



Transmissão de calor

3º ano

Aula 29 ▫ 14. Termopermutadores de Calor

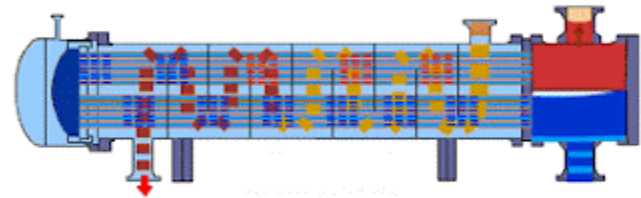
Tópicos:

- Classificação
- Coeficiente Global de Transferência de Calor
- Método da Diferença Média Logarítmica das Temperaturas
- Método do número de unidades de transferência

14.1 Definição

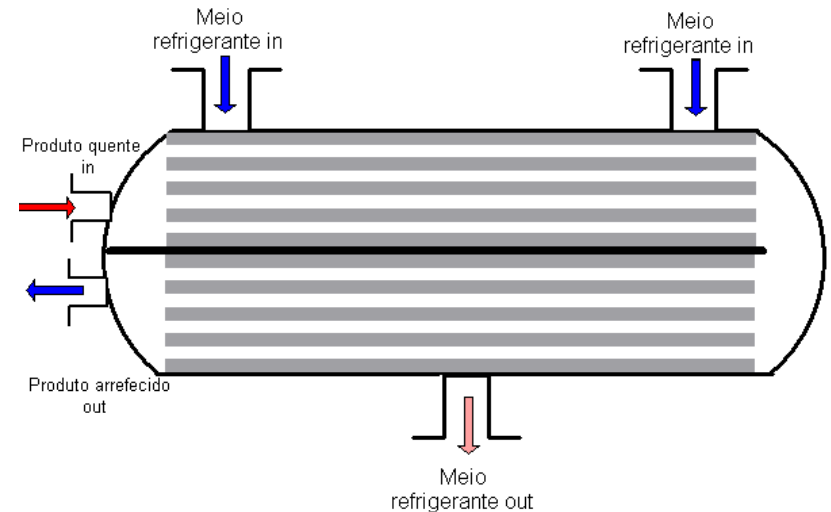
Trocadores de calor são dispositivos usados para realizar o processo da troca térmica entre dois fluidos a diferentes temperaturas. Pode-se utilizá-los no aquecimento e resfriamento de ambientes, no condicionamento de ar, na geração de energia, na recuperação de calor, em processos químicos, etc.

14.1 Trocador de calor



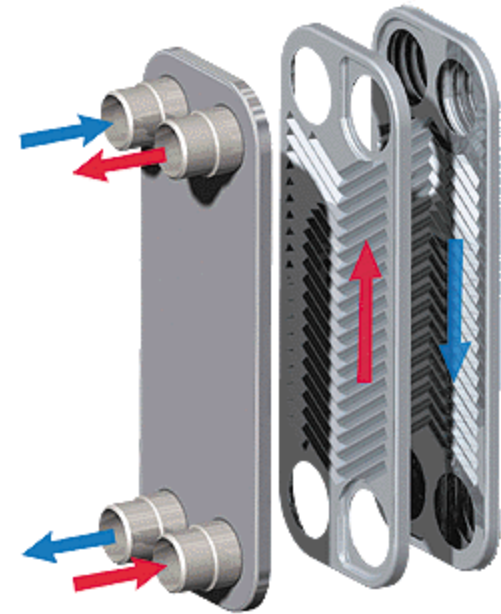
14.1 Trocador de Tubo e Carcaça

O trocador é constituído por uma carcaça cilíndrica que tem tubos no seu interior. As ligações são de modo que os tubos possam conter o produto ou o meio refrigerante, dependendo da aplicação. A limitação principal é que eles não podem ser usados para regenerar, mas eles podem transferir muito calor devido à área de superfície.



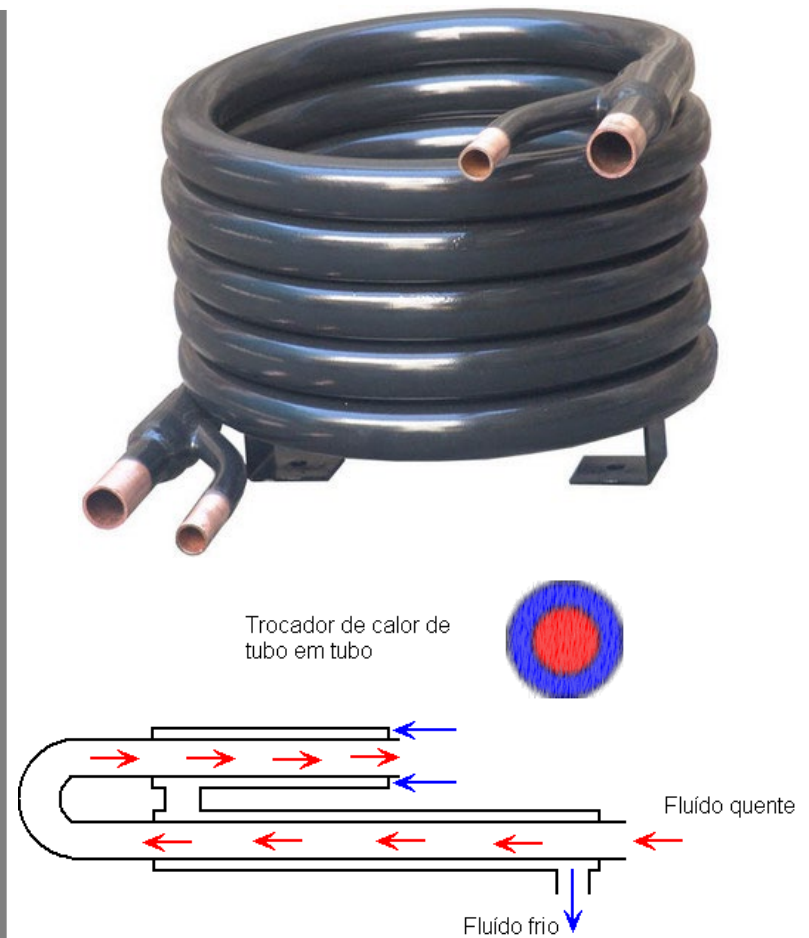
14.1 Trocador de Calor de Placas

Consiste de várias placas finas de aço que são colocadas num arranjo numa armação. O segundo canal está aberto a um mesmo fluido. Entre cada par de pratos há uma junta de borracha que impede que os fluidos se misturem ou escoem para o ambiente. O calor assim é transferido do fluido quente ao fluido mais frio pelo prato fino de aço. Chicanas apoiam os pratos e criam um fluxo turbulento nos canais que provê uma alta eficiência de transferência de calor.



14.1 Permutador de Tubo em Tubo

O fluido do processo passa pelo tubo interno, enquanto o o fluido de aquecimento ou de resfriamento passa pelo tubo exterior. Devido às grandes dimensões do tubo do processo, estes trocadores de calor têm a facilidade de processar particulados muito grandes.



