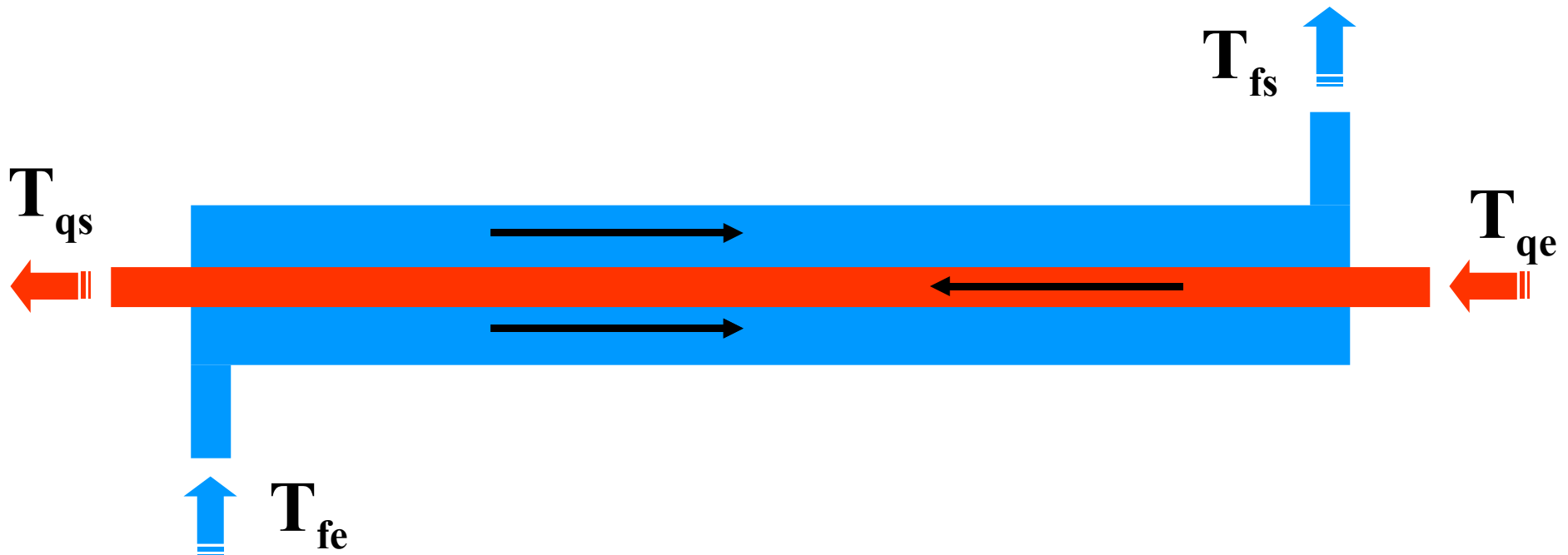


Trocadores de Calor

O Que são Trocadores de Calor?

São equipamentos que fazem a transferência de energia de uma corrente quente de fluido para uma corrente fria, permitindo ou não que os fluidos entrem em contato.



Trocadores de Calor

TÓPICOS:

- **Classificação & Tipos de Trocadores de Calor**
- **O Coeficiente Global de Transferência de Calor ‘U’**
- **Balanco de Energia em Um Trocador de Calor**
- **Configurações em Correntes Paralelas e Contra-Corrente**
- **Método da Efetividade**

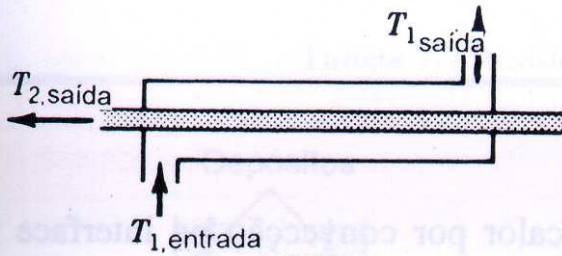
Trocadores de Calor

Classificação baseada na aplicação:

- (3) Sem mudança de fase dos fluidos: líquido-líquido, gás-líquido e gás-gás.
- (2) Com mudança de fase: vapor/líquido-líquido, vapor/líquido-gás e líquido/vapor-gás. Também conhecidos como condensadores e evaporadores.

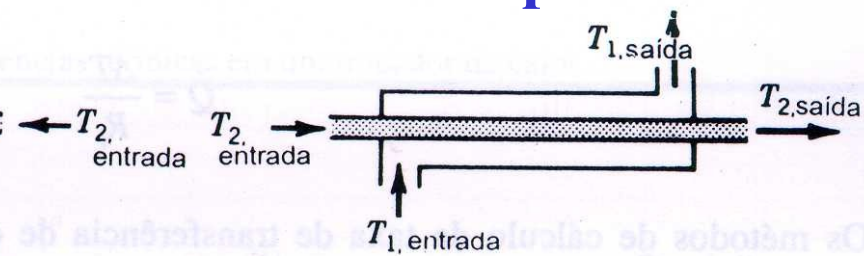
Classificação Baseada na Configuração do Escoamento

contra-corrente



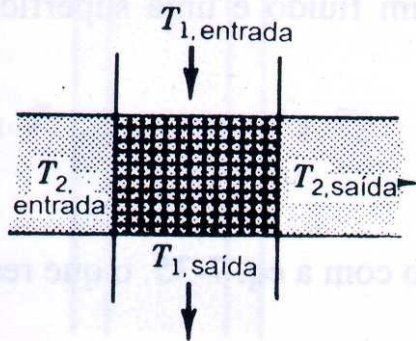
(a)

correntes paralelas



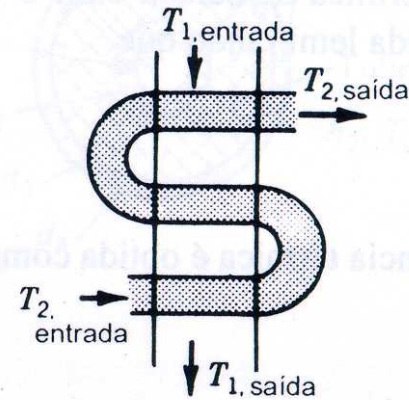
(b)

correntes cruzadas

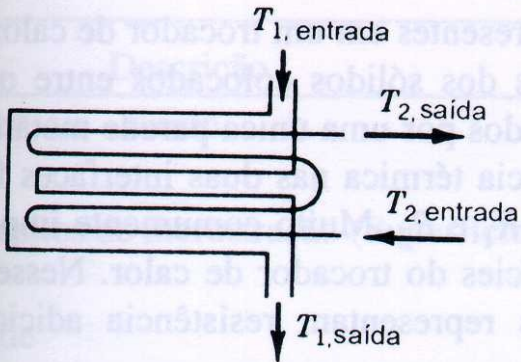


(c)

contra-corrente cruzada



(d)



(e)

**Casco e tubo
múltiplos passes**

Trocador de Calor Casco e Tubo (líquido-líquido; vapor/líquido-líquido)

condensadores de vapor

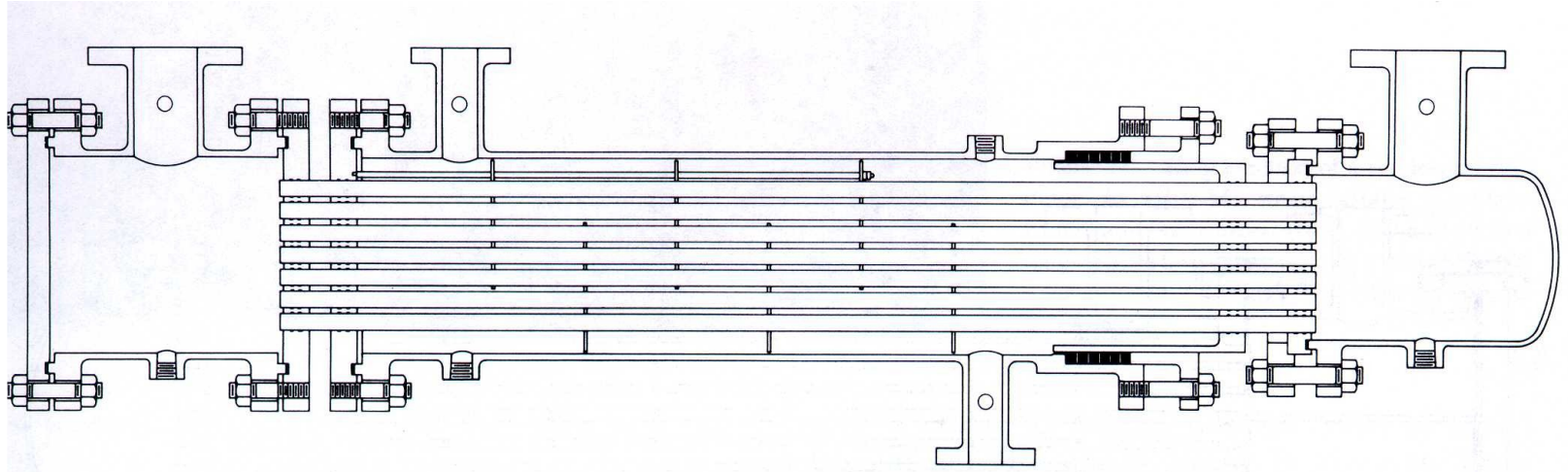


Figure 1.12 Single-pass tube, baffled single-pass shell heat exchanger with a packed joint floating head and double header sheets to assure that no fluid from one circuit leaks into the other. (Courtesy The Patterson-Kelley Co.)

