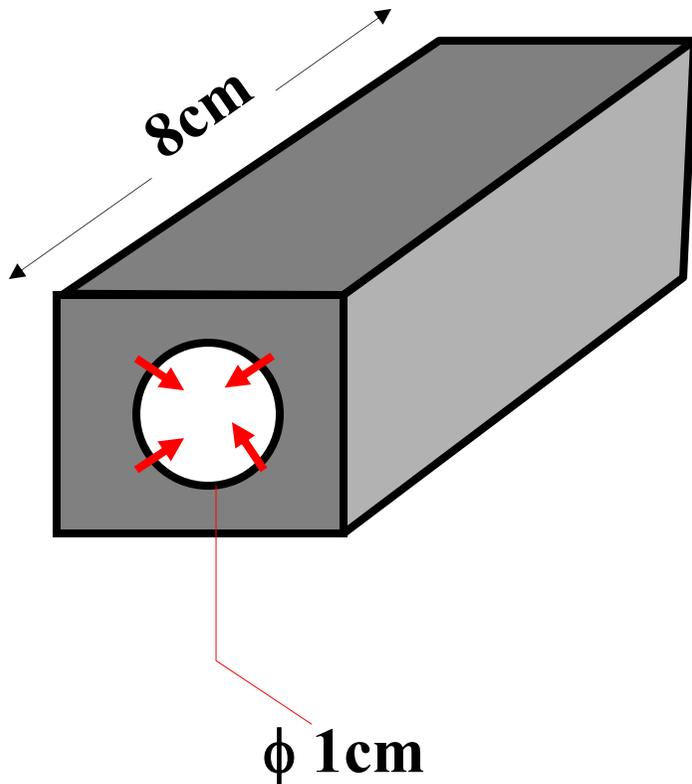
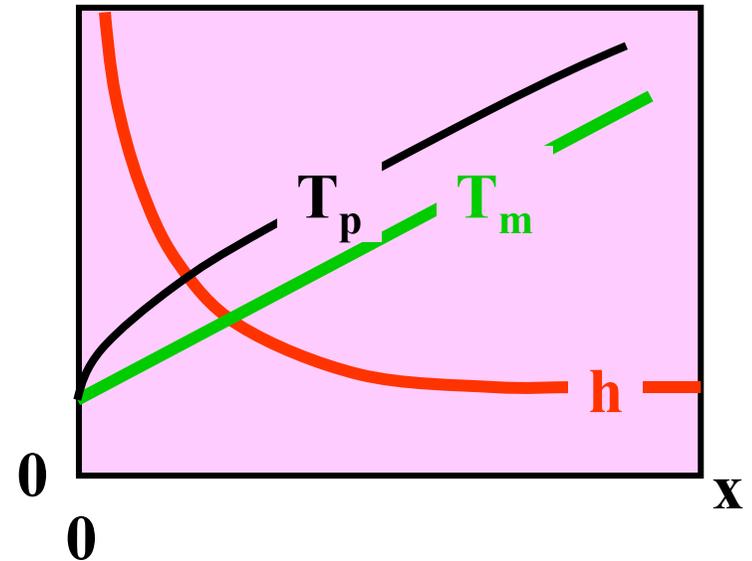


Ex. 7-32 Ar deve ser usado para resfriar um material sólido no qual ocorre geração interna de calor. Furos de 1cm de diâmetro foram feitos no material. A espessura da placa é de 8 cm e a condição térmica na superfície dos furos é do tipo fluxo de calor constante. O ar entra nos furos com uma velocidade média de 1.5 m/s e temperatura de 20°C. Estime a taxa de transferência de calor (Watts) removida pelo ar em cada furo se a temperatura máxima do material não exceder 200°C.



$$U = 1.5 \text{ m/s}$$
$$T_{m,e} = 20^\circ\text{C}$$
$$T_p < 200^\circ\text{C}$$



Note que T_p máximo vai ocorrer na saída do tubo!



Após pressão das universidades, o governo alterou a redação das normas por meio de um decreto declaratório

As posições firmadas no decreto de ontem já haviam sido manifestadas pelo governo por meio de declarações ou ofícios. Parte do corpo universitário, porém, entendia que tal situação era frágil, por isso era necessário alterar o texto dos decretos

O DECRETO - 51.461 (1/1/2007)

O QUE DIZ - Organiza a Secretaria de Ensino Superior. O texto diz que a pasta, entre outras funções, visa ampliar 'as atividades de pesquisa, principalmente as operacionais'. Também 'busca formas alternativas e adequadas ao atual estágio tecnológico' para oferecer formação aos alunos, 'com vista a aumentar a porcentagem de jovens que cursam a universidades'. Outros dois artigos (20 e 24) dizem que a pasta 'deve acompanhar e analisar o desempenho econômico e financeiro da implementação de políticas governamentais' para as universidades e que o secretário 'deve submeter à apreciação do governador [...] assuntos de órgãos subordinados ou entidades vinculadas à secretaria'

AS CRÍTICAS - O governo pretende direcionar a pesquisa e a formação dos estudantes para atender ao setor privado, interferindo em sua autonomia, além de tentar interferir em seus projetos

O QUE DIZ O NOVO DECRETO - O decreto de hoje retira os trechos sobre a prioridade à pesquisa operacional e o atual estágio tecnológico e diz que os artigos 20 e 24 não são aplicáveis às universidades, mas apenas à própria secretaria

O DECRETO - 51.660 (14/3/2007)

O QUE DIZ - Institui a Comissão de Política Salarial vinculada diretamente ao governador, que 'fixará diretrizes a serem observadas' em assuntos de política salarial. Além disso, a comissão deverá 'aprovar os termos finais das negociações a serem realizadas'.

Fonte: Folhapress

O DECRETO - 51.471 (2/1/2007)

O QUE DIZ - Ficam vedadas a admissão ou contratação de pessoal em todos os órgãos públicos, incluindo as autarquias especiais (na qual se inserem USP, Unesp e Unicamp)

AS CRÍTICAS - A governo interfere na autonomia da universidade de gerir seu quadro de professores e funcionários

O QUE DIZ O NOVO DECRETO - Tal norma não se aplica às universidades ou à Fapesp (fundação do governo de fomento à pesquisa)

O DECRETO - 51.473 (2/2/2007)

O QUE DIZ - Todos os órgãos do Estado, inclusive as autarquias especiais, devem reavaliar as licitações em curso, 'objetivando a redução dos seus quantitativos, de modo a ajustá-los às estritas necessidades da demanda imediata e à disponibilidade orçamentária'. As normas complementares à execução do decreto, porém, 'compete à Secretaria da Fazenda'

AS CRÍTICAS - O governo interfere na autonomia das universidades de gerir suas compras

O QUE DIZ O NOVO DECRETO - Tal norma não se aplica às universidades ou à Fapesp

O DECRETO - 51.636 (9/3/2007)

O QUE DIZ - A execução orçamentária do Estado de São Paulo será, obrigatoriamente, realizada em tempo real no Siafem (Sistema Integrado de Administração Financeira para Estados e Municípios). Antes, as universidades apenas prestavam contas, mensalmente, ao governo. no sistema, mas não operavam na plataforma

AS CRÍTICAS - O governo pode interferir nos remanejamentos de recursos orçamentários das universidades, o que não ocorria até então. Além disso, as escolas podem perder a possibilidade de fazer investimentos com recursos não-utilizados

O QUE DIZ O NOVO DECRETO - O decreto de hoje diz que 'a execução orçamentária [...] das universidades [...] será realizada de acordo com o princípio da autonomia universitária'. Além disso, as instituições 'manterão contas específicas' na qual poderão efetuar 'remanejamentos, quitações e tomar outras providências de ordem orçamentária'.

AS CRÍTICAS - Tira a autonomia das universidades de fazerem as negociações salariais internamente, entre reitores e sindicatos

O QUE DIZ O NOVO DECRETO - Tal norma não se aplica às universidades ou à Fapesp

- A relação entre T_{ms} e T_{me}

$$T_{ms} = \frac{\dot{q}_x'' \cdot P \cdot L}{\dot{m} \cdot C_p} + T_{me}$$

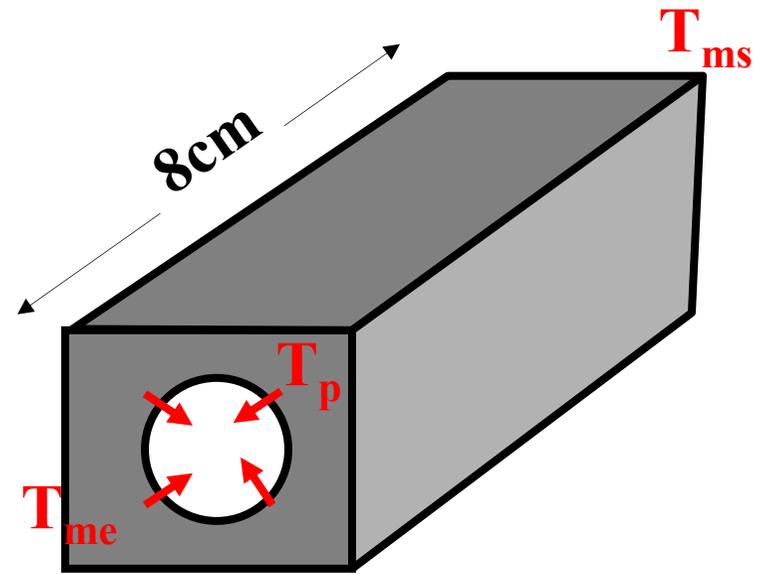
- A relação entre T_{ms} e T_p

$$T_p = \frac{\dot{q}_x''}{h} + T_{ms}$$

- Obtendo uma relação entre T_{me} e T_p

$$T_p = \frac{\dot{q}_x''}{h} + \frac{\dot{q}_x'' \cdot P \cdot L}{\dot{m} \cdot C_p} + T_{me}$$

- As duas incógnitas são q'' e h . Se calcularmos h , encontraremos q'' da expressão acima



Cálculo do Nusselt Local

Observação

diâmetro	d	m	0.01		0.01
comprimento	L	m	0.08		0.08
razão d/L	d/L	(---)	0.125		0.125
Perímetro	P	m	0.031		0.031
Area Transversal	At	m ²	7.854E-05		7.854E-05
Propriedades do ar	Prop Ar		30		40
	cp	J/kgK	1006.4		1006.8
	rho	kg/m ³	1.1644		1.1273
	ni	m ² /s	1.60E-05		2.00E-05
	k	W/mK	2.64E-02		2.71E-02
	Pr	(---)	0.712		0.71
velocidade entrada	U	m/s	1.5		1.5
vazão mássica	m	kg/s	1.37E-04		1.33E-04
Reynolds	Re	(---)	937		752
Peclet (Re.Pr)	Pe	(---)	667.1		533.6
	Pe(d/L)	(---)	83.4		66.7
Nusselt	Nu	(---)	4.36		4.36
coef. Transferência de calor	h	W/m ² K	11.5		11.8
	PL/mCp	m ² K/W	1.82E-02		1.88E-02
fluxo de calor	q"	W/m ²	1712		1740
taxa de calor	Q	W	4.3		4.4
Temp. Mistura Saída	Tms	C	51		53