14.1 Tipos De Trocadores De Calor

Os trocadores de calor podem ser classificados de acordo com a disposição das correntes dos fluidos:

- ✓ Contracorrente;
- ✓ Correntes paralelas;
- ✓ Correntes cruzadas; e
- ✓ Multipasse.

De acordo com o tipo de construção:

- ✓ Tubos coaxiais;
- ✓ Casco e tubos; e
- ✓ Compactos.

14.1 Tipos De Trocadores De Calor

1) DE ACORDO COM A DISPOSIÇÃO DAS CORRENTES DOS FLUIDOS

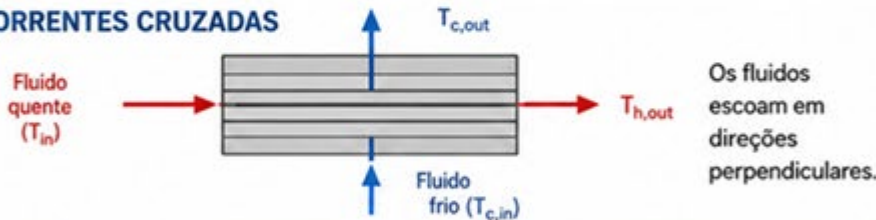
1 CONTRACORRENTE



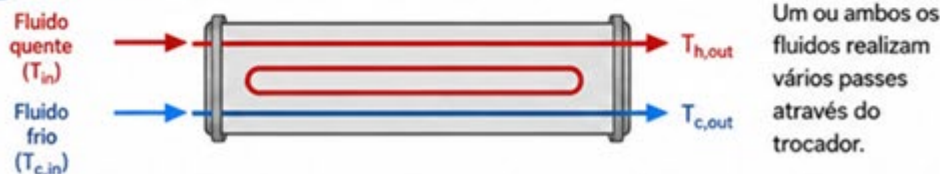
2 CORRENTES PARALELAS



3 CORRENTES CRUZADAS

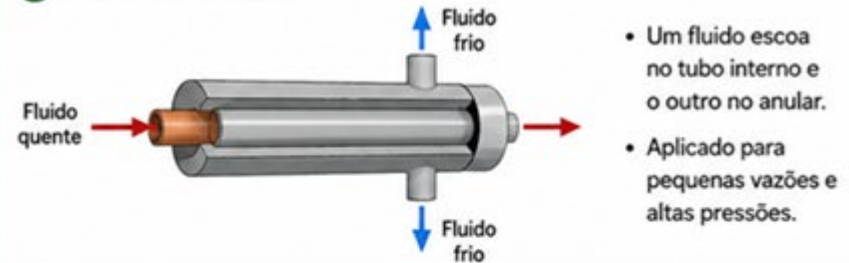


4 MULTIPASSE

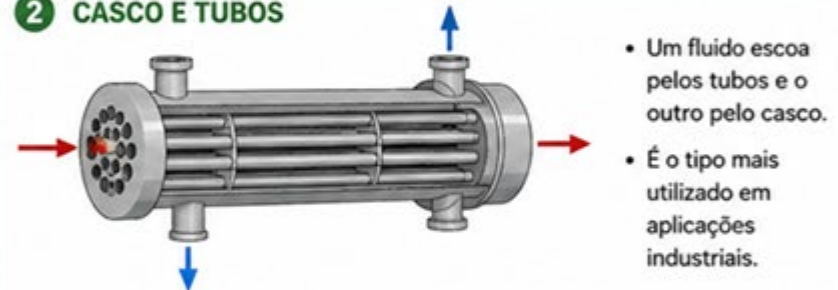


2) DE ACORDO COM O TIPO DE CONSTRUÇÃO

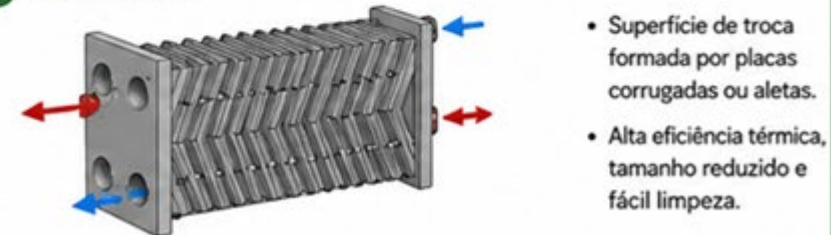
1 TUBOS COAXIAIS



2 CASCO E TUBOS



3 COMPACTOS

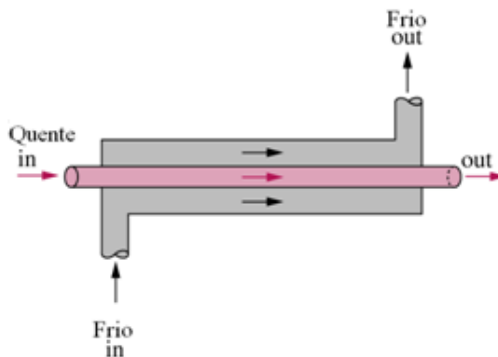
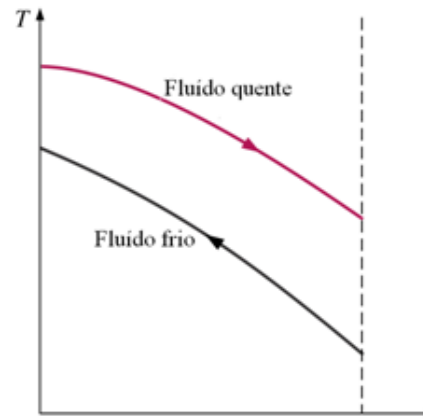
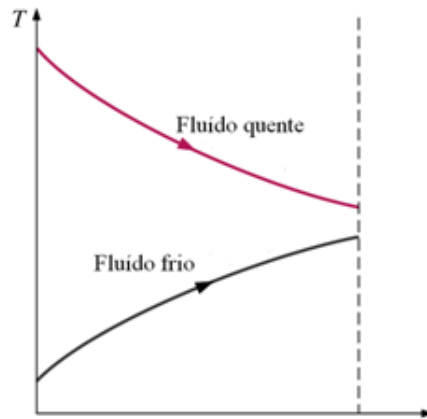