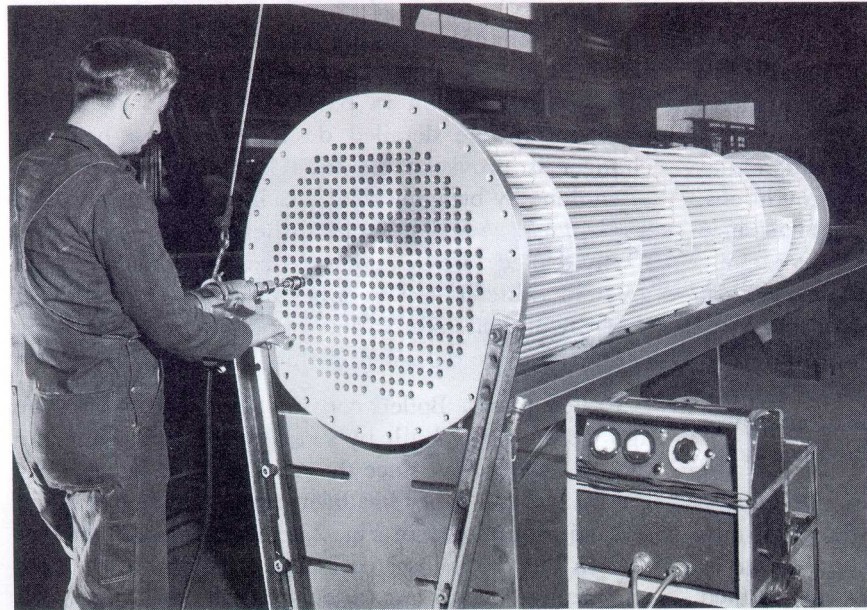


Figure 2.2 Photo showing tubes being rolled into the header sheet of a shell-and-tube heat exchanger. (Courtesy Patterson-Kelley Co.)

Trocador de Calor Casco e Tubo (líquido-líquido; vapor/líquido-líquido)

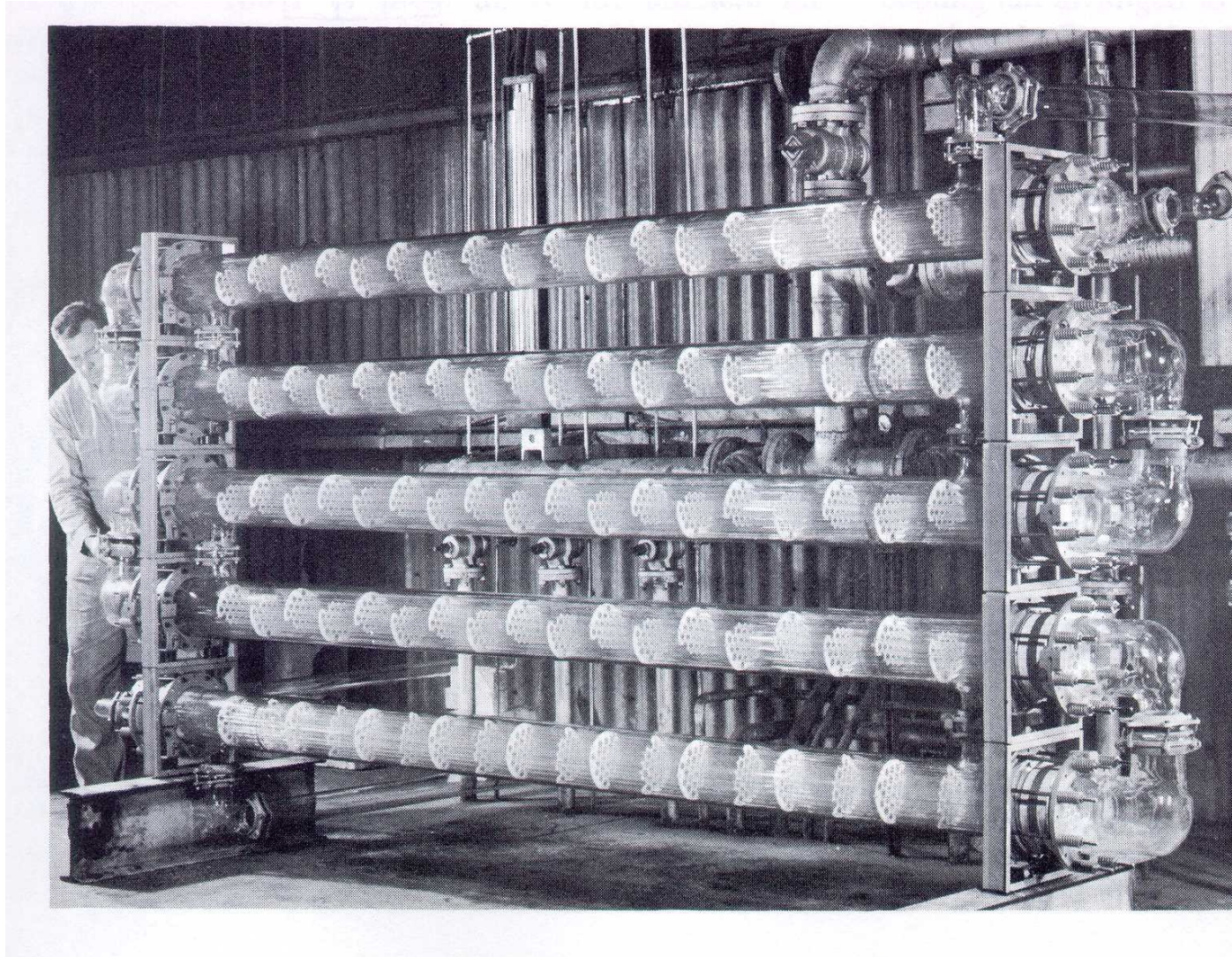


Figure 1.13 A five-bank, shell-and-tube heat exchanger made of Pyrex glass for chemical processes. (Courtesy Corning Glass Works.)

Trocador de Calor Aletado (Compacto) (líquido-gás; vapor/líquido-gás) evaporador ciclo de refrigeração

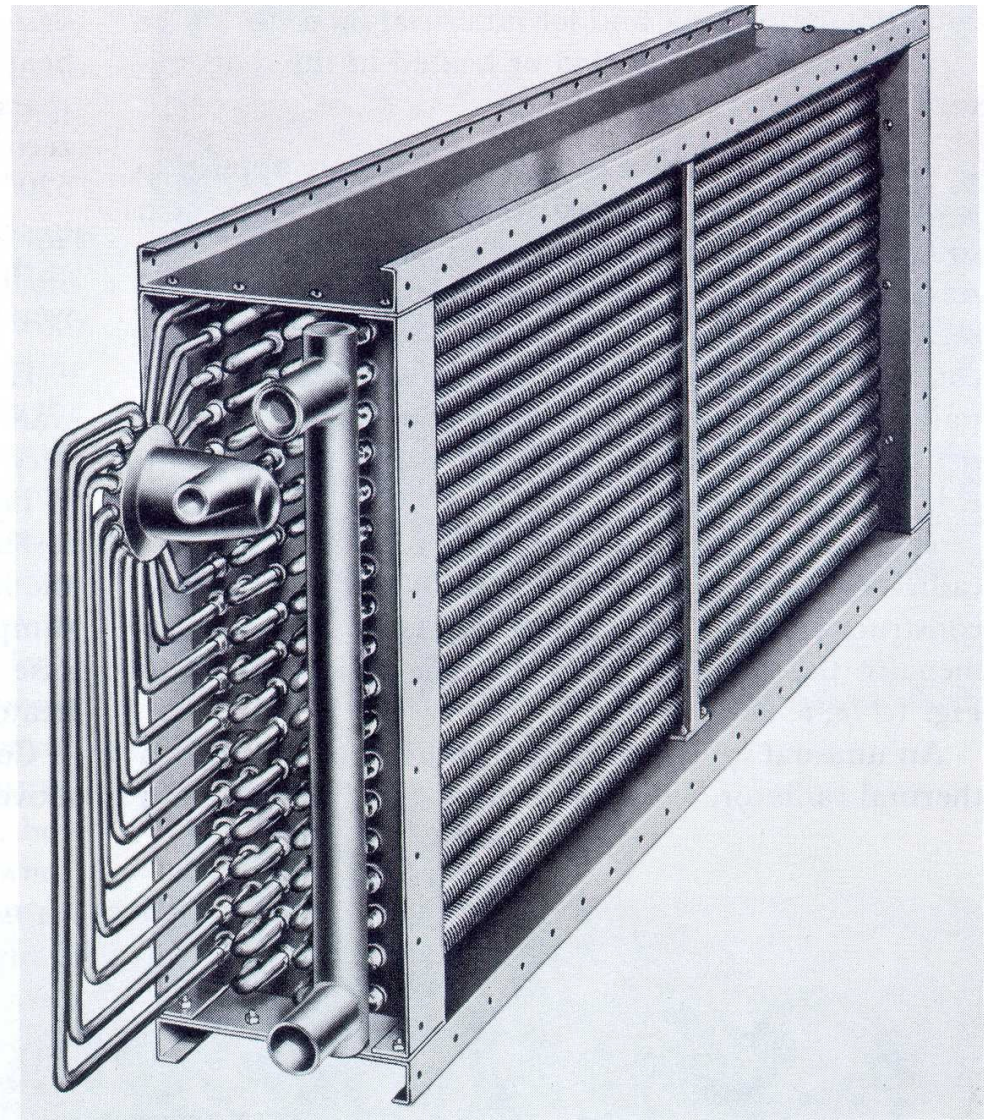
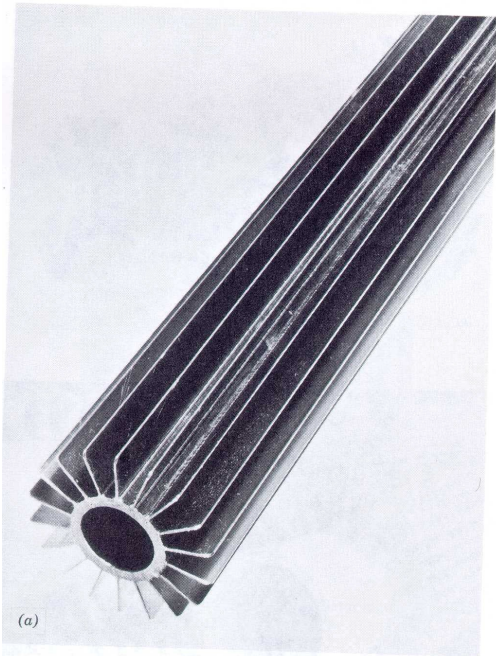
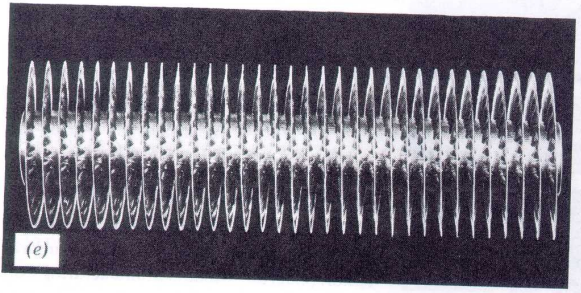


Figure 1.14 Finned tube bank for a large air-conditioning system. (Courtesy Aerofin Corp.)