Laminar

Desenvolvido $Pe(d/L) < 1000$

constante, Tab. 7.4



Aula 22

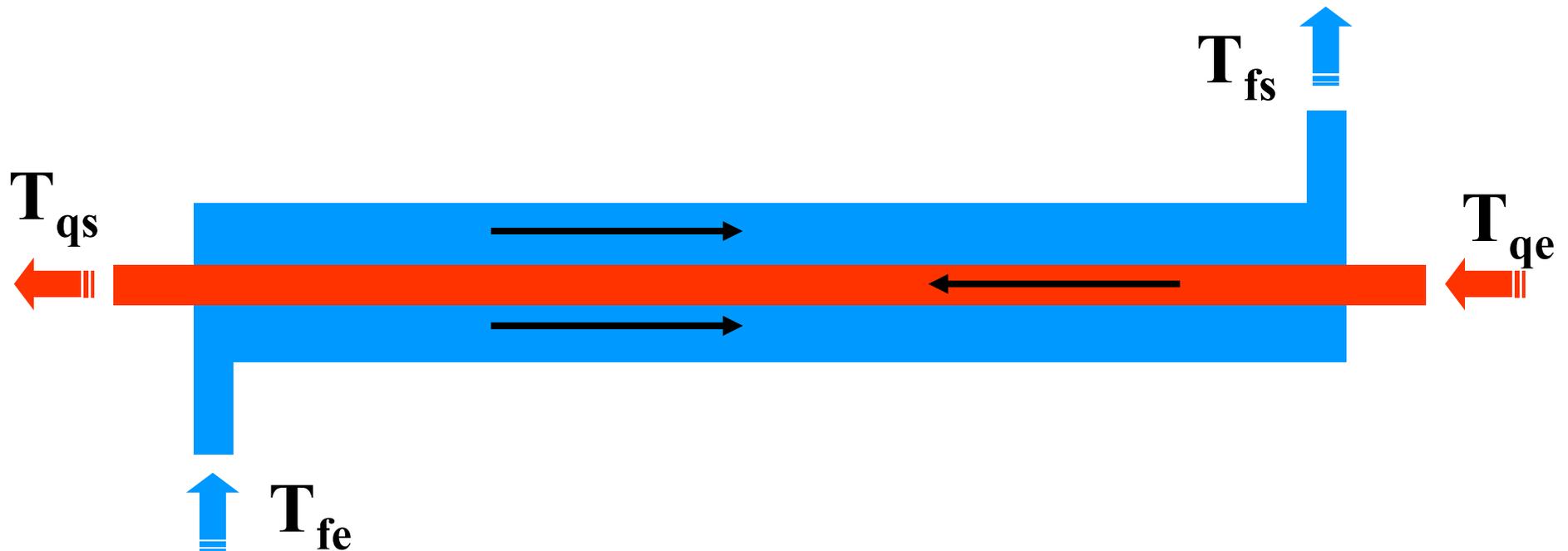
Capítulo 7

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’**
- **Balanço de Energia em Um Trocador de Calor**
- **Configurações em Correntes Paralelas e Contra-Corrente**
- **Método da Efetividade**

Trocadores de Calor

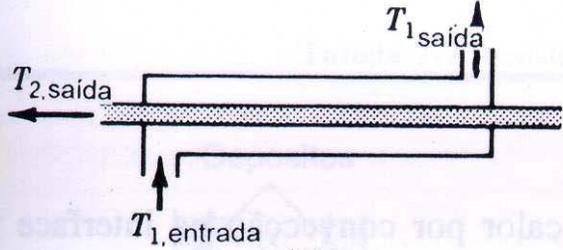


Classificação baseada na aplicação:

- (1) 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.

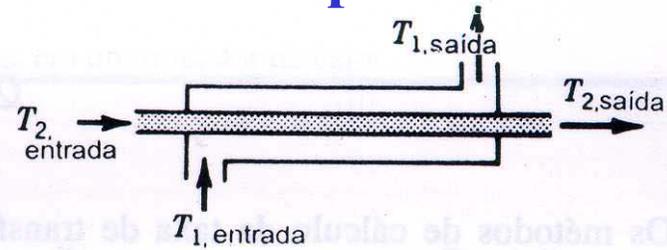
Classificação Baseada na Configuração do Escoamento

contra-corrente



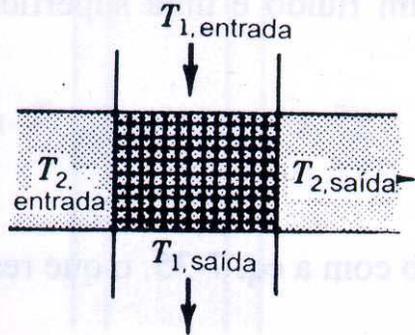
(a)

correntes paralelas



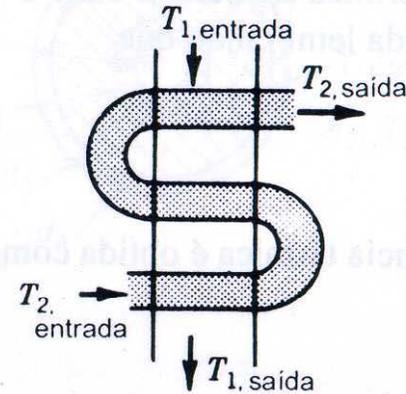
(b)

correntes cruzadas

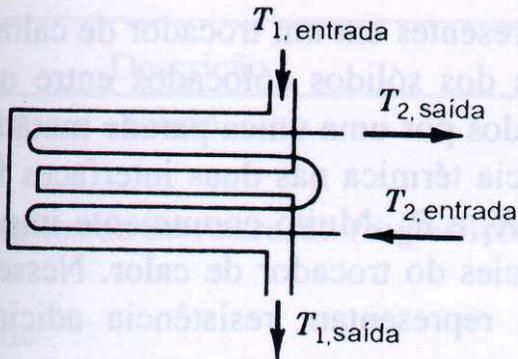


(c)

contra-corrente cruzada



(d)



(e)

**Casco e tubo
múltiplos passes**

Trocador de Calor Casco e Tubo

(líquido-líquido; vapor/líquido-líquido)

condensadores de vapor

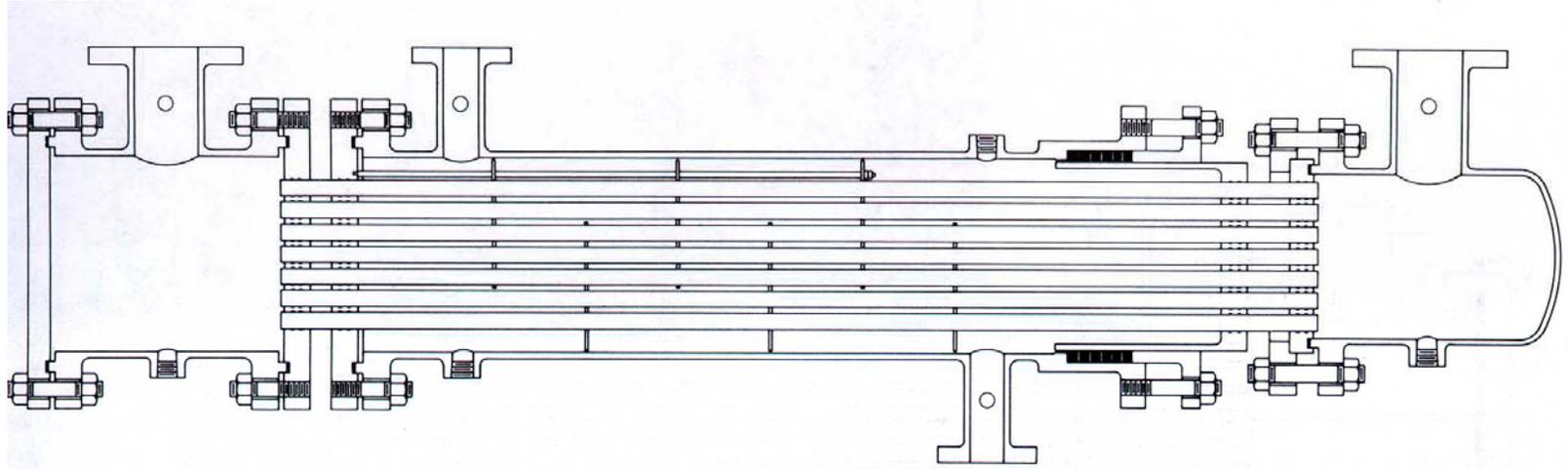


Figure 1.12 Single-pass tube, baffled single-pass shell heat exchanger with a packed joint floating head and double header sheets to assure that no fluid from one circuit leaks into the other. (Courtesy The Patterson-Kelley Co.)

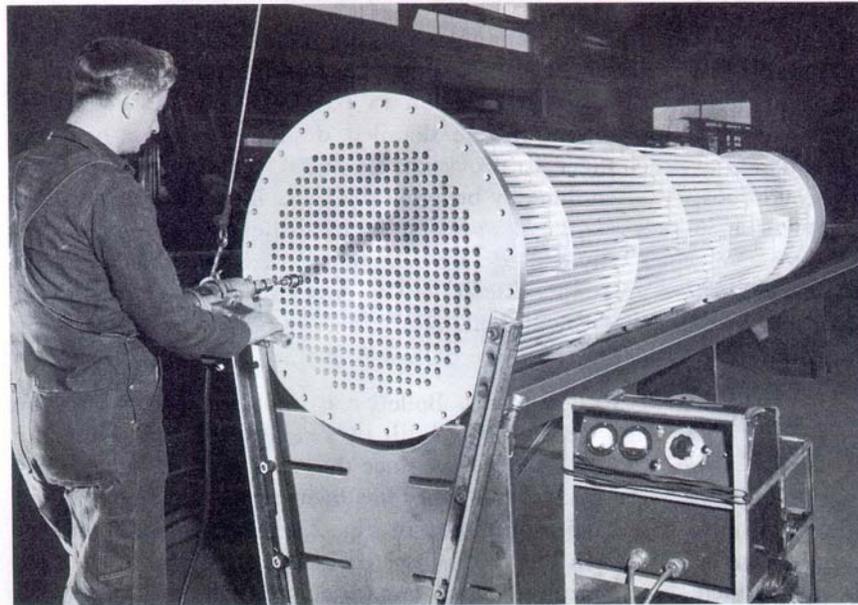


Figure 2.2 Photo showing tubes being rolled into the header sheet of a shell-and-tube heat exchanger. (Courtesy Patterson-Kelley Co.)