LEGENDA

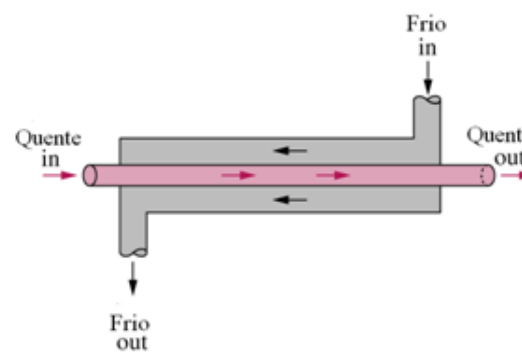
→ Fluido quente

→ Fluido frio

14.1 Trocadores de calor concorrentes e contracorrente

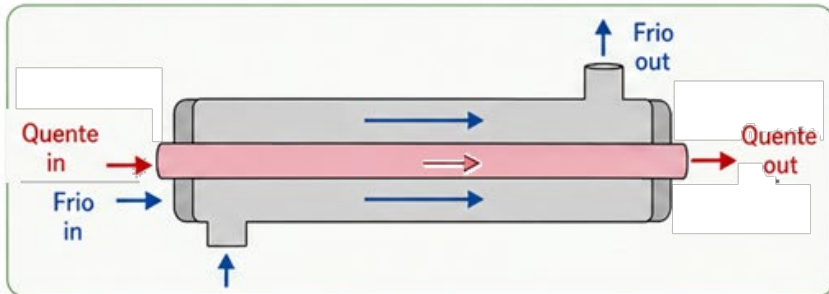


(a) Fluxos concorrentes



(b) Fluxos contra-corrent

14.1 Trocadores de calor concorrentes e contracorrente



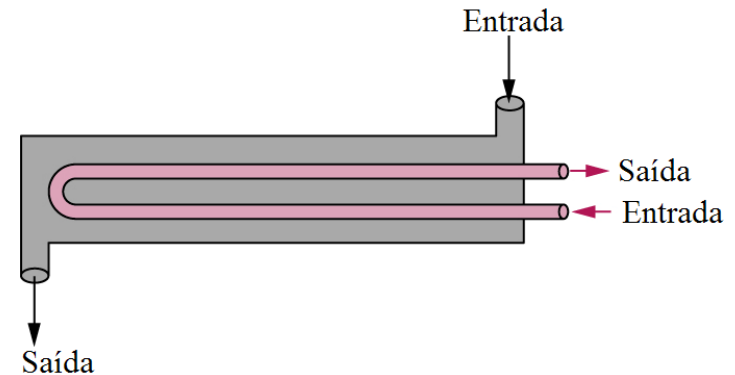
EM RESUMO

- Paralelo (concorrente): os fluidos entram pelo mesmo lado e escoam no mesmo sentido.
- Contra-corrente: os fluidos entram por lados opostos e escoam em sentidos opostos.

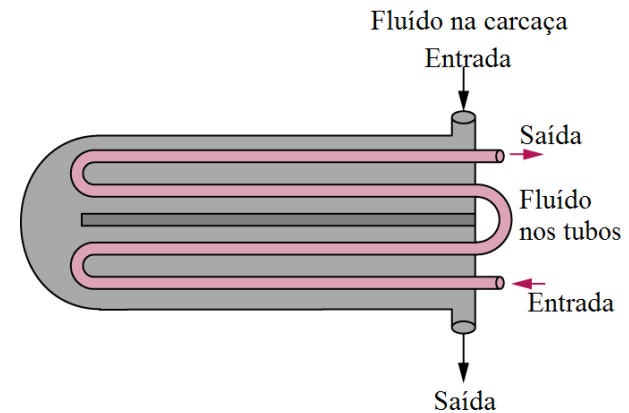
- ✓ A configuração em contra-corrente proporciona maiores diferenças médias de temperatura.
- ✓ Resulta, geralmente, em maior eficiência térmica para a mesma área de troca.

14.1 Trocadores de Calor com Multipasse

Existem situações em que, devido a restrições de espaço, económicas ou condições técnicas específicas, opta-se por construir trocadores com multipasses nos tubos e ou no casco.



(a) Um passe na carcaça e dois nos tubos



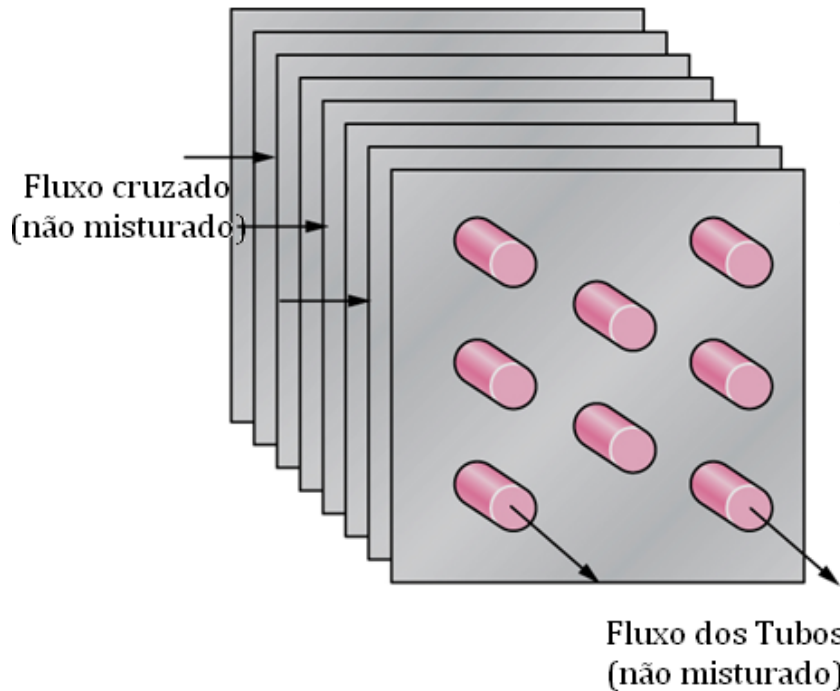
(b) Dois passes na carcaça e quatro nos tubos

14.1 Trocadores de Calor de Correntes Cruzadas

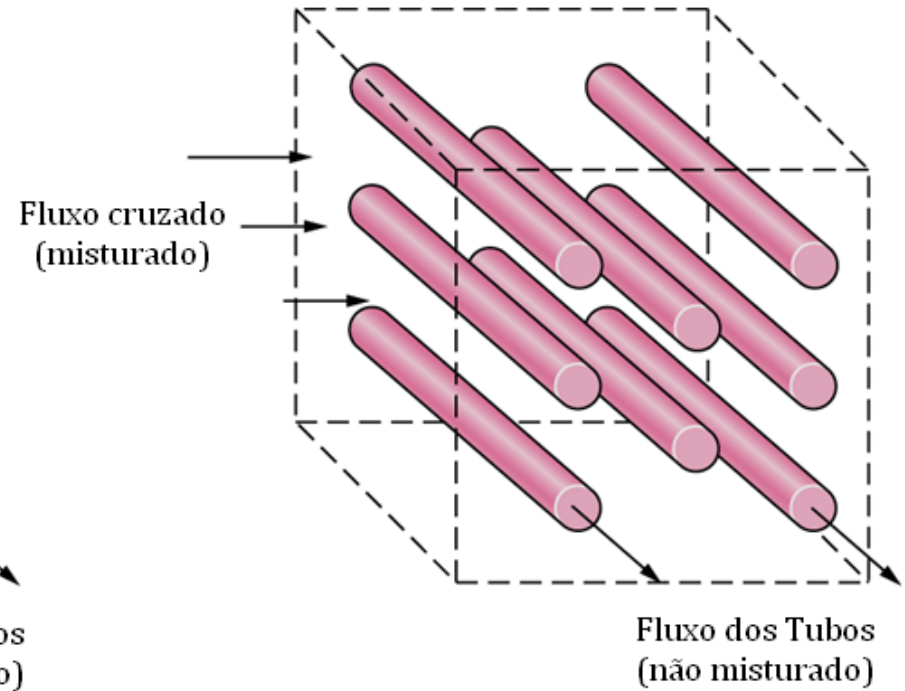
Nos trocadores de calor de correntes cruzadas, os fluidos se deslocam em correntes perpendiculares uma à outra. Neste caso os trocadores podem ser alhetados ou sem alhetas, diferindo pelo facto dos fluidos que se movem sobre os tubos estarem ou não misturados.