Trocador de Calor Aletado (Compacto) (líquido-gás) - motores de combustão -

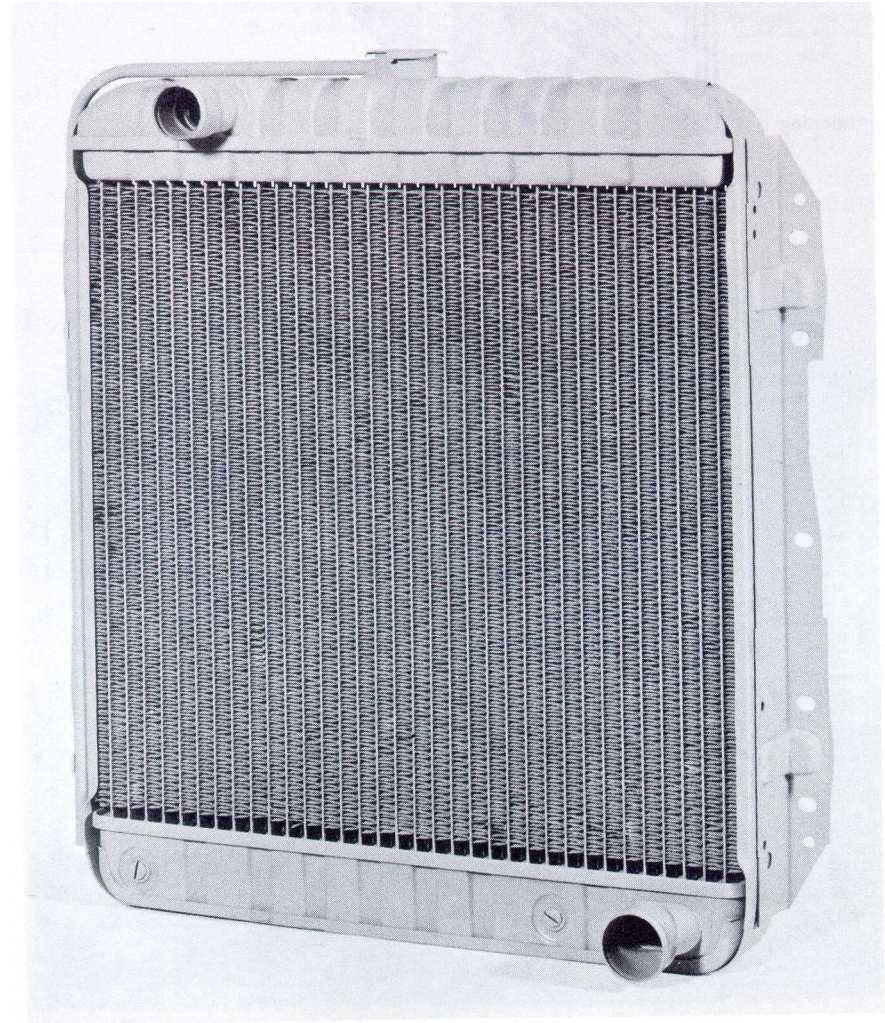
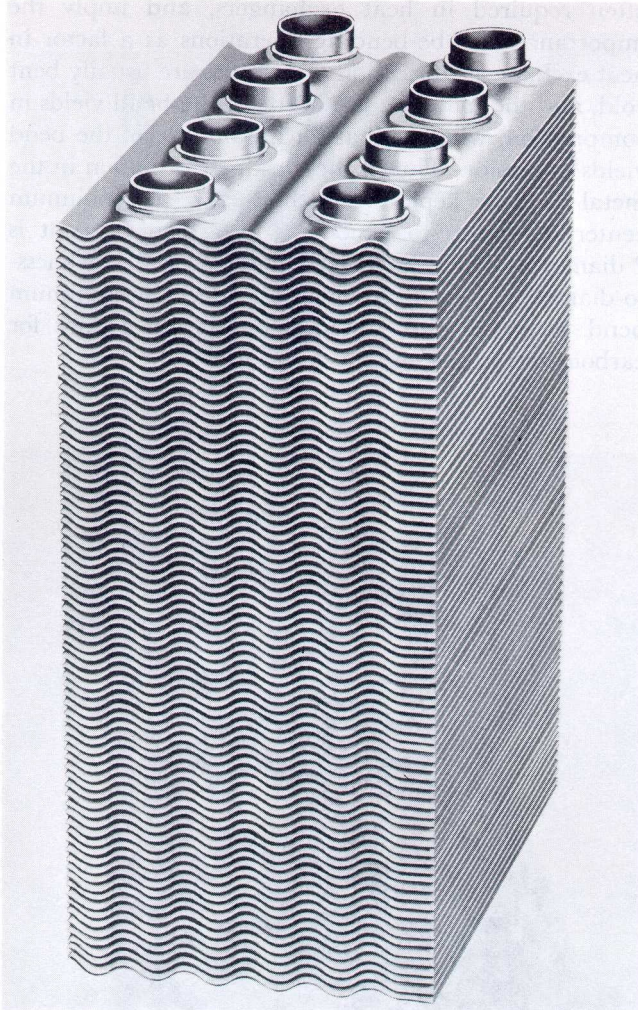
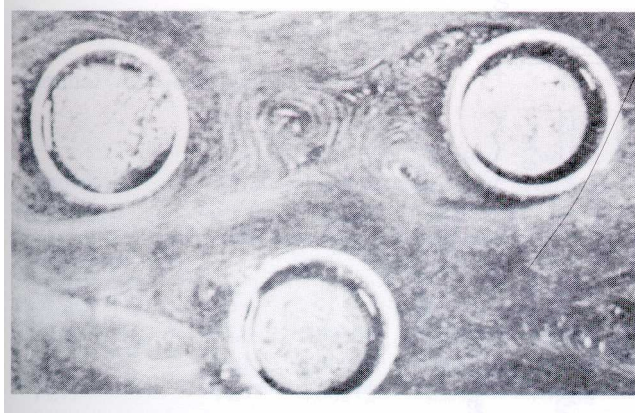
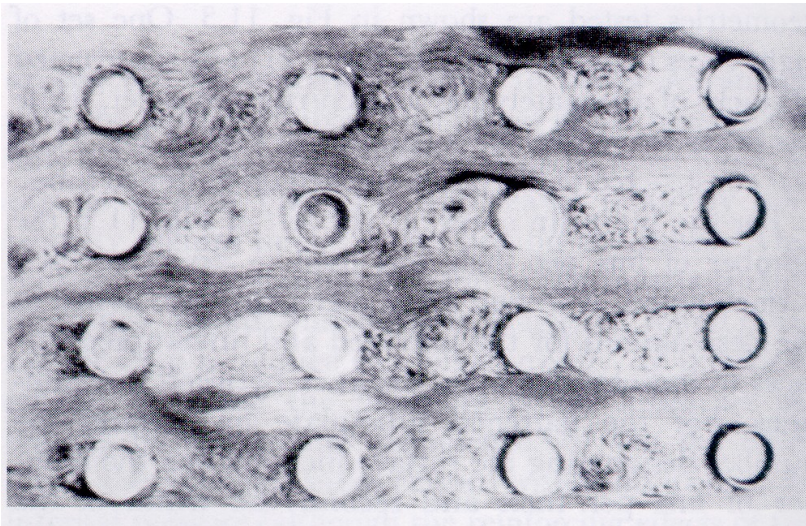


Figure 2.11 Element of a corrugated plate-fin, round-tube Freon evaporator made of aluminum for an air-conditioning system. (Courtesy The Trane Co.)