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

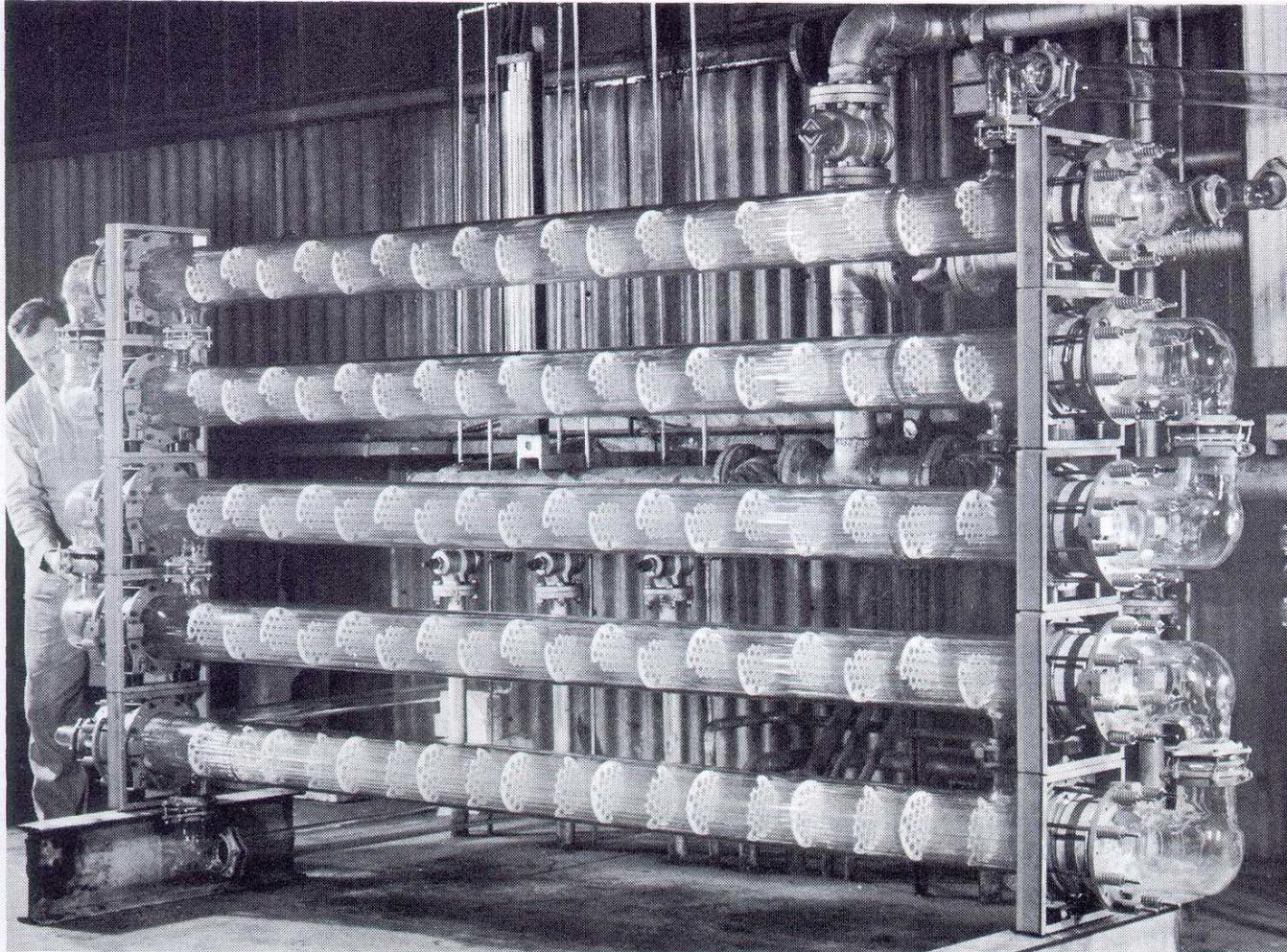


Figure 1.13 A five-bank, shell-and-tube heat exchanger made of Pyrex glass for chemical processes. (Courtesy Corning Glass Works.)

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

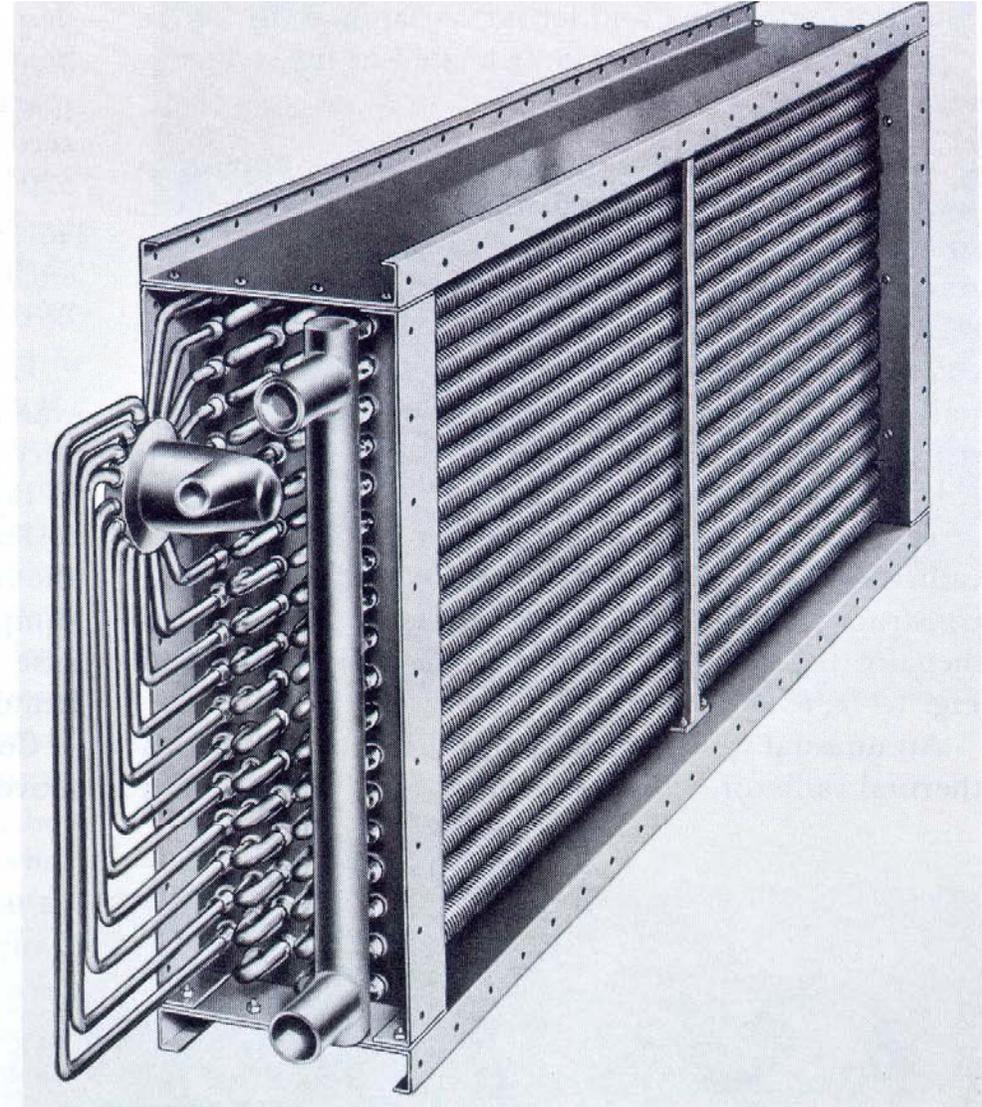
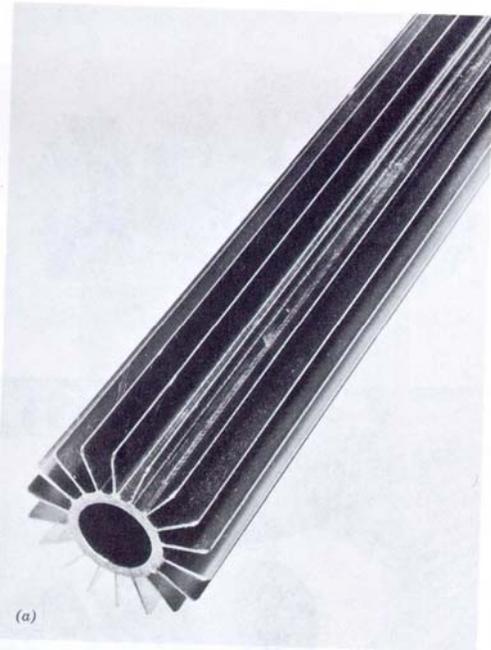
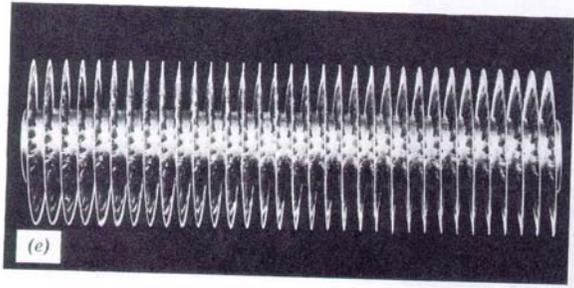


Figure 1.14 Finned tube bank for a large air-conditioning system. (Courtesy Aerofin Corp.)

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

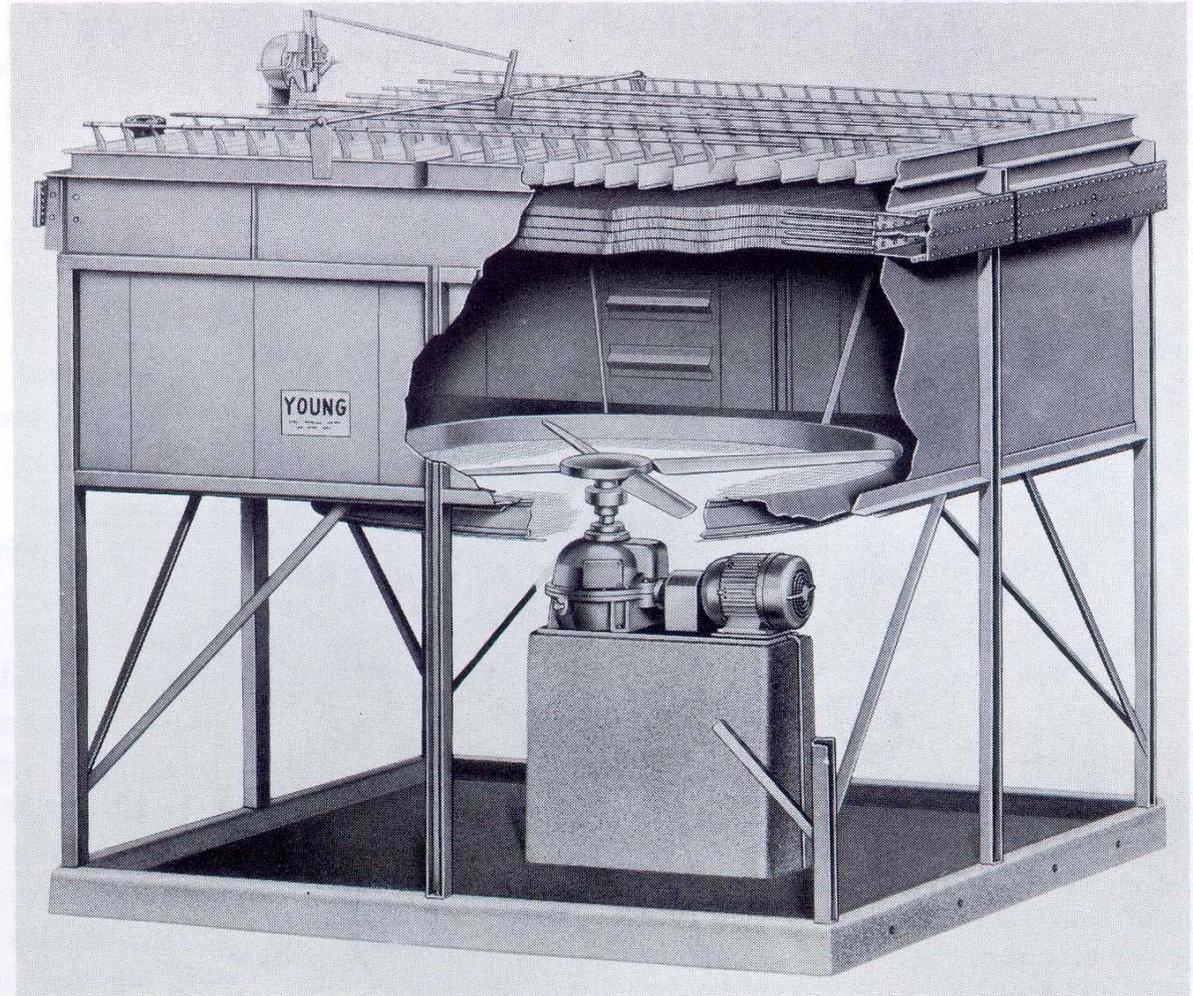


Figure 1.15 Large air-cooled finned tube bank designed for outdoor installation. (Courtesy Young Radiator Co.)