Nos dois casos anteriores é possível aplicar as equações para trocadores em concorrente e contracorrente simples, com uma modificação.

14.1 Trocadores de Calor de Correntes Cruzadas

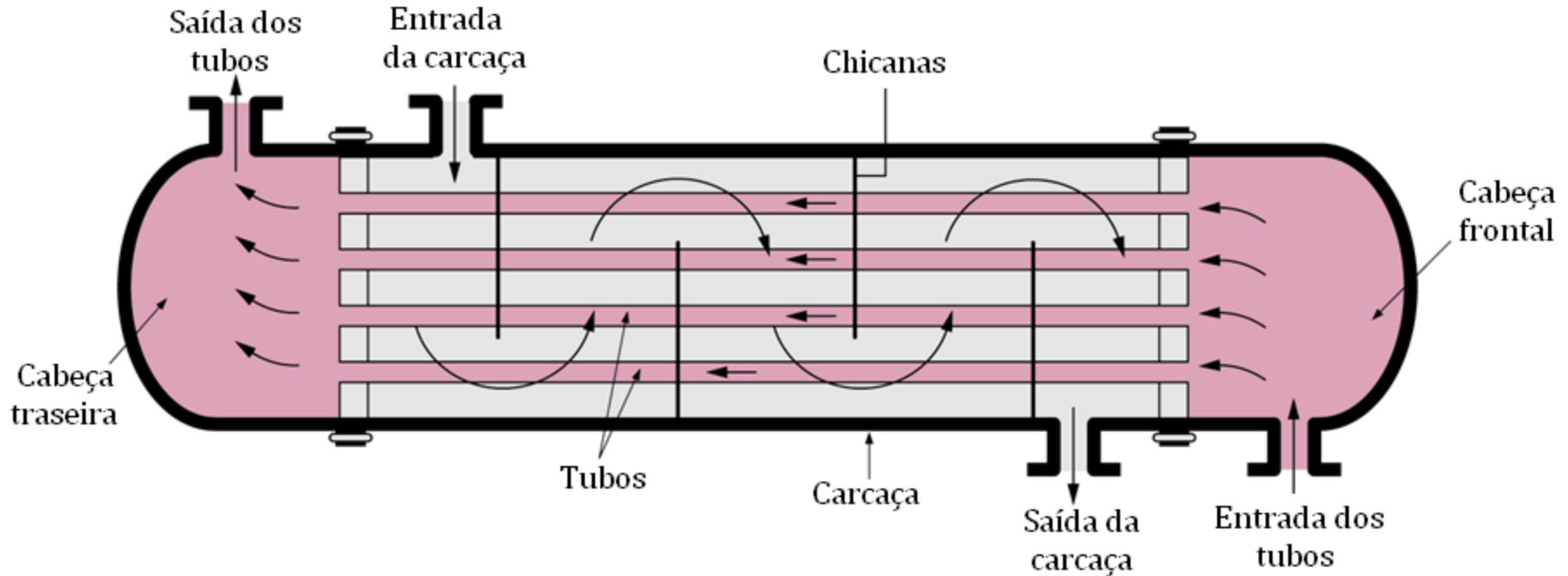


(a) Ambos os fluidos não misturados



(b) Um fluido mmisturado e outro não

14.1 Trocador de Calor de Casco e Tubos

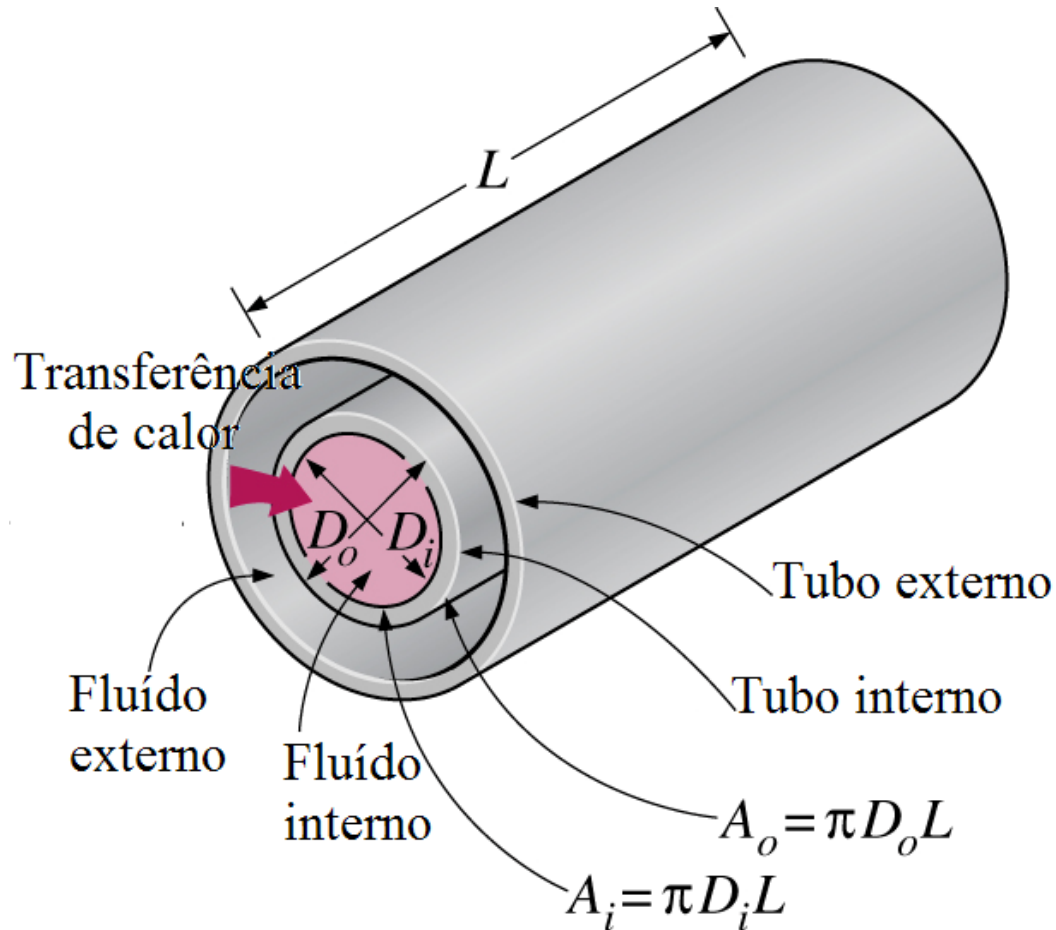


Trocador de Calor casco e tubos com um passe no casco e um passe nos tubos (Contracorrente).