Padrão de escoamento para arranjo de tubos deslocados: maior troca de calor e maior perda de carga



Padrão de escoamento para arranjo de tubos em série: menor troca de calor e menor perda de carga

**Regenerador
rotativo para pré-
aquecer ar de
combustão em
uma central
termoelétrica
movida a carvão.**

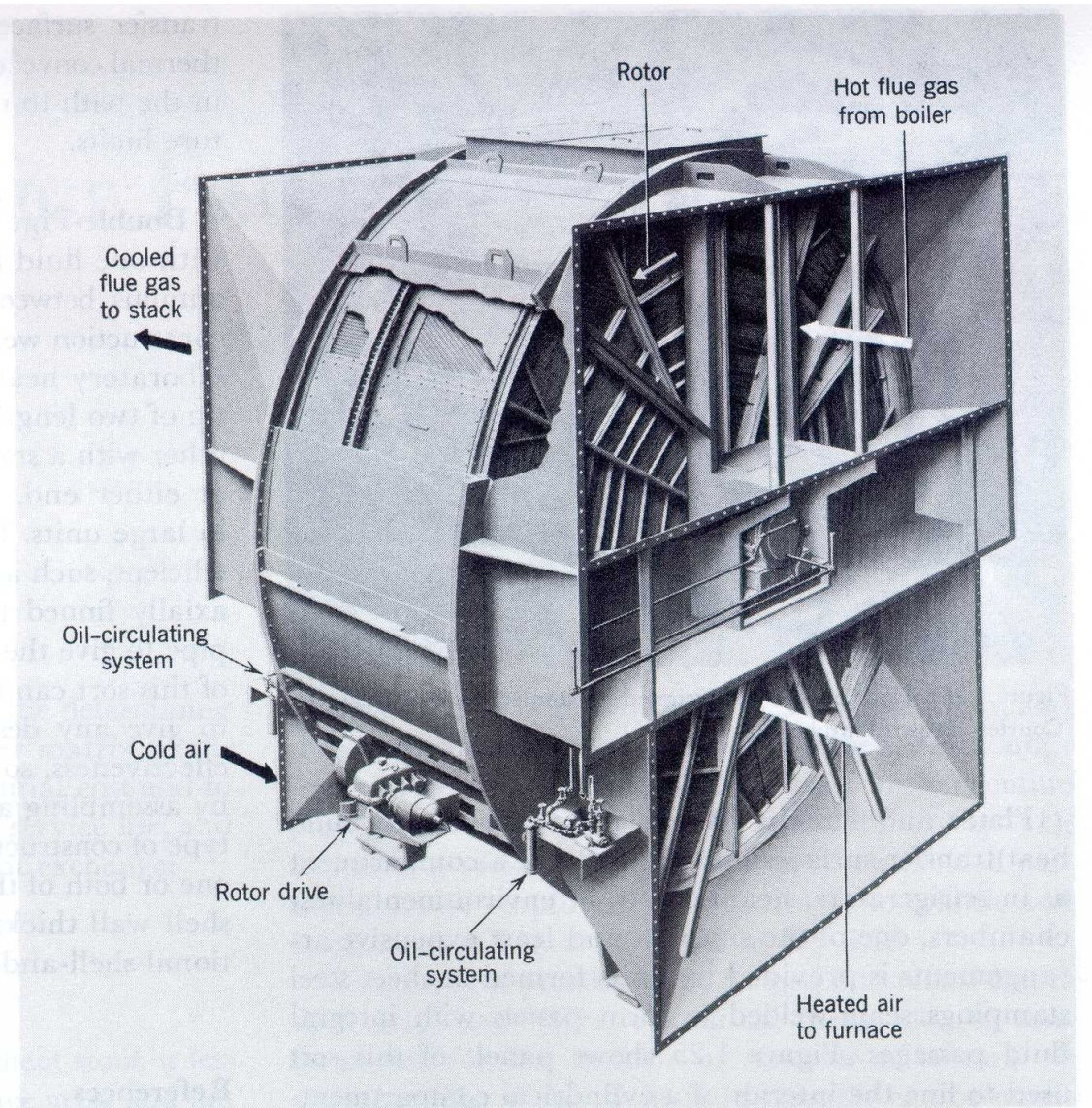
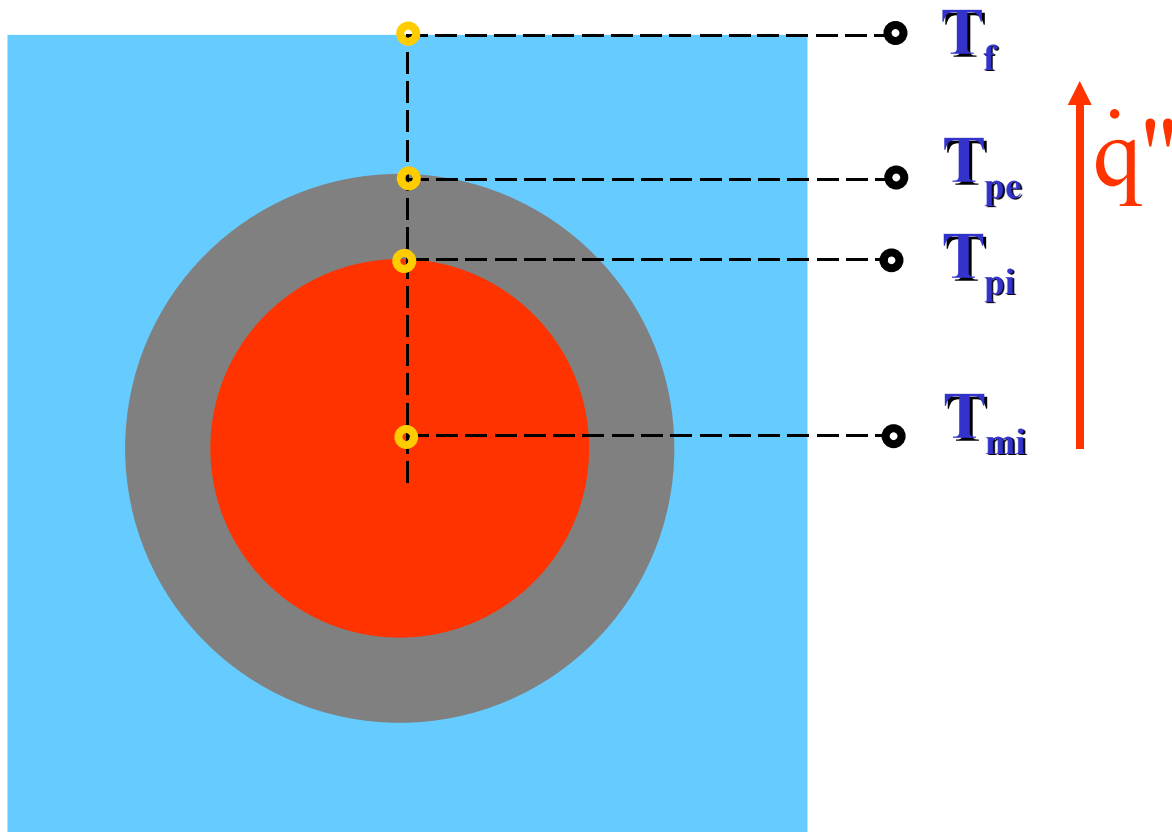


Figure 1.24 A rotary regenerator for preheating the air in a large coal-fired steam power plant. (Courtesy Air Preheater Corp.)

Troca de Calor Interna e Externa ao Tubo

- A transferência de calor do escoamento interno a um duto para o externo a um duto é uma aplicação freqüente em trocadores de calor.



Considere:

$$T_{mi} > T_{pi} > T_{pe} > T_f$$

de maneira que o fluido quente (interno) transfere calor para o fluido frio (externo)

Fluxo Calor Interno/Externo

Note que há três mecanismos de transferência de calor:

- do fluido interno até a parede interna por convecção térmica interna (Q_i);
- da parede interna a parede externa por condução térmica (Q_k);
- da parede externa ao fluido externo por convecção térmica externa (Q_e).

Fluxo Calor Interno/Externo

Como não há variação de temperatura com o tempo, regime permanente, então:

- o calor transferido do tubo interno para a parede é o mesmo;
- do calor da parede interna para a externa e que por sua vez ;
- é igual ao transferido da parede externa para o fluido;

$$Q = Q_i = Q_k = Q_e$$

Fluxo Calor Interno/Externo

Como calcular os fluxos de calor:

$$Q = Q_i = A_i \overline{h}_i (T_{m,i} - T_{p,i})$$

$$Q = Q_k = \frac{A_p}{\Delta x} k (T_{p,i} - T_{p,e})$$

$$Q = Q_e = A_e \overline{h}_e (T_{p,e} - T_f)$$

Onde A_i e A_e representam as áreas interna e externas do tubo ($\pi d_i L$ e $\pi d_e L$ [m^2]) e $A_p/\Delta x$ é a área média do tubo dividida pela dist. entre paredes.

Fluxo Calor Interno/Externo

É freqüente a necessidade de se determinar Q , em função apenas de $T_{m,i}$ e T_f :

$$\begin{aligned} Q_i / A_i \bar{h}_i &= (T_{m,i} - T_{p,i}) \\ + \quad Q_k \Delta x / \overline{A_p k} &= (T_{p,i} - T_{p,e}) \\ Q_e / A_e \bar{h}_e &= (T_{p,e} - T_f) \end{aligned}$$

$$Q \cdot \left[\frac{1}{A_i \bar{h}_i} + \frac{\Delta x}{\overline{A_p k}} + \frac{1}{A_e \bar{h}_e} \right] = (T_{m,i} - T_f)$$

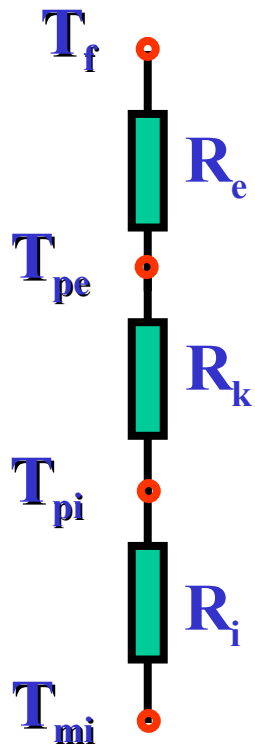
Taxa Calor Interno/Externo (J/s) ou (W)

A taxa de calor que sai do fluido quente e chega ao fluido frio é então determinado por:

$$Q = \frac{(T_{m,i} - T_f)}{\left[\frac{1}{A_i h_i} + \frac{\Delta x}{A_p k} + \frac{1}{A_e h_e} \right]}$$