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

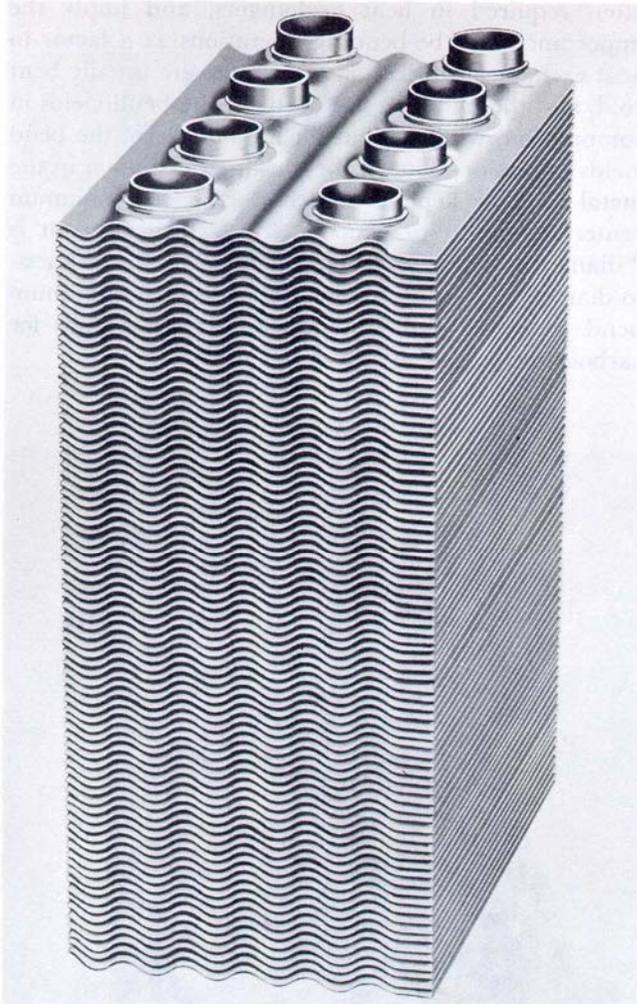
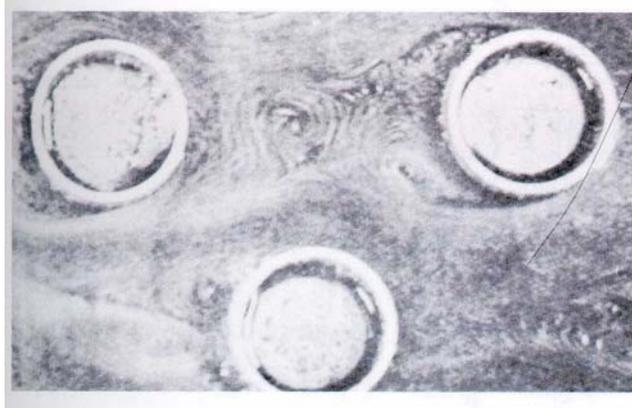
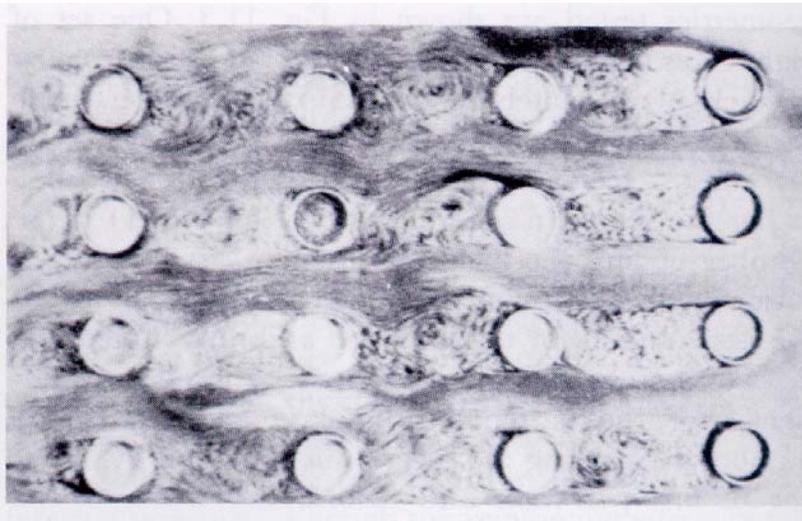


Figure 2.11 Element of a corrugated plate-fin, round-tube Freon evaporator made of aluminum for an air-conditioning system. (Courtesy The Trane Co.)



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.

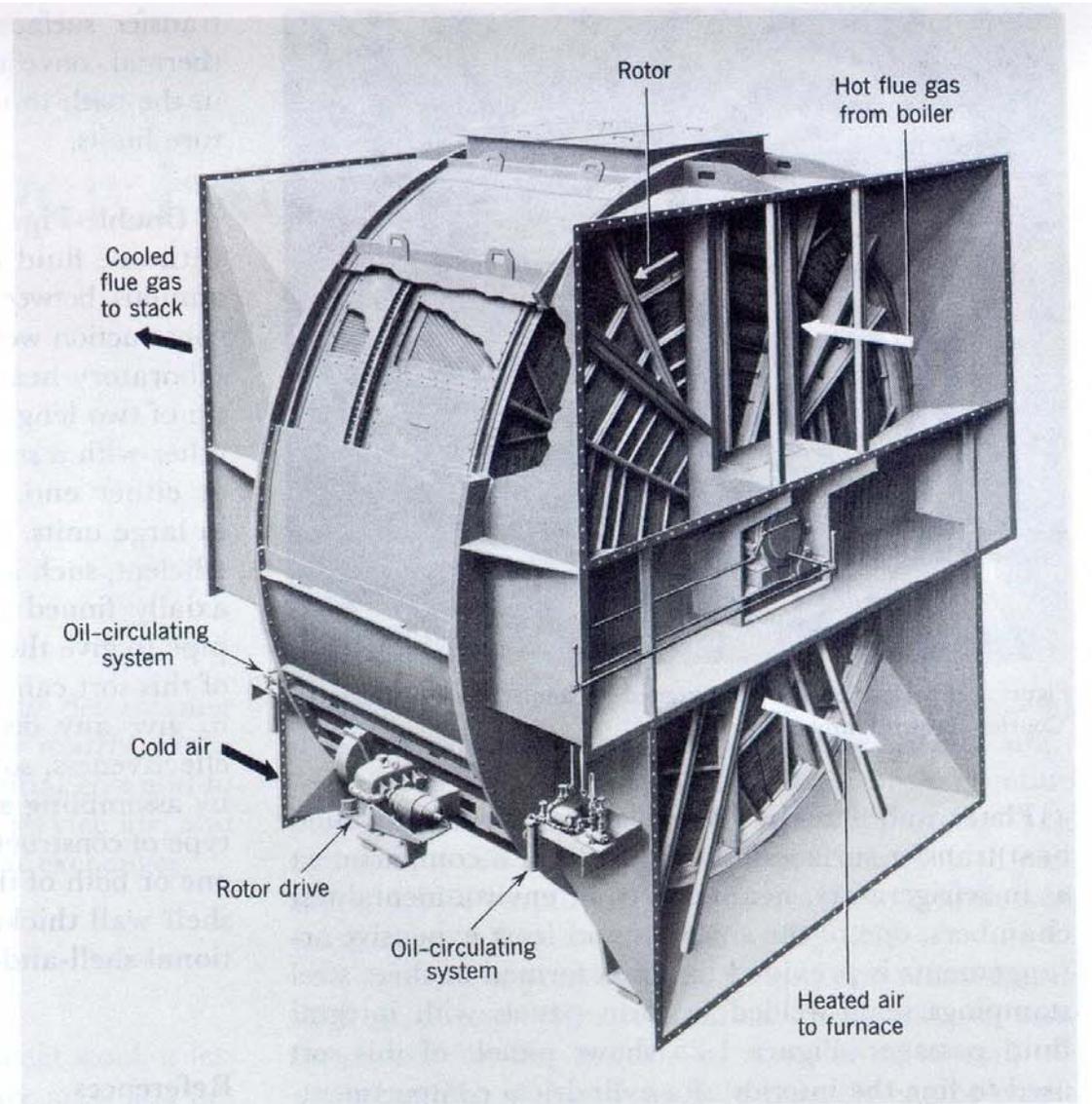


Figure 1.24 A rotary regenerator for preheating the air in a large coal-fired steam power plant. (Courtesy Air Preheater Corp.)