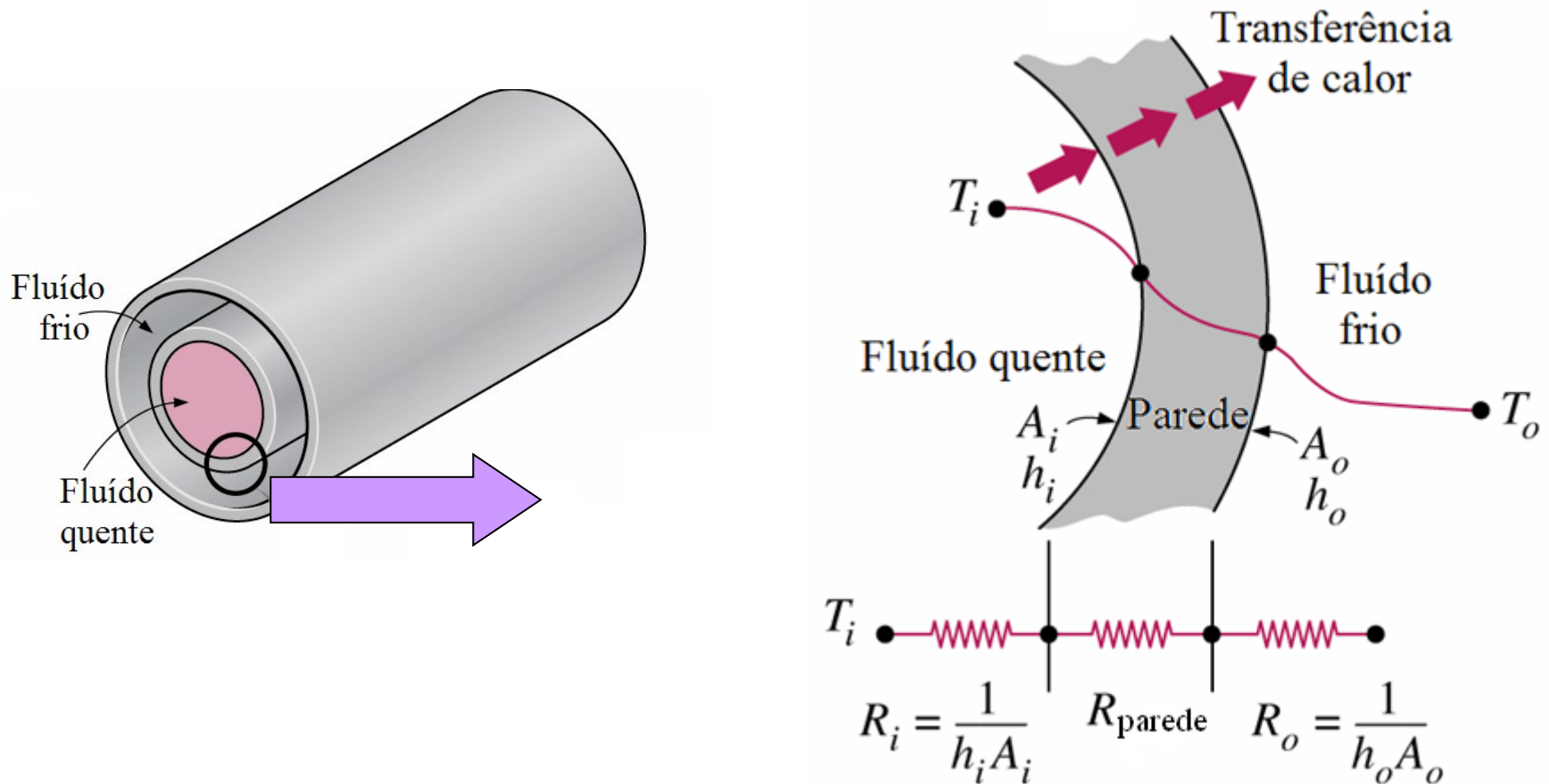
14.2 O Coeficiente Global De Transferência De Calor

O Coeficiente Global De Transferência de Calor é um coeficiente que caracteriza a resistência térmica total à transferência de calor entre dois fluidos (quente e frio). O efeito da resistência térmica pode ser incluído nos cálculos através das formulas seguintes:

14.2 Coeficiente Global De Transferência De Calor



14.2 Coeficiente Global De Transferência De Calor



14.2 O Coeficiente Global De Transferência De Calor

A resistência térmica para um trocador do tubo e carcaça representa-se por (Aula 5):

$$R_{parede} = \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi kL} \quad (14.1)$$

Onde k é a condutividade térmica e L o comprimento do tubo. A resistência térmica total passa a ser:

$$R = R_{total} = R_i + R_{parede} + R_o = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (14.2)$$

14.2 O Coeficiente Global De Transferência De Calor

A taxa de troca de calor entre os dois fluidos é dada por:

$$Q = \frac{\Delta T}{R} = UA\Delta T = U_i A_i \Delta T = U_o A_o \Delta T \quad (14.3)$$

Sendo U o coeficiente global de transferência de calor em $W/m^2 \cdot ^\circ C$

$$\frac{1}{UA_s} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} = R = \frac{1}{h_i A_i} + R_{parede} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (14.4)$$

14.2 O Coeficiente Global De Transferência De Calor

Geralmente os trocadores de calor tem duas superfícies que não são iguais, a interna e a externa, daí terem também dois Coeficientes

Globais de Transferência de calor que não são iguais $U_i \neq U_o$. $U_i =$

U_o somente se $A_i = A_o$

Quando o tubo é muito delgado geralmente despreza-se a

resistência térmica da parede deste ($R_{\text{parede}} \approx 0$) daí:

$$\frac{1}{U} \approx \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}$$

(14.5)

14.2 O Coeficiente Global De Transferência De Calor (caso de alhetas)

As alhetas, por aumentarem a área superficial diminuem a resistência à transferência convectiva de calor, influenciando assim no coeficiente global de transferência de calor.