Analogia Calor/Eletricidade

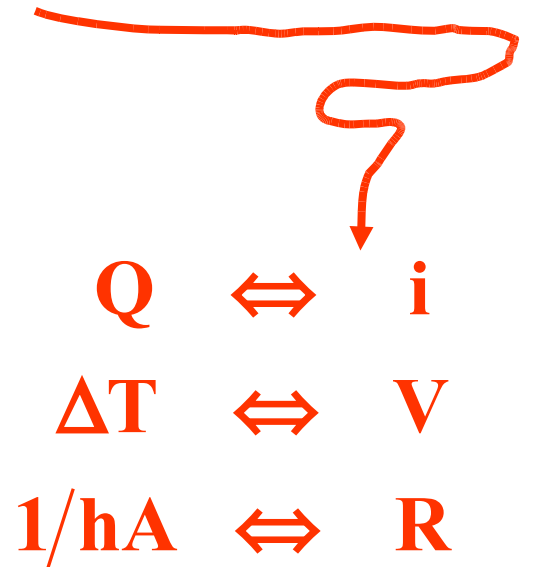
Pode-se estabelecer uma analogia direta entre o caminho que o calor percorre com um circuito elétrico (lei de ohm: $V = Ri$)



$$Q = \frac{(T_{p,e} - T_f)}{1/A_e h_e} = \frac{(T_{p,e} - T_f)}{R_e}$$

$$Q = \frac{(T_{p,i} - T_{p,e})}{\Delta x / A_p k} = \frac{(T_{p,i} - T_{p,e})}{R_k}$$

$$Q = \frac{(T_{m,e} - T_{p,i})}{1/A_i h_i} = \frac{(T_{m,e} - T_{p,i})}{R_i}$$

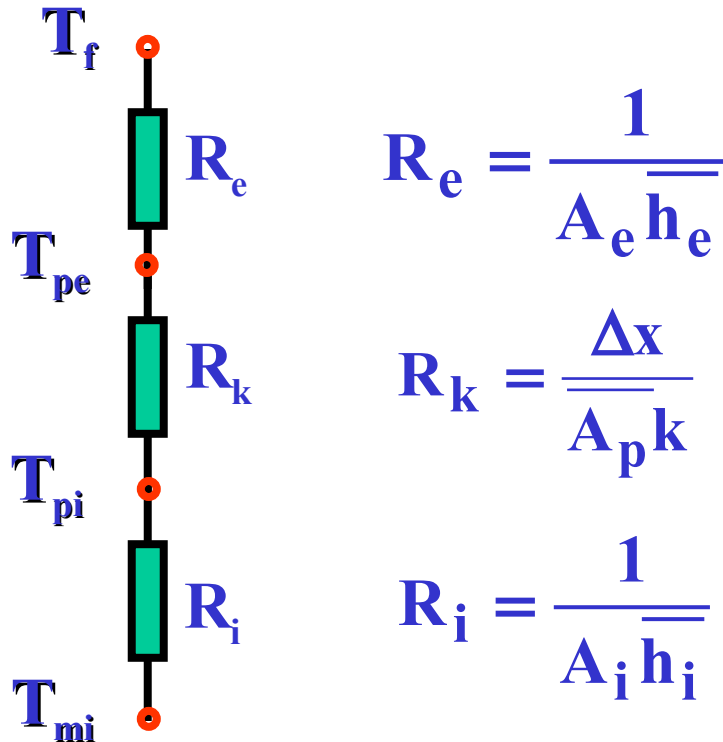


Analogia Calor/Eletricidade

Utilizando-se a analogia calor/eletricidade:

A taxa de calor total transferido é $Q = (T_{m,i} - T_f) / R_{eq}$

onde a resistência equivalente é a soma das resistências: interna, parede e externa, $R_{eq} = R_i + R_k + R_e$.



- *Quanto menor for a resistência térmica maior é o fluxo de calor para a mesma diferença de temperatura!*
- *Quanto maior for a área de troca de calor, ou h ou k menor será a resistência térmica equivalente!*

Nota Sobre Resistência de Condução

No capítulo 8 será visto com mais detalhes transferência de calor por condução térmica.

No momento, a resistência térmica devido a condução para um tubo é:

$$R_k = \frac{\ln(d_{\text{ext}}/d_{\text{int}})}{2\pi kL}$$

onde L é o comprimento do tubo e d_{ext} e d_{int} são os diâmetros externo e interno

A resistência térmica devido a condução para uma placa de espessura Δx é:

$$R_k = \frac{\Delta x}{A_{\text{placa}} k}$$

onde Δx é a espessura da placa e A é a área transversal da placa ao fluxo de calor

O Coeficiente Global de Transf. de Calor – U -

A taxa de calor transferido depende da diferença de temperatura entre o fluido interno e externo e da resistência equivalente do circuito térmico,

$$Q = (T_{m,i} - T_f) / R_{eq}$$

O coeficiente global de transferência de calor é definido como sendo:

$$Q = (UA_i)(T_{m,i} - T_f) \quad \text{onde} \quad UA_i = \frac{1}{R_i + R_k + R_e}$$

note que por meio de UA pode-se determinar a troca térmica utilizando a temperatura de mistura do tubo e a temperatura externa!

Para que serve o “U” ?

- Para projeto e dimensionamento de trocadores de calor
- Por meio dele, da diferença de temperatura entre fluidos e da área de troca de calor pode-se chegar ao calor transferido

$$Q = UA \Delta T$$

Análise Primeira Lei Trocadores de Calor

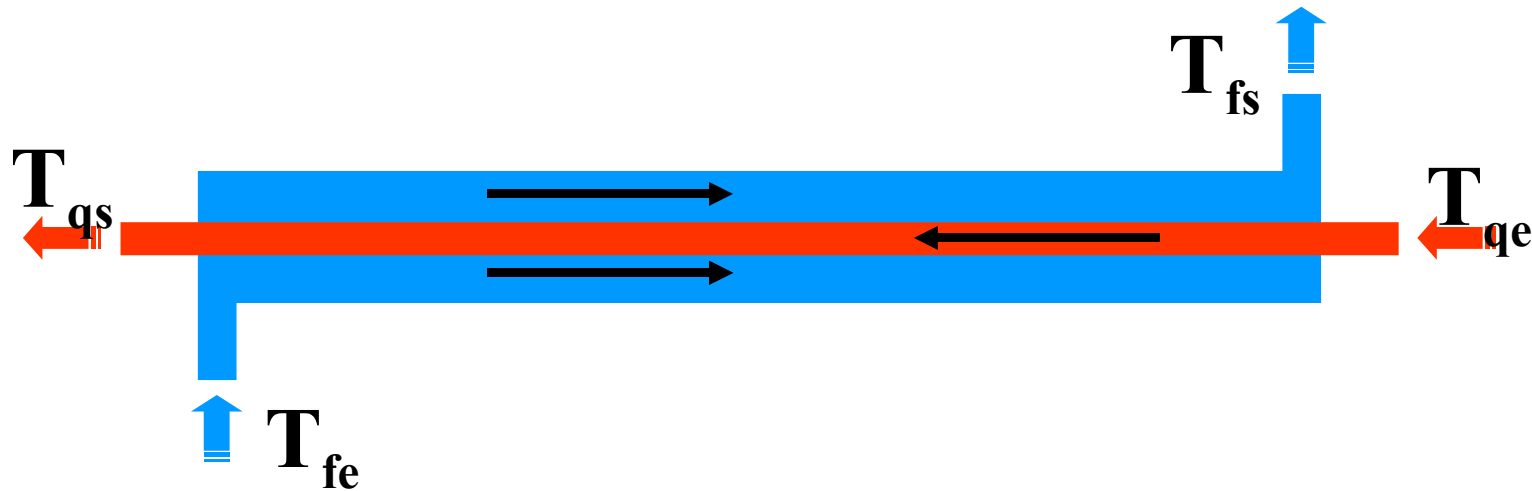
calor cedido fluido quente

=

calor recebido fluido frio;

$$Q_q = \dot{m}_q C_{p,q} (T_{q,e} - T_{q,s})$$

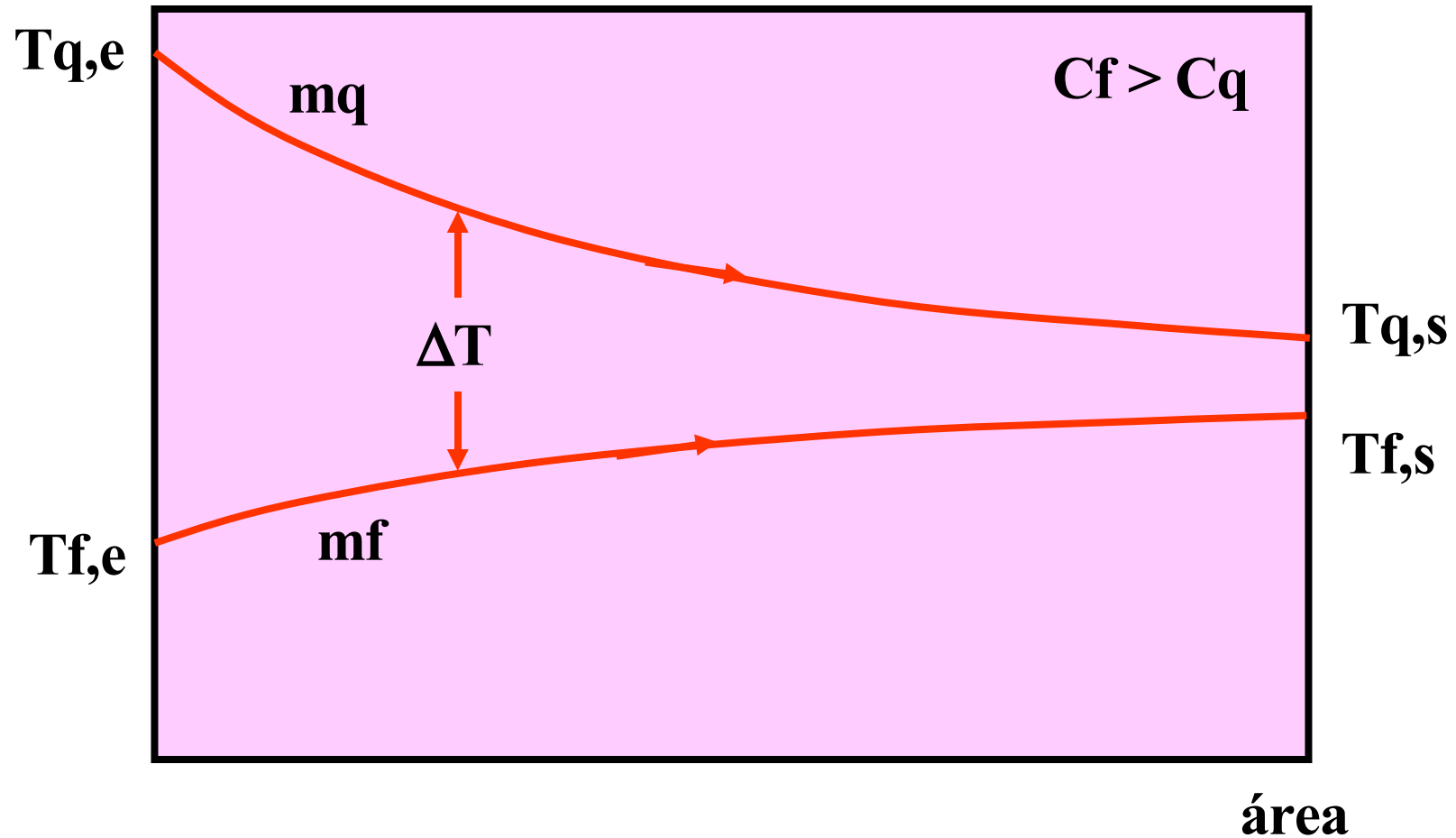
$$Q_f = \dot{m}_f C_{p,f} (T_{f,s} - T_{f,e})$$