◀ **Gerador de Vapor de uma planta industrial que queima carvão.**

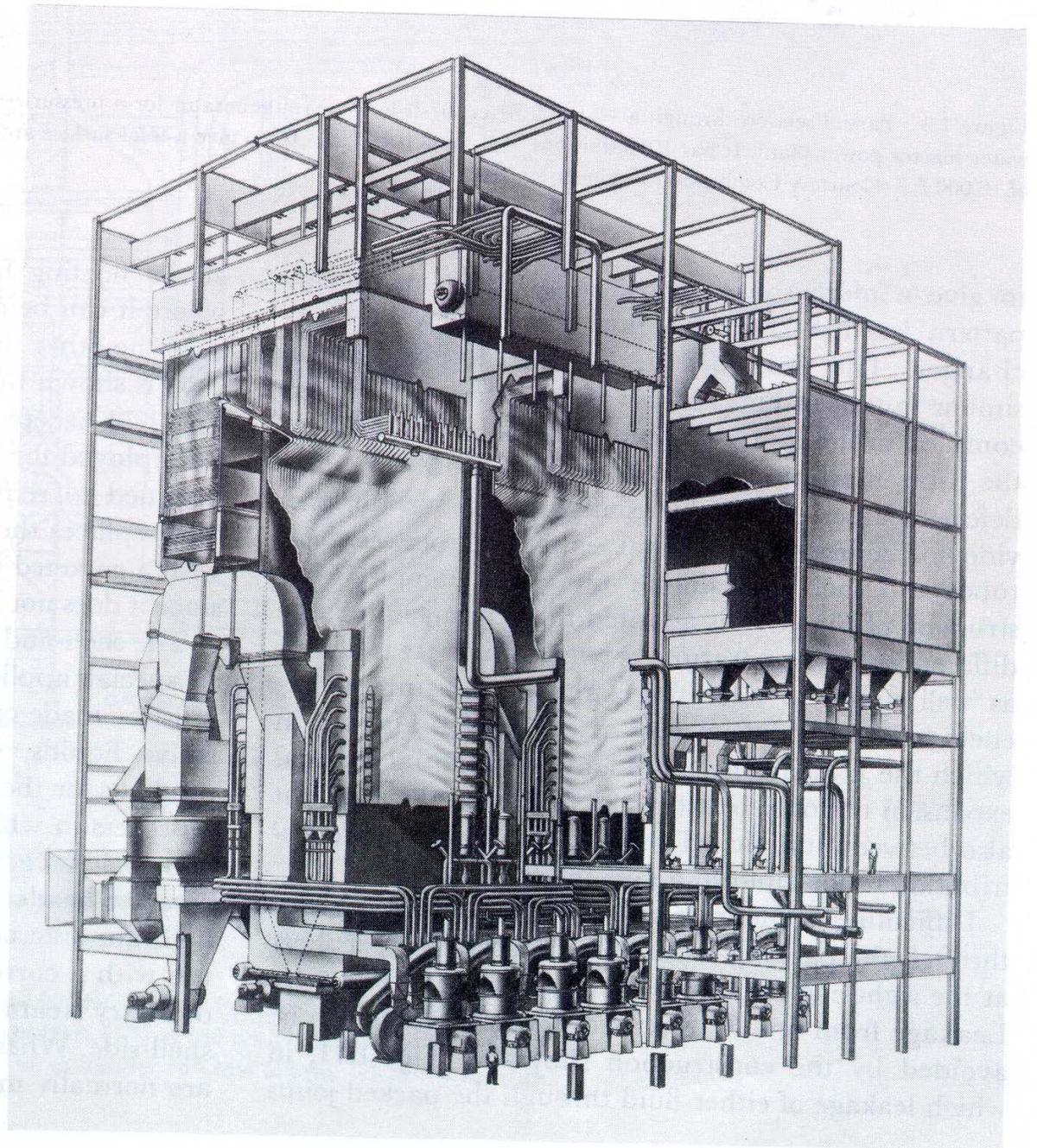
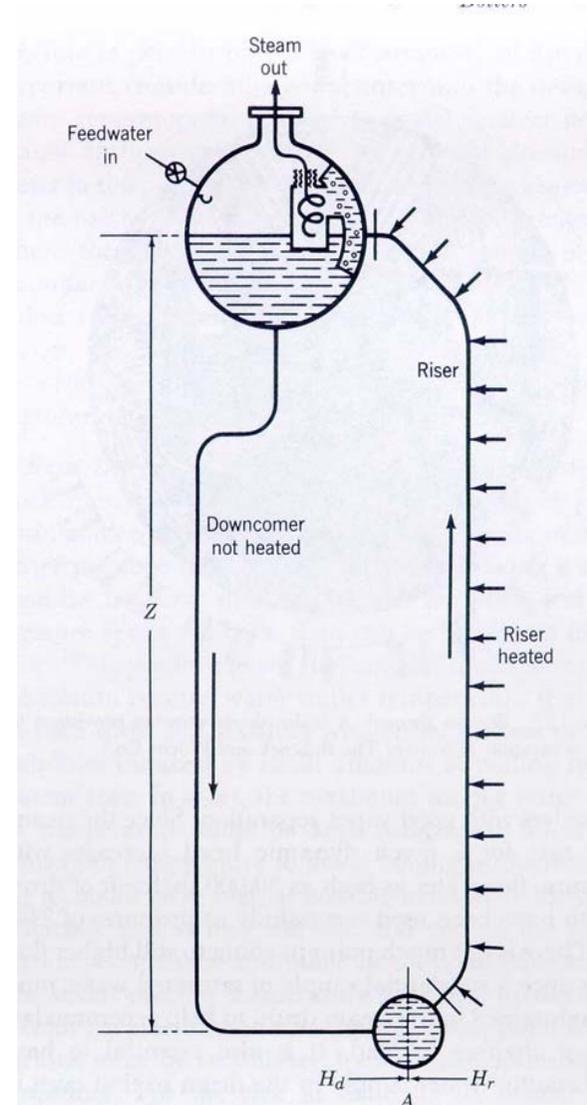
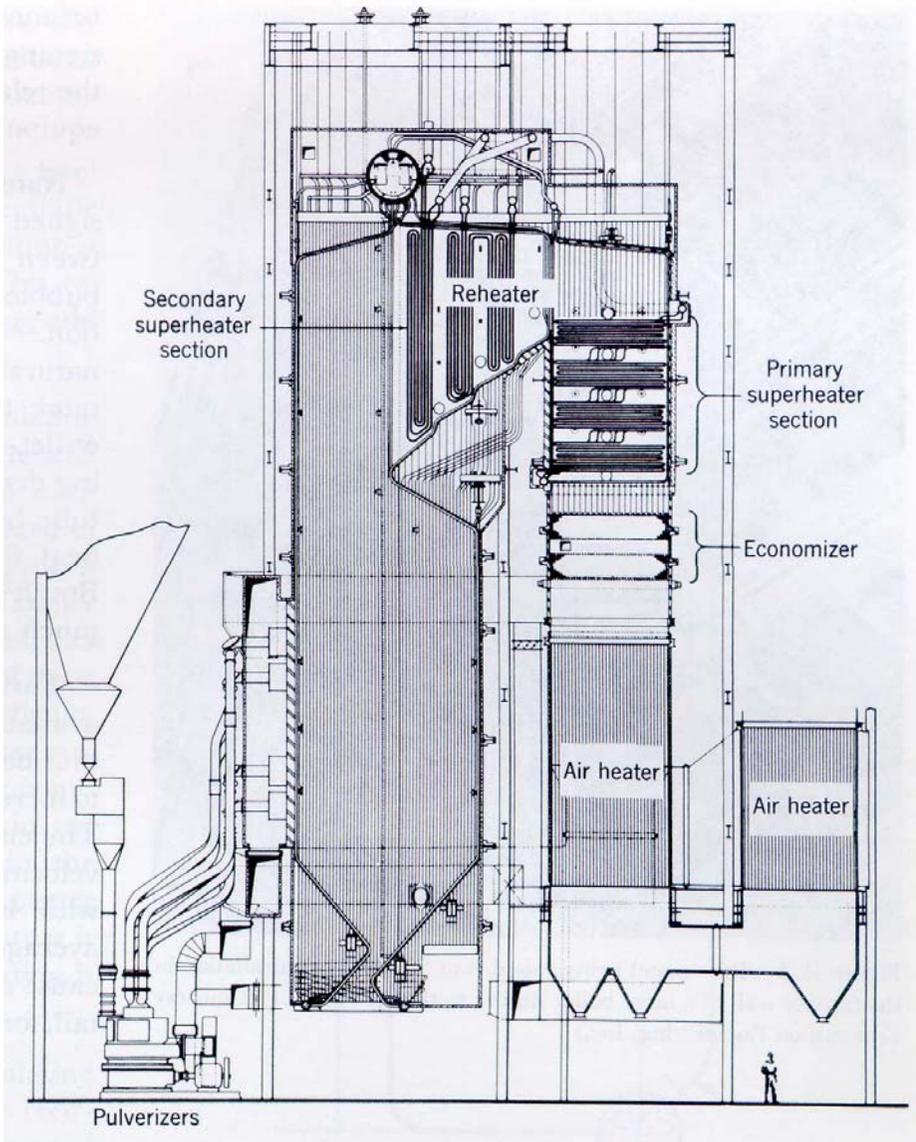


Figure 1.3 Partial section through a large modern, coal-fired steam boiler. (Courtesy Combustion Engineering, Inc.)

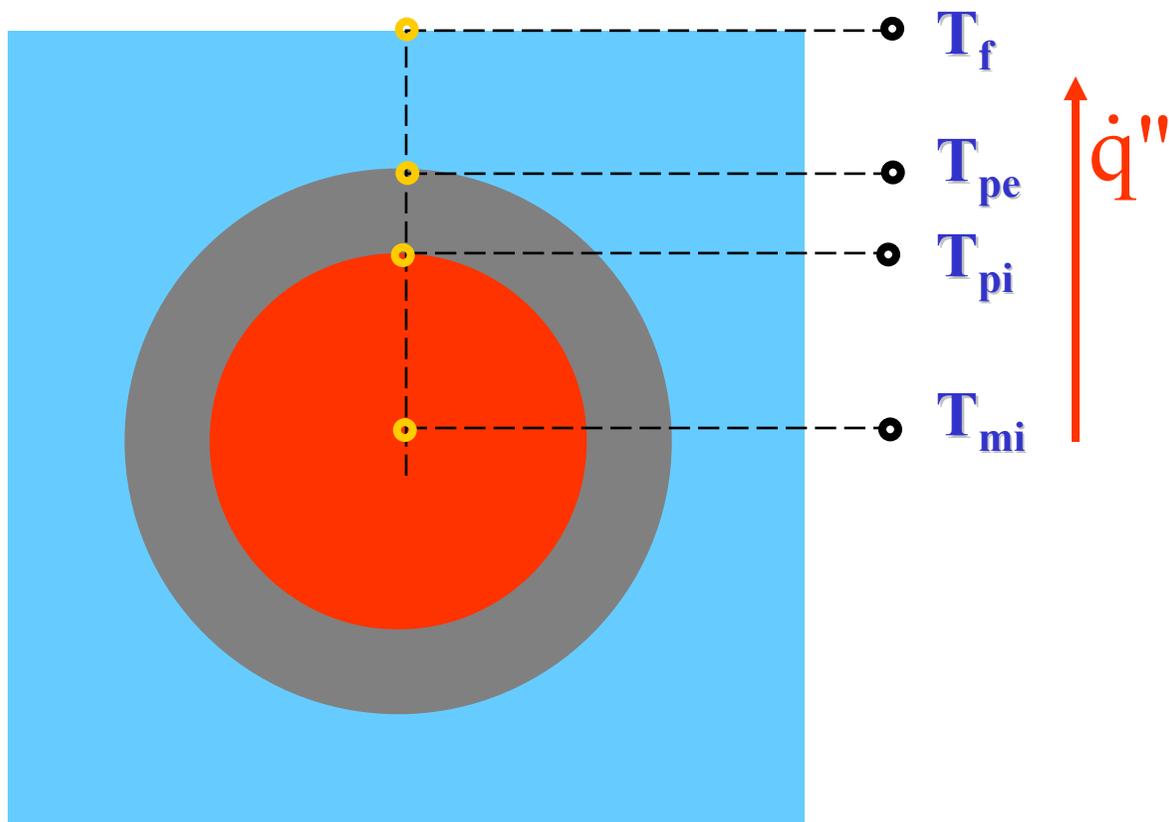
Gerador de Vapor



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 :