Se o tubo tiver alhetas num dos lados, a área total desse lado será dada por:

$$A_s = A_{total} = A_{alhetas} + A_{\tilde{n} \text{ alhetada}} \quad (14.6)$$

Se as alhetas não se aproximarem de isotérmicas escreve-se:

$$A_s = A_{\tilde{n} \text{ alhetada}} + \eta_{alhetas} A_{alhetas} \quad (14.7)$$

Valores representativos de coeficientes globais de transferencia de calor

Tipo de trocador de Calor	U, W/m ² ·C
Trocadores de calor de água-para-água	850 – 1700
Trocadores de calor de água-para-óleo	100 – 350
Água- para-gasolina ou querosene	300 – 1000
Aquecedores de água de alimentação tratada	1000 – 8500
Vapor-para-óleo combustível leve	200 – 400
Vapor-para-óleo combustível pesado	50 – 200
Condensadores de vapor	1000 – 6000
Condensadores de Freon (resfriados com água)	300 – 1000
Condensadores de Amónia (água nos tubos)	800 – 1400
Condensadores de Álcool (água nos tubos)	250 – 700
Gás – para gás	10 – 40
Água para ar em tubos alhetados (agua nos tubos)	30 – 60 (1)
	400 – 850 (2)
Vapor - para ar em tubos alhetados (vapor nos tubos)	30 – 300 (1)
	400 – 4000 (2)

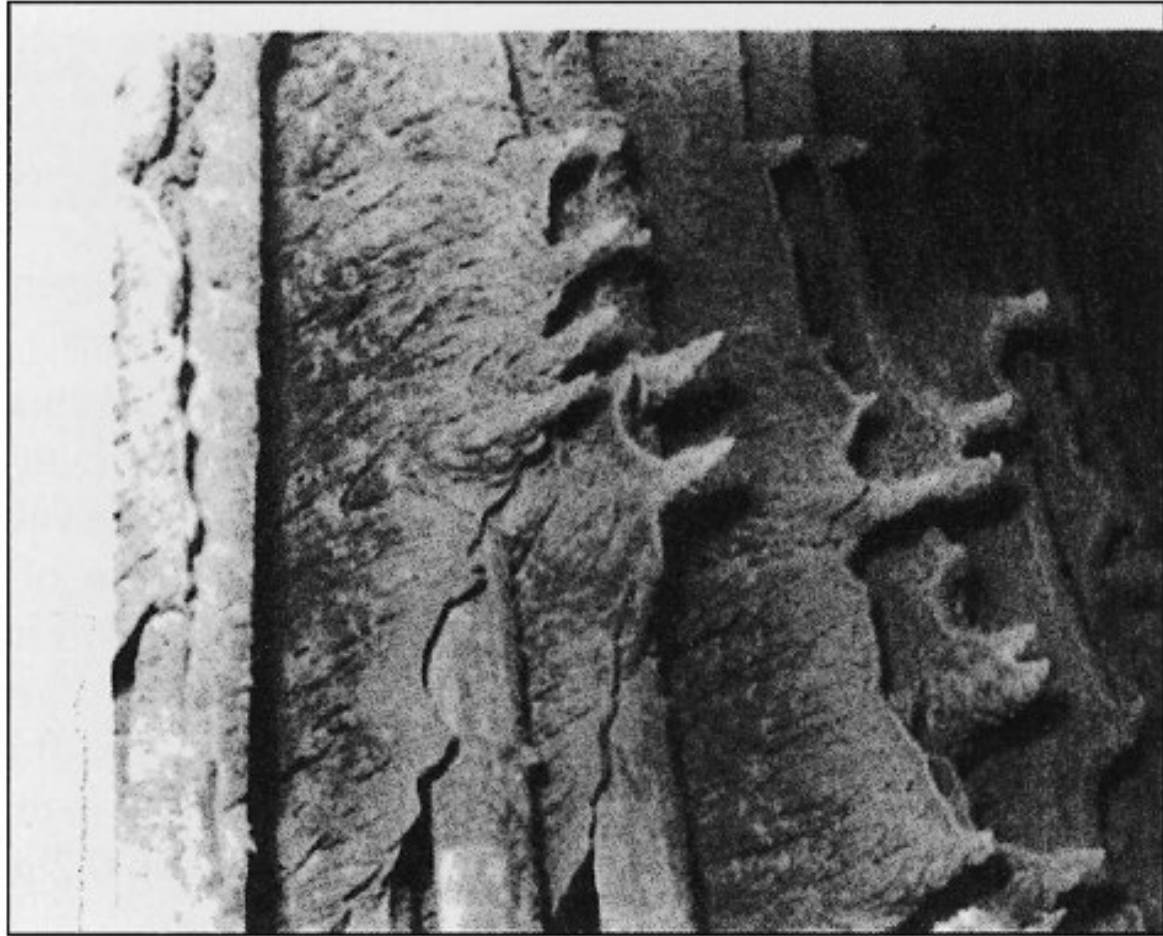
(1) Baseado na área do lado do ar

(2) Baseado na área do lado da água ou do vapor

14.2.1 Factores de incrustação

Durante a operação normal de um trocador de calor, as superfícies ficam sujeitas a incrustações de impurezas dos fluidos, à formação de ferrugem e a outras reacções entre os materiais do fluido e das paredes, aumentando assim a resistência à transferência de calor entre os fluidos, influenciando deste modo no coeficiente de transferência de calor.

14.2.1 Factores de incrustação



14.2.1 Factores de incrustação

Para um termopermutador de tubo e carcaça sem alhetas pode-se escrever:

$$\begin{aligned} \frac{1}{UA} &= \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} \\ &= \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R_{f,i}''}{A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi kL} + \frac{R_{f,o}''}{A_o} + \frac{1}{h_o A_o} \end{aligned} \quad (14.8)$$

Onde:

$A_i = \pi D_i L$ e $A_o = \pi D_o L$ são as áreas das superfícies interna e externa e $R_{f,i}$ e $R_{f,o}$ os factores de incrustação para as superfícies interna e externa.

14.2.1 Factores de incrustação

Fluído	R''_f (m².K/W)
Água do mar e água de caldeira tratada (abaixo de 50°C)	0,0001
Água do mar e água de caldeira tratada (acima de 50°C)	0,0002
Água do rio (abaixo de 50°C)	0,0002-0,001
Gasóleo	0,0009
Líquidos refrigerantes	0,0002
Vapor	0,0001

14.3 Analise de Termopermutadores de Calor

Para um trocador de calor, o calor transferido por cada elemento de área para um fluido frio na base da Primeira Lei da Termodinâmica escreve-se:

$$Q = \dot{m}_f C_{pf} (T_{f,out} - T_{f,in}) \quad (14.9)$$

Para o fluido quente escreve-se:

$$Q = \dot{m}_q C_{pq} (T_{q,in} - T_{q,out}) \quad (14.10)$$

Onde:

\dot{m}_f, \dot{m}_q - são os fluxos de massas

C_{pf}, C_{pq} - calores específicos

$T_{f,out}, T_{q,out}$ - temperaturas de saída

$T_{f,in}, T_{q,in}$ - temperaturas de entrada

14.3 Analise de Termopermutadores de Calor

Geralmente na análise de termopermutadores de calor é comum combinar o fluxo mássico com o calor específico do fluido obtendo a **capacidade calorífica**

$$C_q = \dot{m}_q C_{pq} \quad \text{e} \quad C_f = \dot{m}_f C_{pf} \quad (14.11)$$