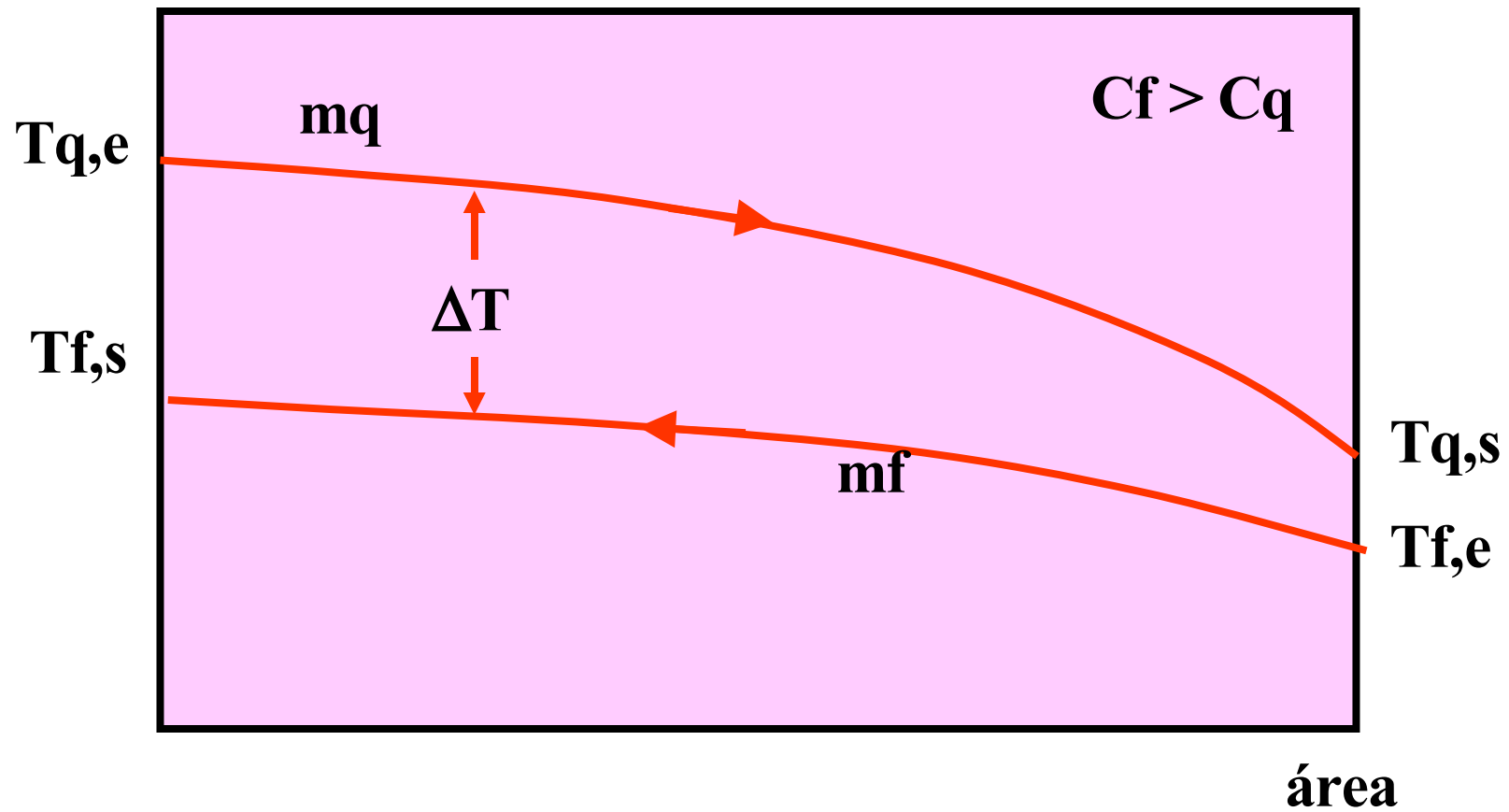
$$C_q (T_{q,e} - T_{q,s}) = C_f (T_{f,s} - T_{f,e})$$

C_q e C_f são as capacidades térmicas dos fluidos, $C = m \cdot C_p$

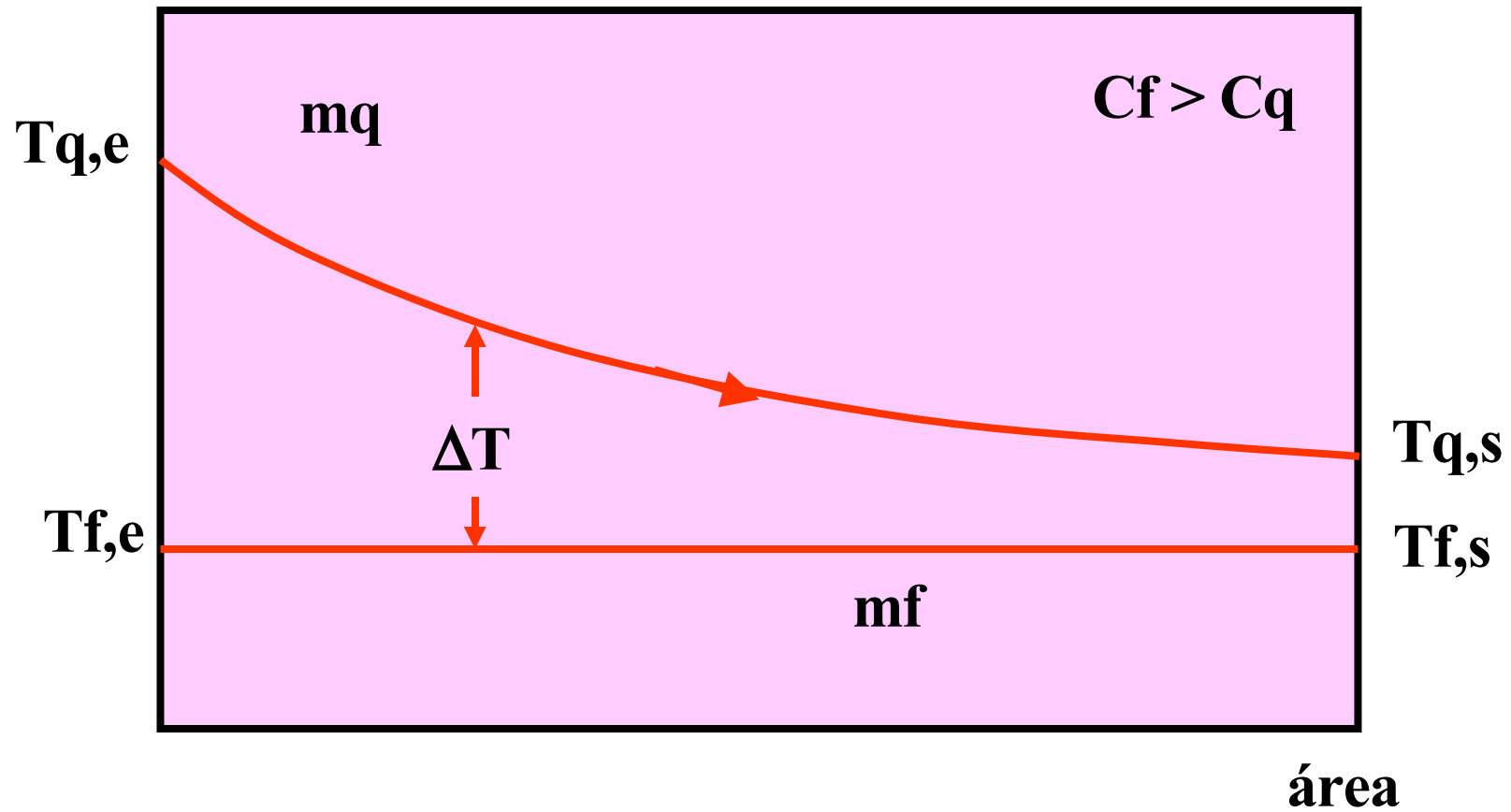
Distribuição Temperatura Correntes Paralelas