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

$$+ \quad Q_k \Delta x / A_p k = (T_{p,i} - T_{p,e})$$

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

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

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



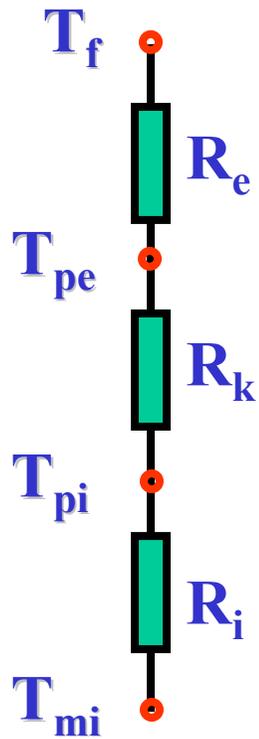
A taxa de calor que sai do fluido quente e chega ao fluido frio é então determinado por:

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

Analogia Calor/Eletricidade



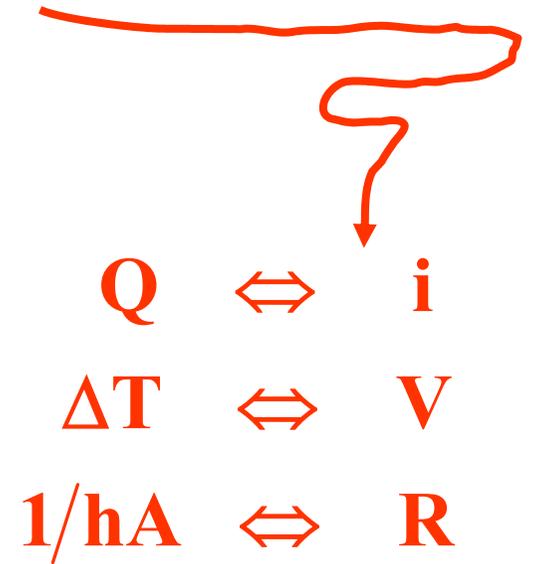
Pode-se estabelecer uma analogia direta entre o caminho que o calor percorre com um circuito elétrico (lei de ohm: $V = Ri$)



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

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

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



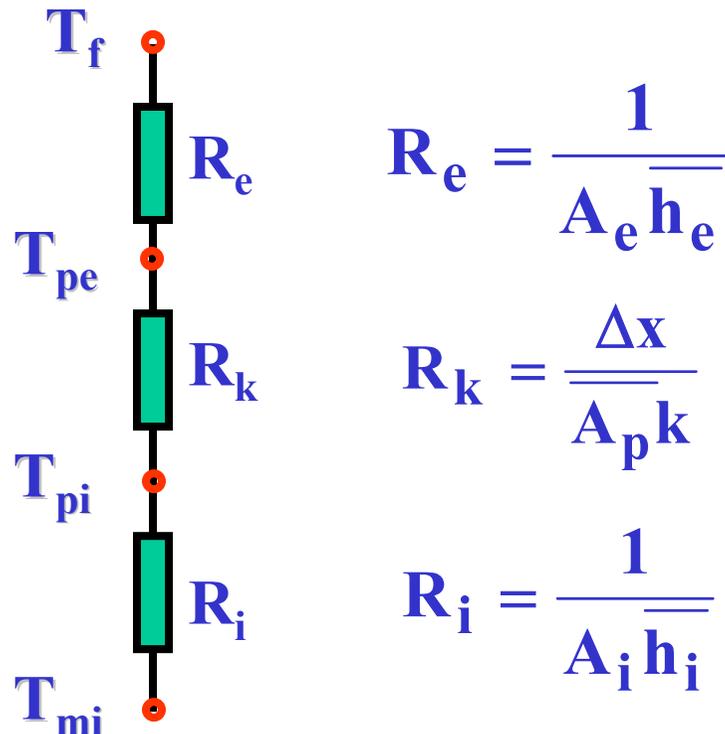
Analogia Calor/Eletricidade



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:

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

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:

$$Q = (UA_i)(T_{m,i} - T_f) \quad \text{onde}$$

$$UA_i = \frac{1}{R_i + R_k + R_e}$$

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



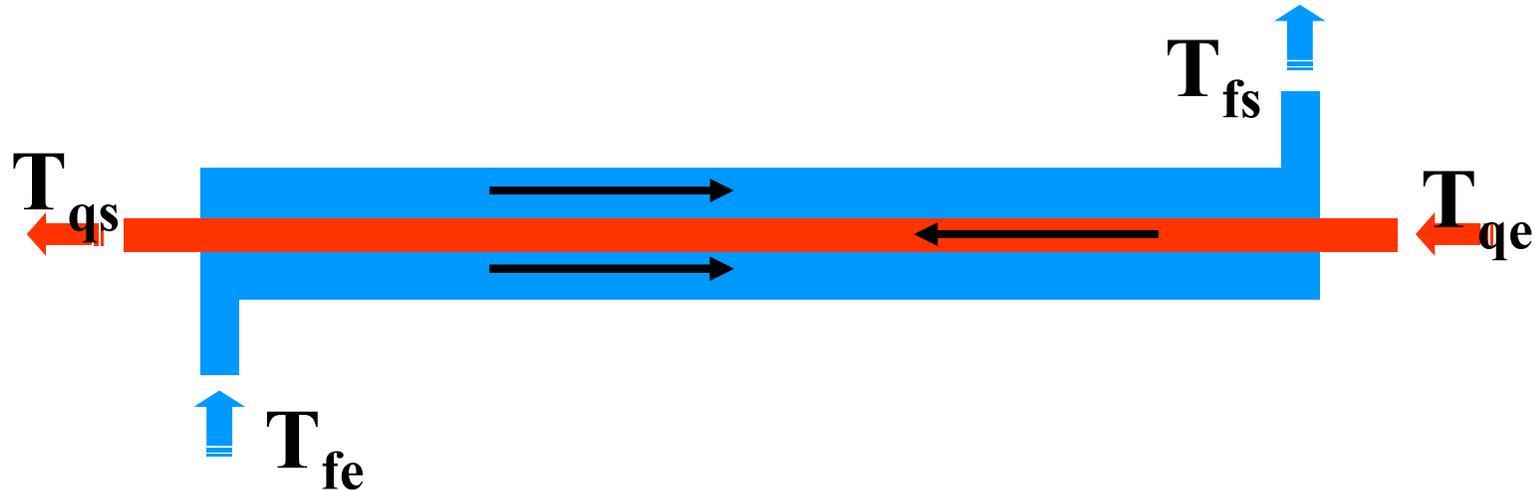
calor cedido fluido quente

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

=

calor recebido fluido frio;

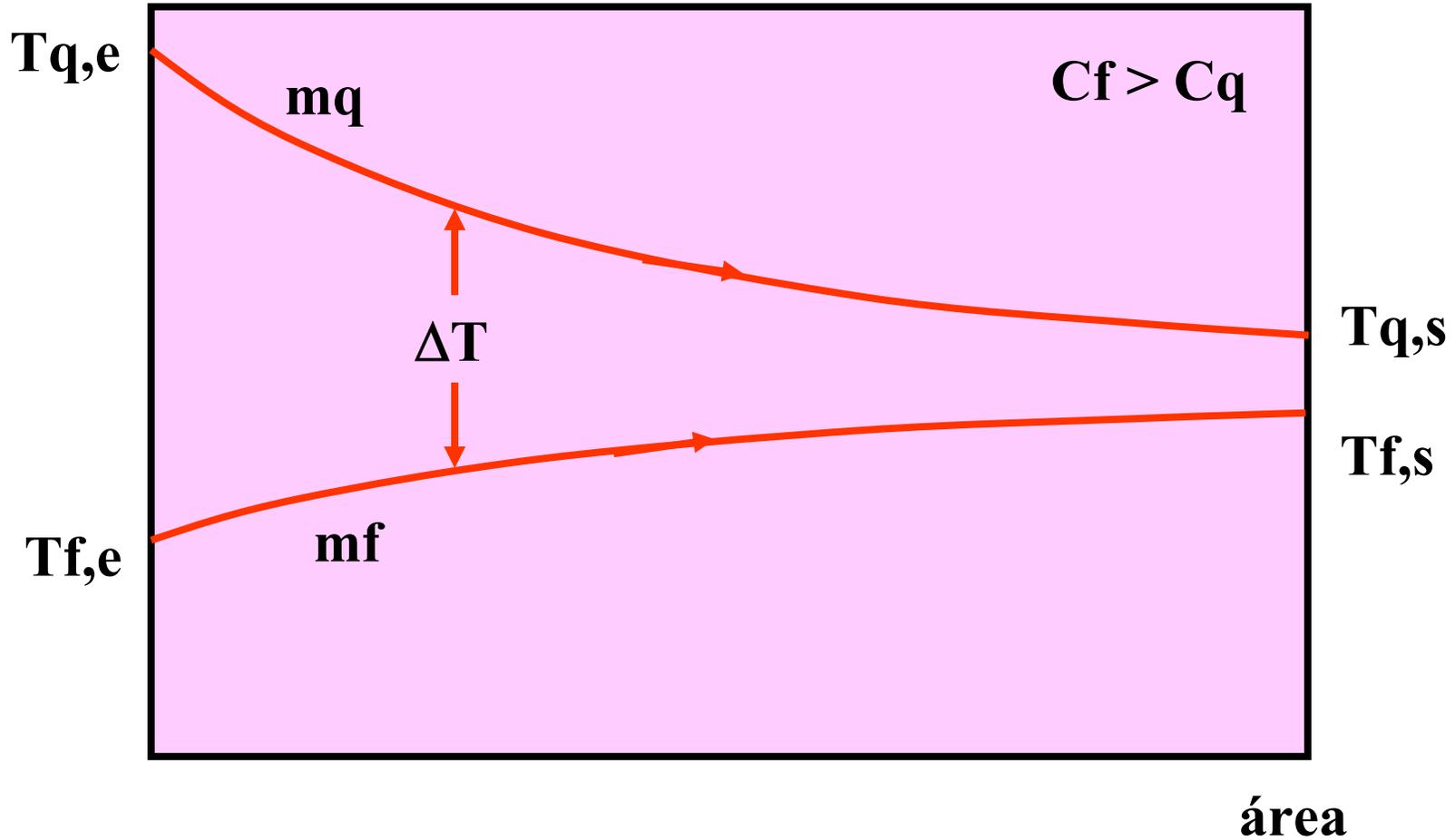
$$Q_f = \dot{m}_f C_{p,f} (T_{f,s} - T_{f,e})$$