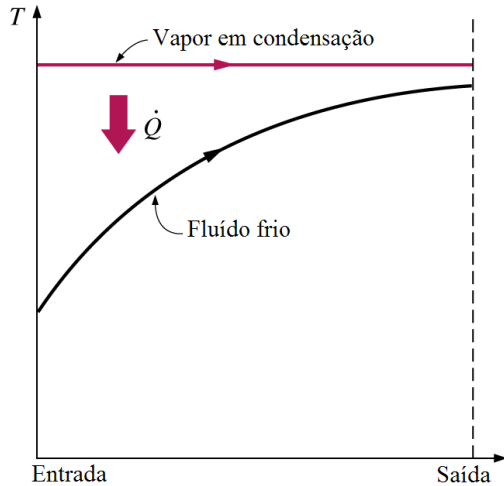
Com a definição de capacidade calorífica que se fez atrás pode voltar a escrever-se as Equações 14.9 e 14.10 do seguinte modo:

$$Q = C_f (T_{f,out} - T_{f,in}) \quad (14.12)$$

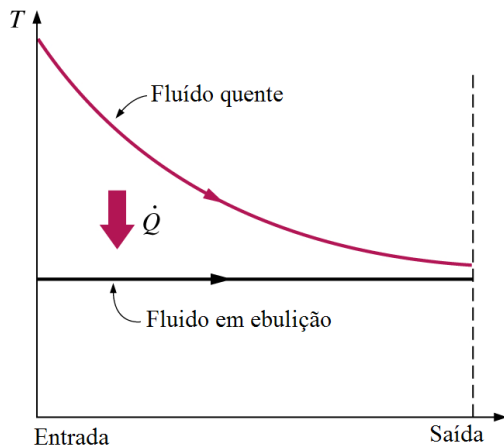
e

$$Q = C_q (T_{q,in} - T_{q,out}) \quad (14.13)$$

14.3 Analise de Termopermutadores de



(a) Condensador ($C_h \rightarrow \infty$)



(b) Caldeira ($C_c \rightarrow \infty$)

Devem ser considerados dois casos particulares de trocadores de calor, usados na prática, que são os condensadores e os vaporizadores. Um dos fluidos no dispositivo está em mudança de fase e o processo de troca de calor é dado por:

$$Q = \dot{m} h_{fg} \quad (14.14)$$

Durante a mudança de fase o fluido absorve ou liberta uma grande quantidade de calor então escreve-se, $C = mC_p \rightarrow \infty$ quando $\Delta T \rightarrow 0$. A troca de calor pode-se escrever usando a lei de resfriamento de Newton do seguinte modo:

$$Q = UA_s \Delta T_m \quad (14.15)$$

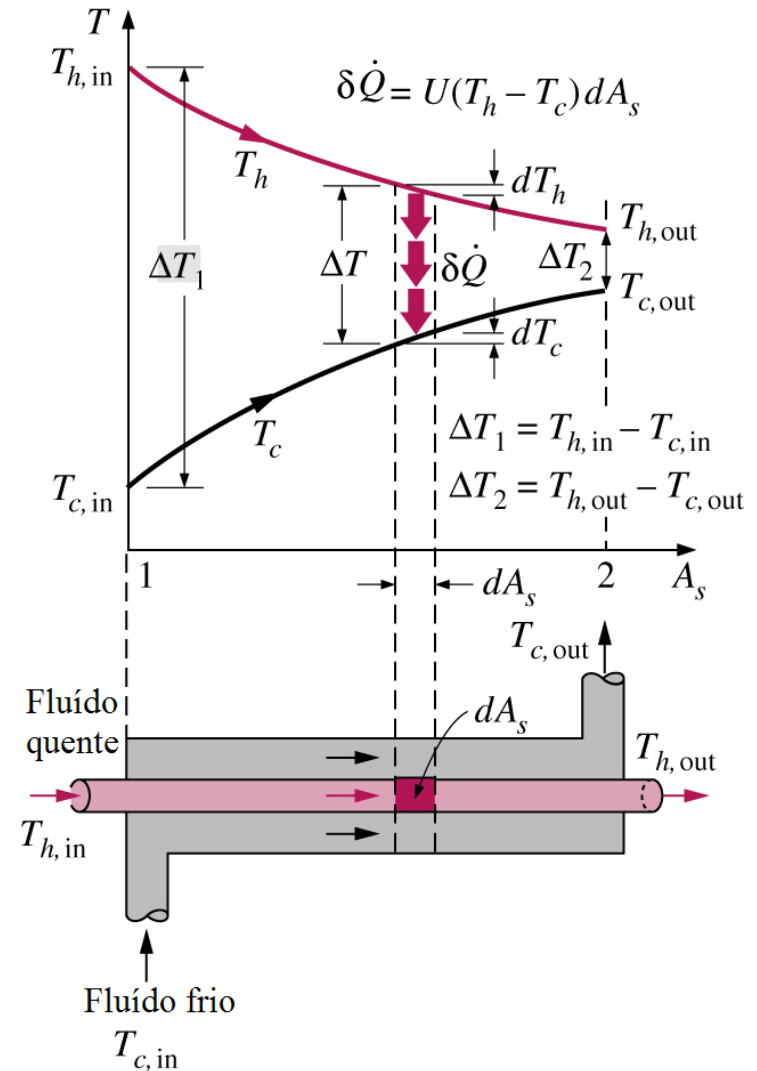
14.3.1 Método da Diferença Média Logarítmica

Assumindo que a superfície externa do termopermutador de calor está isolada, o que faz admitir que qualquer troca de calor se faz entre os dois fluidos, desprezando a energia cinética e potencial o balanço de energia em cada secção diferencial do trocador pode ser expressa como:

$$\delta Q = -\dot{m}_q C_{pq} dT_q \quad (14.16)$$

e

$$\delta Q = \dot{m}_f C_{pf} dT_f \quad (14.17)$$



14.3.1 Método da Diferença Média Logarítmica

Resolvendo as Equações 14.16 e 14.17 em ordem a dT_q e dT_f obtém-se:

$$dT_q = -\frac{\delta Q}{\dot{m}_q C_{pq}} \quad (14.18)$$

e

$$dT_f = \frac{\delta Q}{\dot{m}_f C_{pf}} \quad (14.19)$$

Fazendo a sua diferença obtém-se:

$$dT_q - dT_f = d(T_q - T_f) = \delta Q \left(\frac{1}{\dot{m}_q C_{pq}} - \frac{1}{\dot{m}_f C_{pf}} \right) \quad (14.20)$$