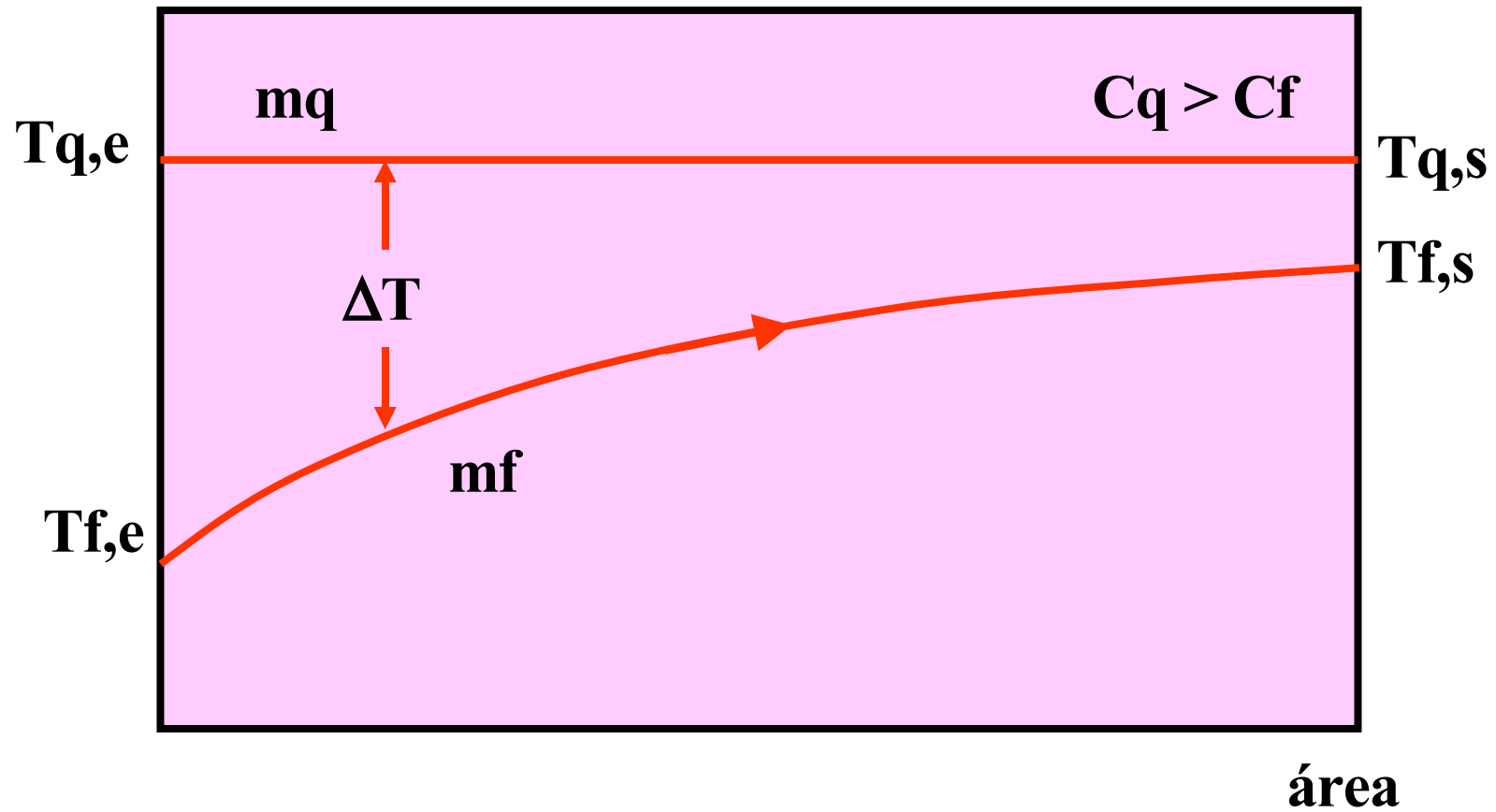
Distribuição Temperatura Contra-Correntes



Distribuição Temperatura Evaporador



Distribuição Temperatura Condensador



Método da Efetividade, ϵ x NUT

- **Em trocadores de calor freqüentemente se necessita da área de troca de calor ou das temperaturas de saída dos fluidos.**
- **Conhecendo-se as temperaturas de entrada os parâmetros mencionados são determinados pelo método da efetividade**

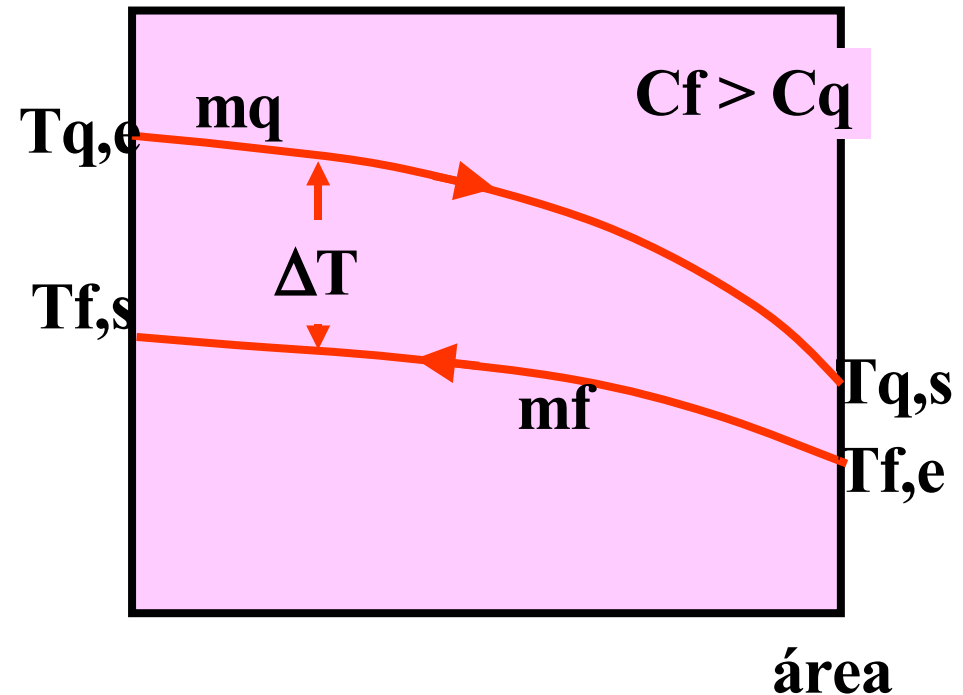
Método da Efetividade

- A efetividade de um trocador de calor é a razão entre o calor que ele troca pelo máximo calor que ele pode trocar:

$$\varepsilon = Q/Q_{\max}$$

- onde Q_{\max} é igual ao produto da menor capacidade térmica entre os dois fluidos pela máxima diferença de temperatura possível no trocador de calor

$$Q_{\max} = C_{\min} \cdot (T_{q,e} - T_{f,e})$$



Calor Utilizando Efetividade

- Com o conceito de efetividade pode-se expressar o calor trocado Q , como sendo:

$$Q = \varepsilon \cdot Q_{\max}$$

ou

$$Q = \varepsilon \cdot C_{\min} \cdot (T_{q,e} - T_{f,e})$$

Como Calcular a Efetividade, ε ?

A efetividade de um trocador é uma função:

- do Número de Unidades Térmicas,
 $NTU = UA/C_{min}$
- da razão entre Capacidades Térmicas,
 $C_r = C_{min}/C_{max}$
- da configuração do Trocador

$$\varepsilon = f(NTU, C_r, \text{geometria})$$

Efetividade de Trocadores x No. Unidades Térmicas (NUT)

Arranjo em Contra-Corrente

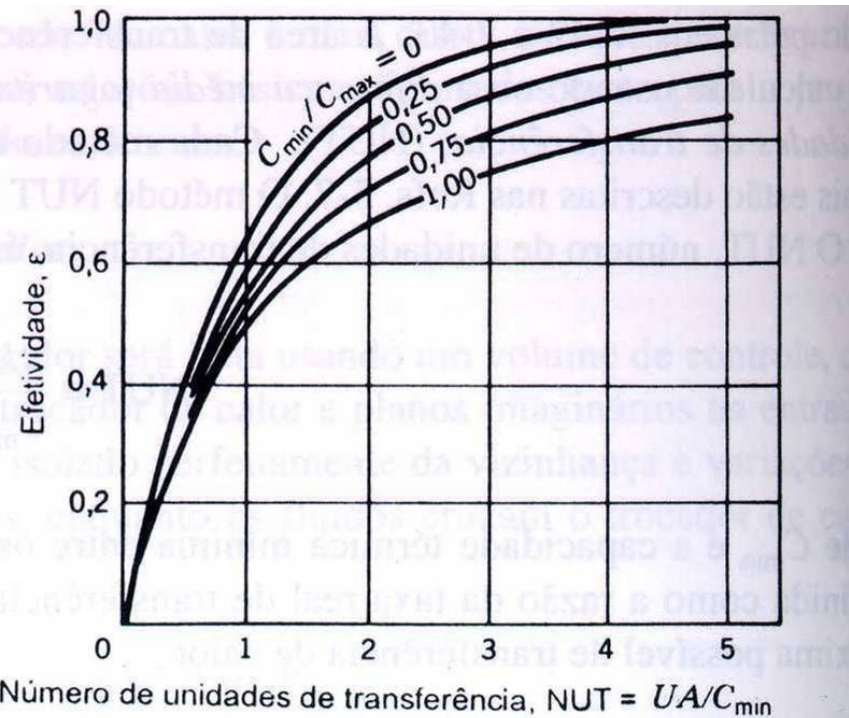
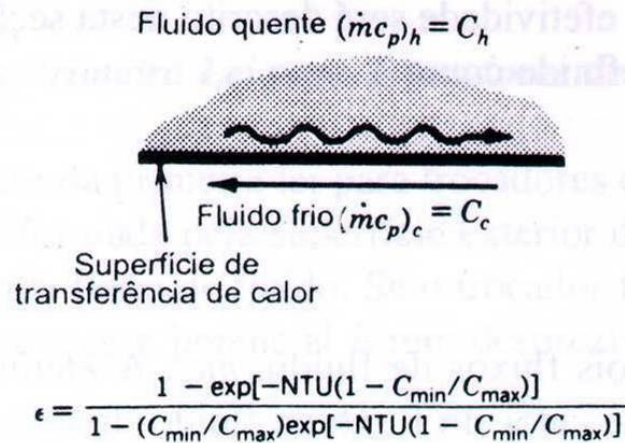
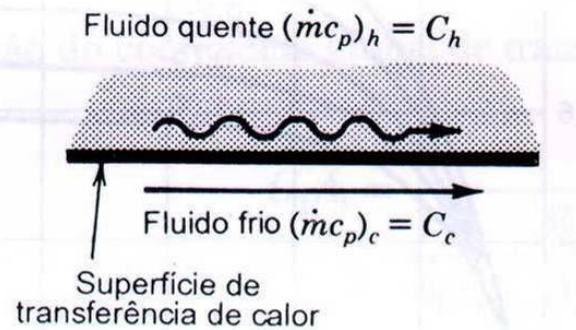