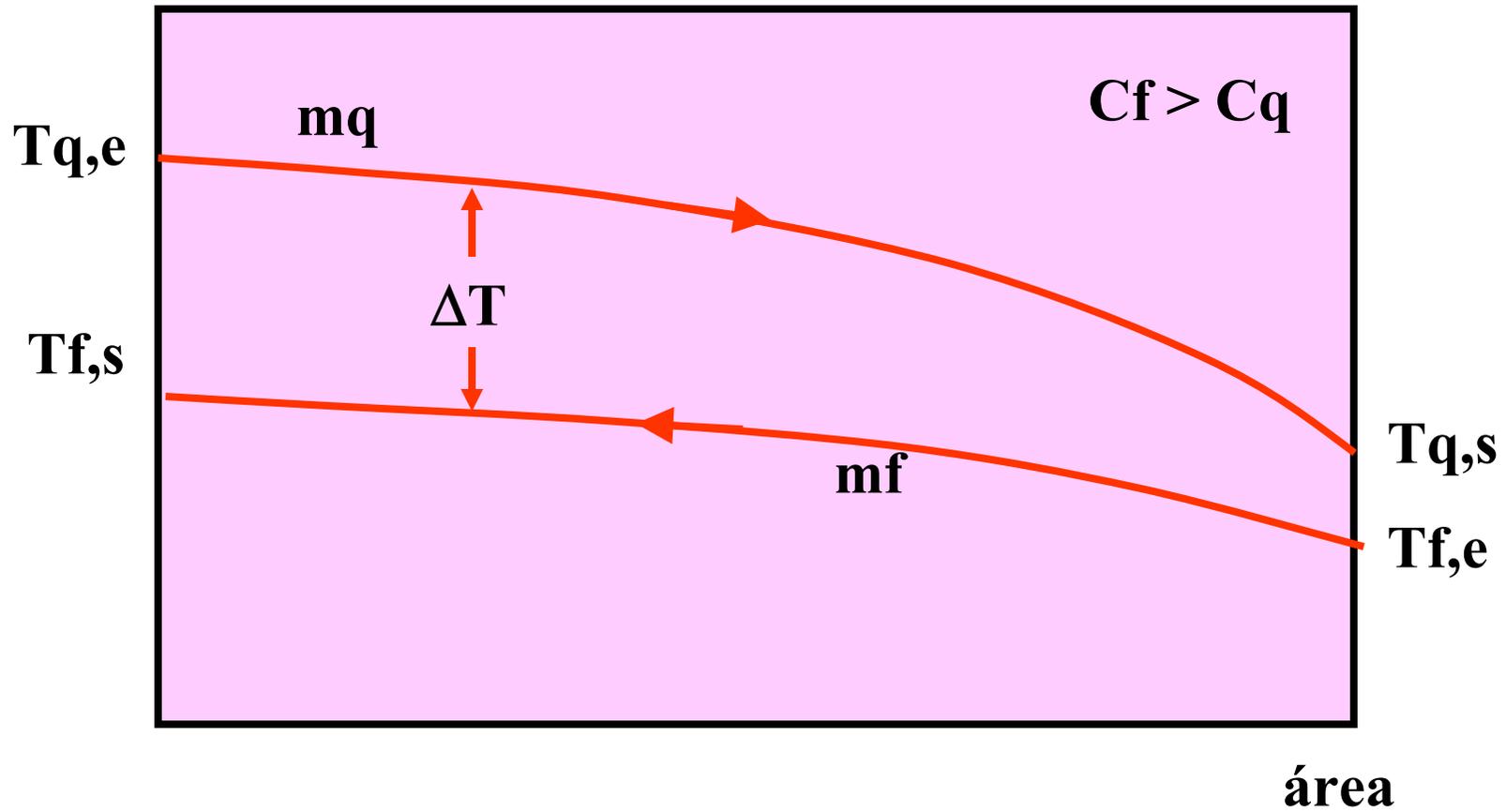
$$C_q (T_{q,e} - T_{q,s}) = C_f (T_{f,s} - T_{f,e})$$

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

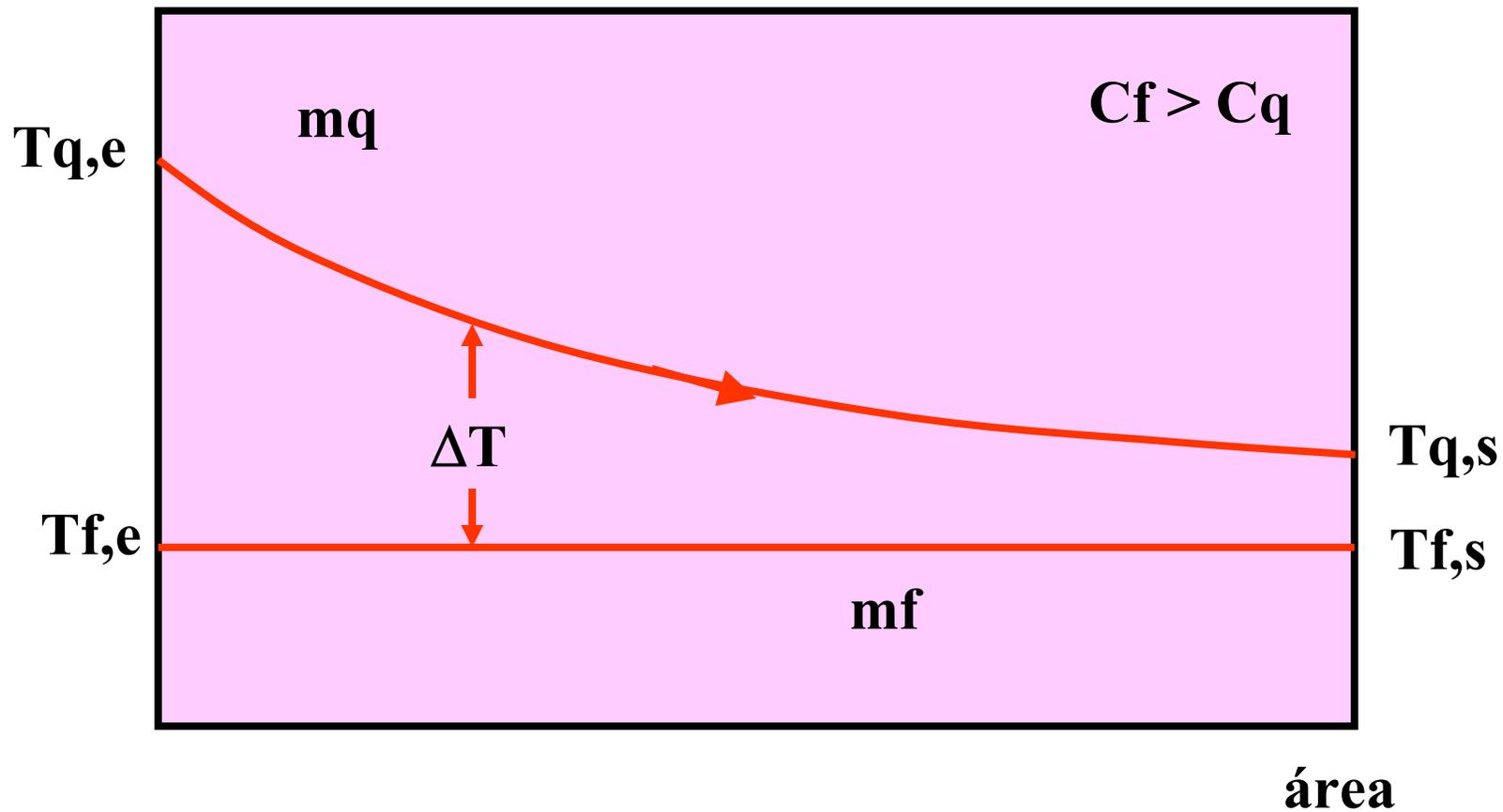
Distribuição Temperatura Correntes Paralelas



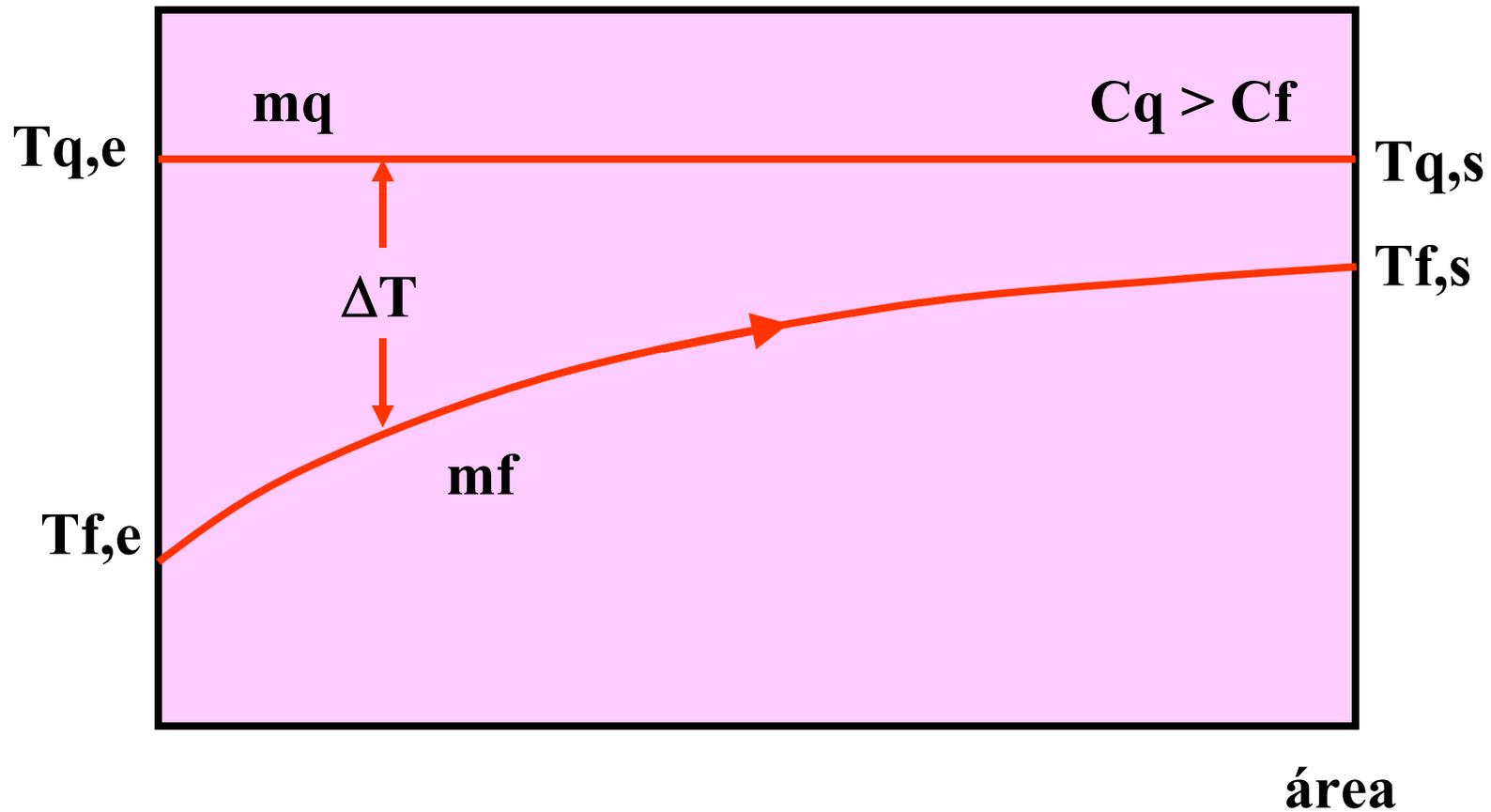
Distribuição Temperatura Contra-Correntes



