)_c$	T_{ce}	T_{cs}
$(mCp)_f$	T_{fe}	T_{fs}
	UA	

Método del DMTL

F=f(tipo intercambiador, salto temperaturas) para equicorriente y contracorriente F=1

$$q_{real} = UA F DMTL_{contracorriente}$$

Método iterativo

Método de la eficiencia

$$NTU = \frac{UA}{(mCp)_{min}} \quad Cr = \frac{(mCp)_{min}}{(mCp)_{max}}$$

$$\varepsilon = f(\text{tipo intercambiador}, NTU, Cr)$$

$$q_{real} = \varepsilon q_{max} = \varepsilon (mCp)_{min} (T_{ce} - T_{fe})$$

Método no iterativo