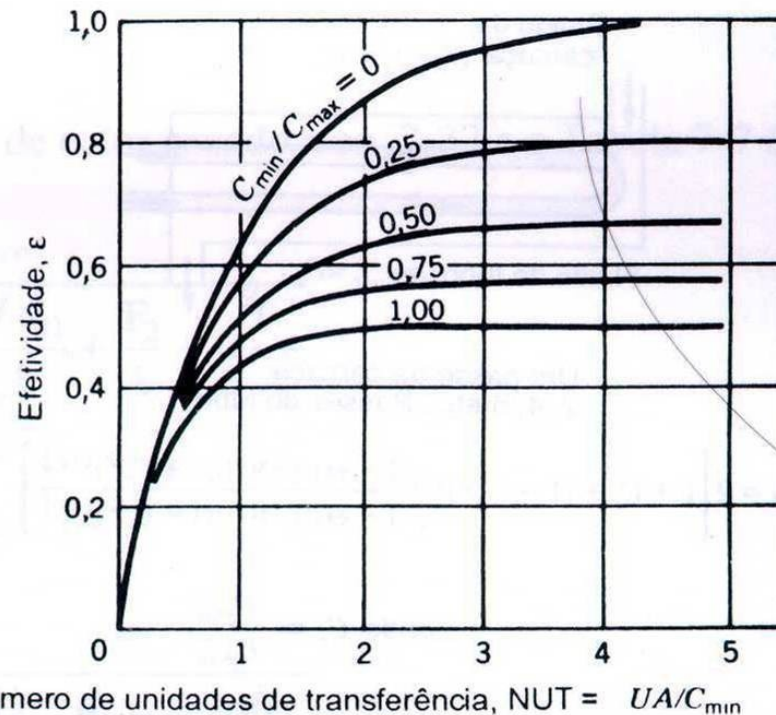
Figura 7-21 Trocador de calor de contracorrente.

Efetividade de Trocadores x No. Unidades Térmicas (NUT)

Arranjo em Corrente Paralela

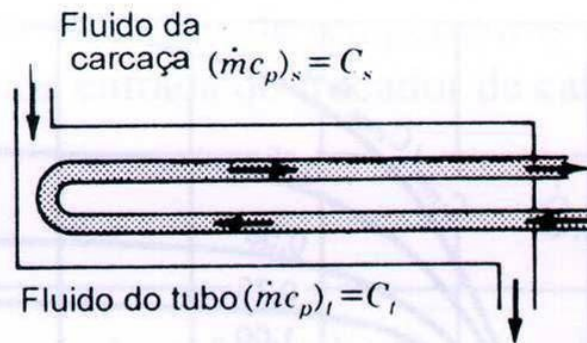


$$\epsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 + C_{\min}/C_{\max})]}{1 + C_{\min}/C_{\max}}$$



Efetividade de Trocadores x No. Unidades Térmicas (NUT)

Arranjo Casco e Tubo



Um passe da carcaça
2, 4, 6 etc., Passes do tubo

$$\epsilon = 2 \left[1 + C_r + (1 + C_r^2)^{1/2} \frac{1 + \exp[-NTU(1 + C_r^2)^{1/2}]}{1 - \exp[-NTU(1 + C_r^2)^{1/2}]} \right]^{-1}$$

onde $C_r \equiv \frac{C_{\min}}{C_{\max}}$

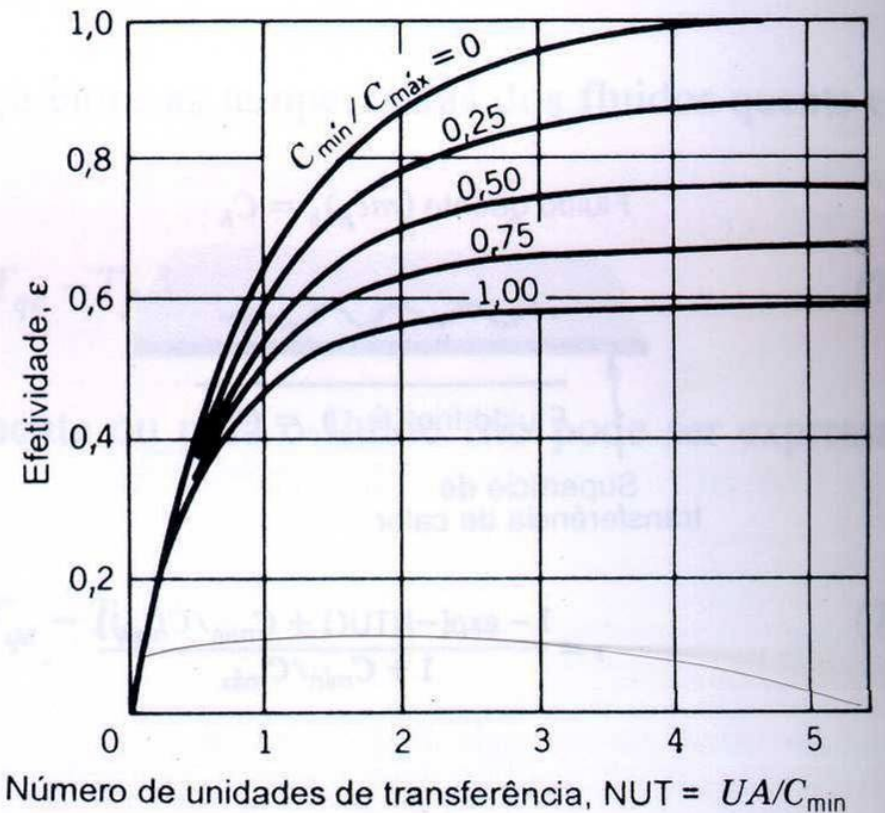


Figura 7-25 Trocador de calor de contracorrente - dois passes no tubo.

Ex 7.48 – Trocador de C.C. de fluidos não misturados

Determinar: As temperaturas de saída: $T_{q,s}$ e $T_{f,s}$

Dados:

$$\begin{array}{|l|l|l|} \hline T_{q,e} = 100^{\circ}\text{C} & T_{f,e} = 30^{\circ}\text{C} & U = 25 \text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C} \\ \hline \dot{m}_q = 3 \text{ kg/min} & \dot{V}_f = 5,66 \text{ m}^3/\text{min} & A = 10 \text{ m}^2 \\ \hline \end{array}$$

Atenção: Como não se conhece as temperaturas de saída do Ar, damos um chute. Propriedades à $T = 60^{\circ}\text{C}$

$$\rho = 1,06 \text{ kg/m}^3 ; C_p = 1008 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Da 1}^{\text{a}} \text{ Lei: } Q = C_f(T_{f,s} - T_{f,e}) = -C_q(T_{q,s} - T_{q,e})$$

$$\Rightarrow \text{Cálculo das capacidades térmicas: } C_q = \dot{m}_q C_p \Rightarrow C_q = \frac{(3).(1008)}{60} \Rightarrow C_q = 50,4 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$$

$$C_f = \rho \dot{V}_f C_p \Rightarrow C_f = \frac{(5,66).(1008)}{60} \Rightarrow C_f = 100,8 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$$

$$\Rightarrow \text{Cálculo do calor trocado: } Q = \varepsilon.C_{\text{MIN}}(T_{q,e} - T_{f,e})$$

$$\text{NUT} = \frac{U.A}{C_{\text{MIN}}} = \frac{(25).(10)}{50,4} = 4,96$$

$$\varepsilon = 1 - \exp\left[-\frac{(1 - \exp(-C_R \cdot \text{NUT}))}{C_R}\right], \text{ onde } C_R = \frac{C_{\text{MIN}}}{C_{\text{MAX}}} = 0,53 \Rightarrow \varepsilon = 0,826$$

$$Q = \varepsilon.C_{\text{MIN}}(T_{q,e} - T_{f,e}) \Rightarrow Q = (0,826).(50,4).(100 - 30) = 2914,3 \text{ W}$$

Ex 7.48 – Continuação...

$$Q = C_f(T_{f,s} - T_{f,e}) \Rightarrow T_{f,s} = \frac{Q}{C_f} + T_{f,e} = 58,9^\circ\text{C}$$

$$Q = -C_q(T_{q,s} - T_{q,e}) \Rightarrow T_{q,s} = -\frac{Q}{C_q} + T_{q,e} = 42,2^\circ\text{C}$$

Comentário: Como no início da resolução demos um chute no valor da Temperatura média de 60°C para obter as propriedades, faz-se necessário verificar se o chute está correto. Isso é feito da seguinte forma:

$$\text{Para o fluido quente: } \bar{T}_q = \frac{T_{q,e} + T_{q,s}}{2} = \frac{100 + 42,2}{2} \cong 71^\circ\text{C}$$

$$\text{Para o fluido frio: } \bar{T}_f = \frac{T_{f,e} + T_{f,s}}{2} = \frac{30 + 58,9}{2} \cong 44,5^\circ\text{C}$$

Note que, para uma solução exata, devemos recalculas as temperaturas de saída com base nas temperaturas média determinadas acima. Isso implica que o C_p do fluido quente será diferente do C_p fluido frio, mas o resultado final não será fortemente afetado devido a pequena variação do C_p por Temp. para o fluido aqui utilizado e nessas condições. Esse processo deverá ser repetido até que não haja mais diferença entre a Temp. média utilizada para recalculas e Temp. média obtida no final de cada resultado.