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

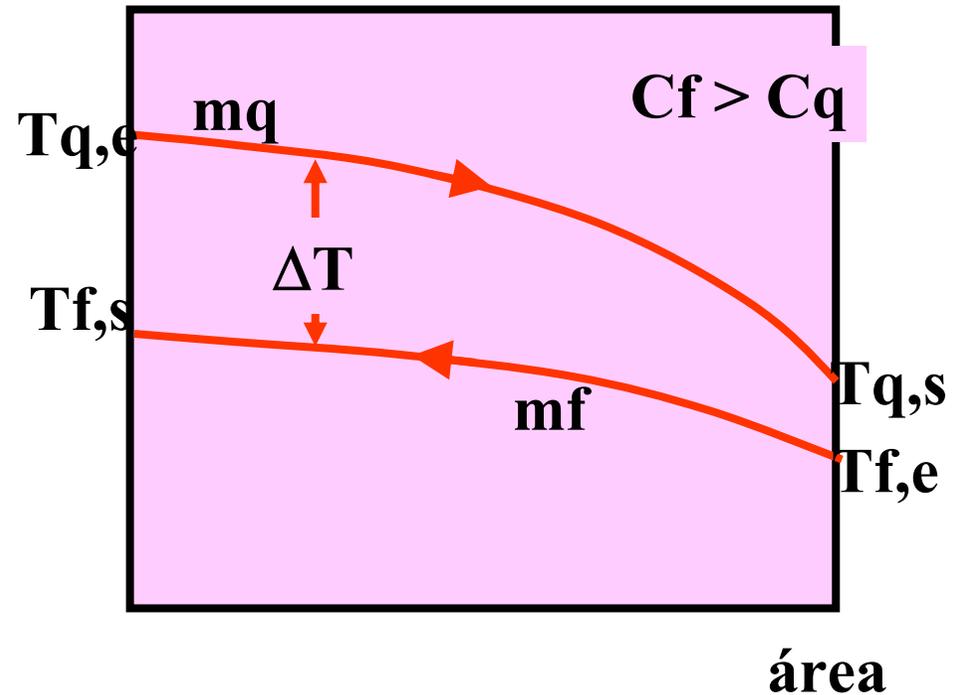


- A efetividade de um trocador de calor é a razão entre o calor que ele troca pelo máximo calor que ele pode trocar:

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

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

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

Efetividade de Trocadores x No. Unidades Térmicas (NUT)

Arranjo em Contra-Corrente

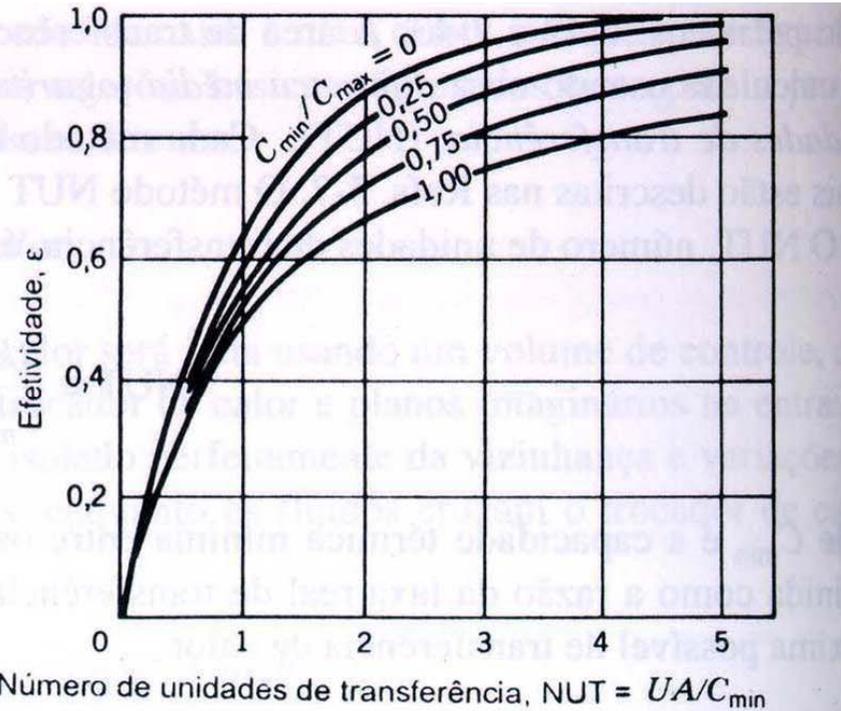
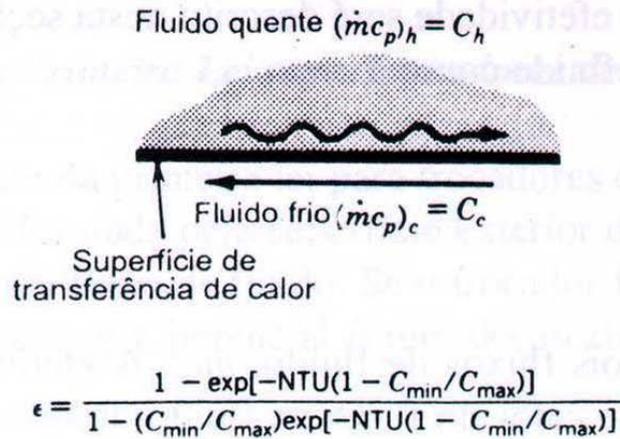
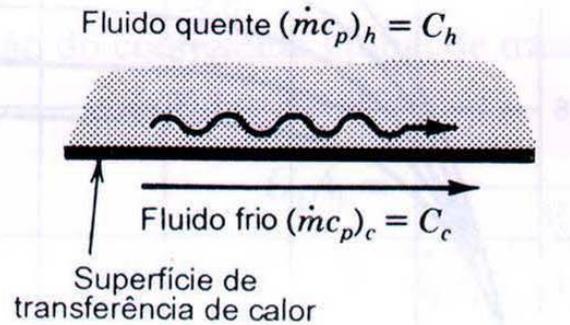


Figura 7-21 Trocador de calor de contracorrente.

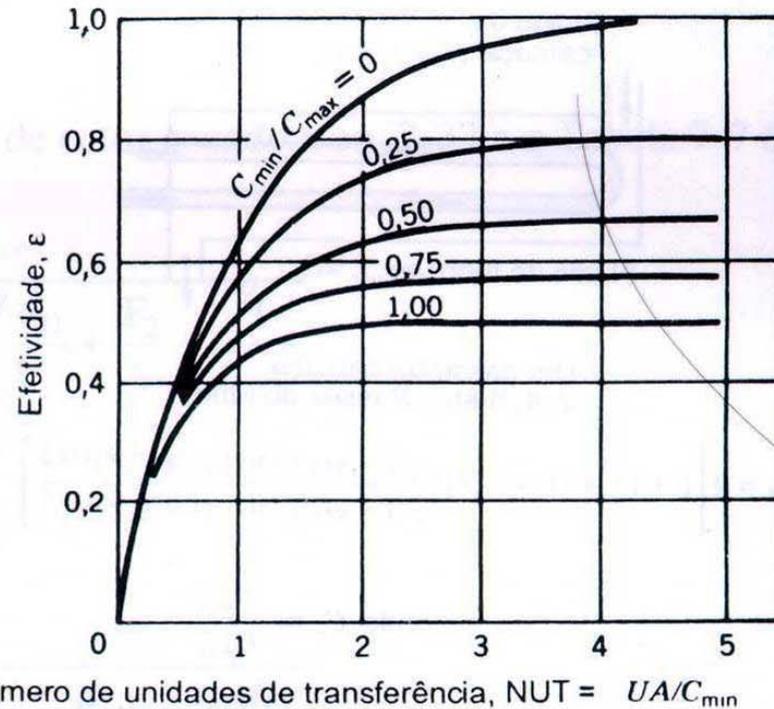
Efetividade de Trocadores x No. Unidades Térmicas (NUT)



Arranjo em Corrente Paralela



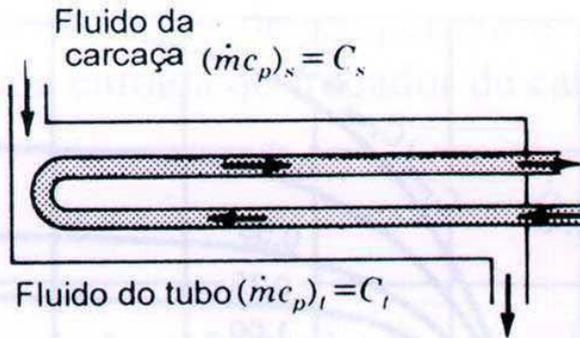
$$\epsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 + C_{\min}/C_{\max})]}{1 + C_{\min}/C_{\max}}$$



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

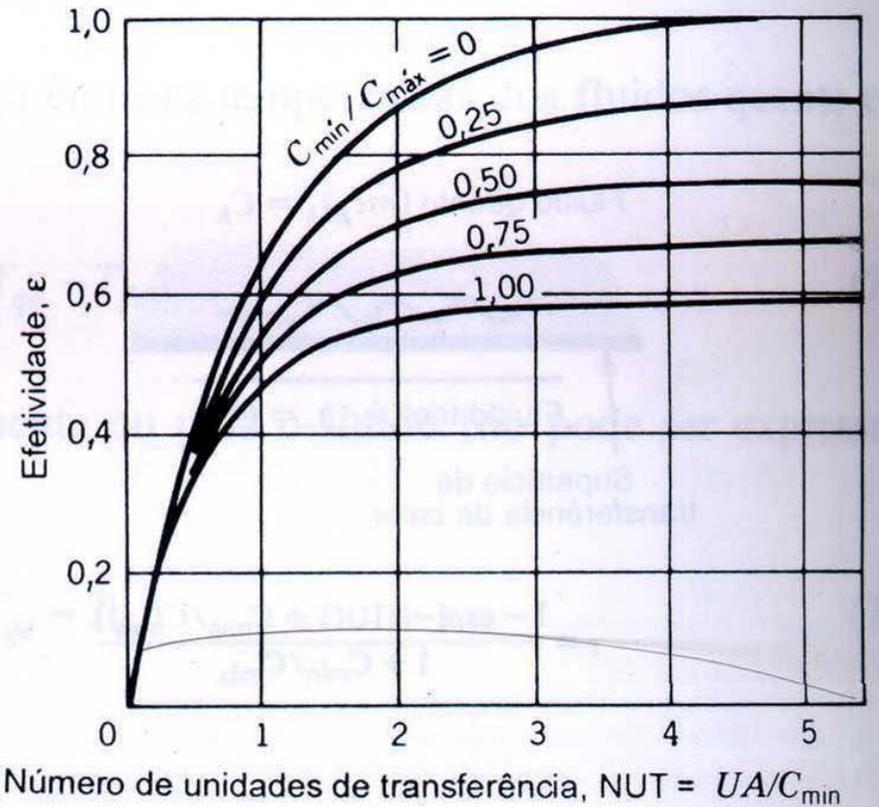


Figura 7-25 Trocador de calor de contracorrente - dois passes no tubo.