14.3.1 Método da Temperatura Média Logarítmica

A troca de calor numa secção diferencial do trocador de calor também se pode escrever:

$$\delta Q = U (T_q - T_f) dA_s \quad (14.21)$$

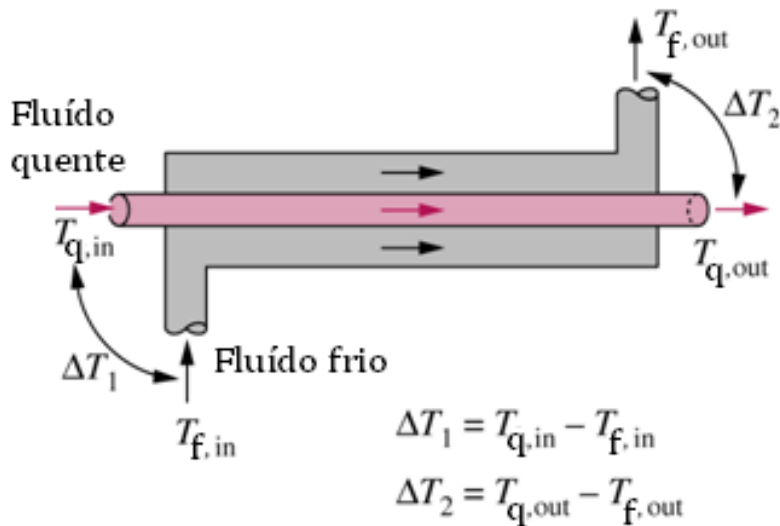
Substituindo esta equação na Equação 14.20 e fazendo alguns arranjos

$$\frac{d(T_q - T_f)}{T_q - T_f} = -U dA_s \left(\frac{1}{\dot{m}_q C_{pq}} + \frac{1}{\dot{m}_f C_{pf}} \right) \quad (14.22)$$

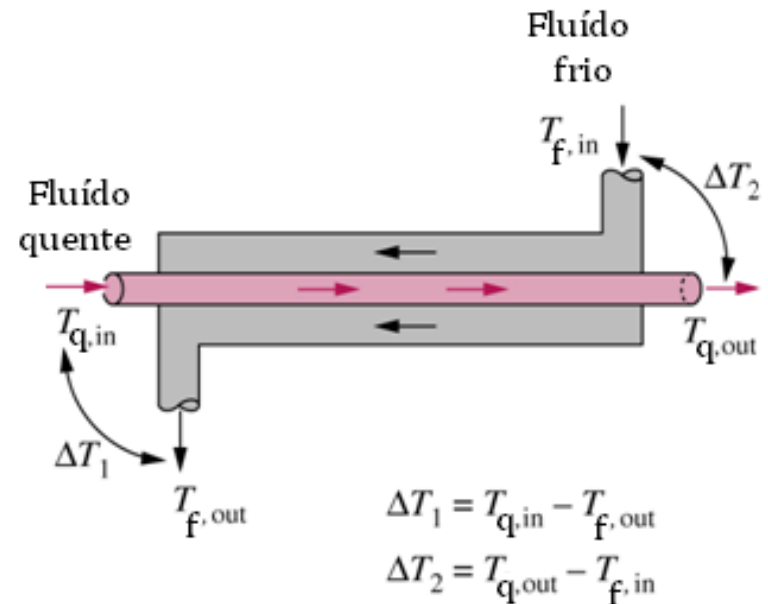
Integrando desde a entrada até a saída do termopermutador obtém-se:

$$\ln \frac{T_{q,out} - T_{f,out}}{T_{q,in} - T_{f,in}} = -UA_s \left(\frac{1}{\dot{m}_q C_{pq}} + \frac{1}{\dot{m}_f C_{pf}} \right) \quad (14.23)$$

14.3.1 Método da Diferença Média Logarítmica



Fluxos concorrentes



Fluxos contracorrente

14.3.1 Método da Diferença Média Logarítmica

Finalmente resolvendo as Equações 14.9 e 14.10 para $m_f C_{pf}$ e $m_q C_{pq}$ e substituindo na Equação 14.23, depois de alguns arranjos obtém-se

$$Q = UA_s \Delta T_{lm} \quad (14.24)$$

Onde:

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (14.25)$$

É a **temperatura média logarítmica** que é limitada a trocadores de calor de fluxos paralelos e contra-corrente.

14.3.2 Trocadores de Calor de Multipasses e de Fluxo Cruzado (uso do factor de correcção)

Nos casos de trocadores de calor de fluxo cruzado e de multipasses não se usa a Equação 14.25 é necessário multiplicar a diferença media logaritmica que está relacionada com a dos fluxos em contracorrente por um factor F

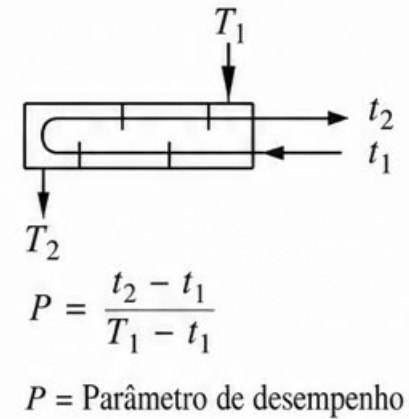
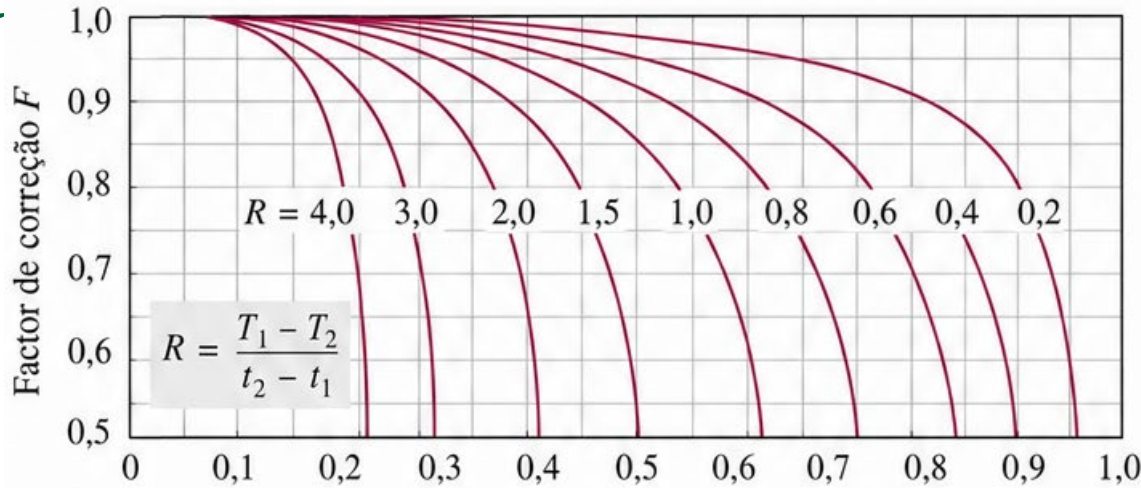
$$\Delta T_{lm} = F \Delta T_{lm,FC} \quad (14.26)$$

O factor F determina-se de gráficos por meio de duas relações de temperaturas:

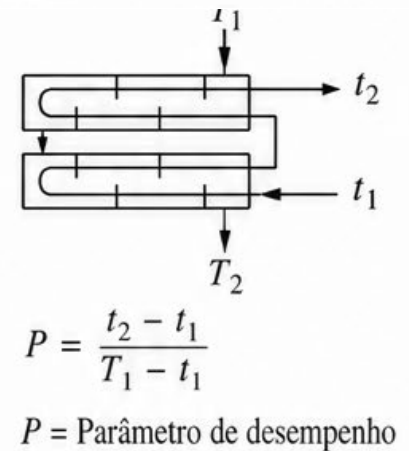
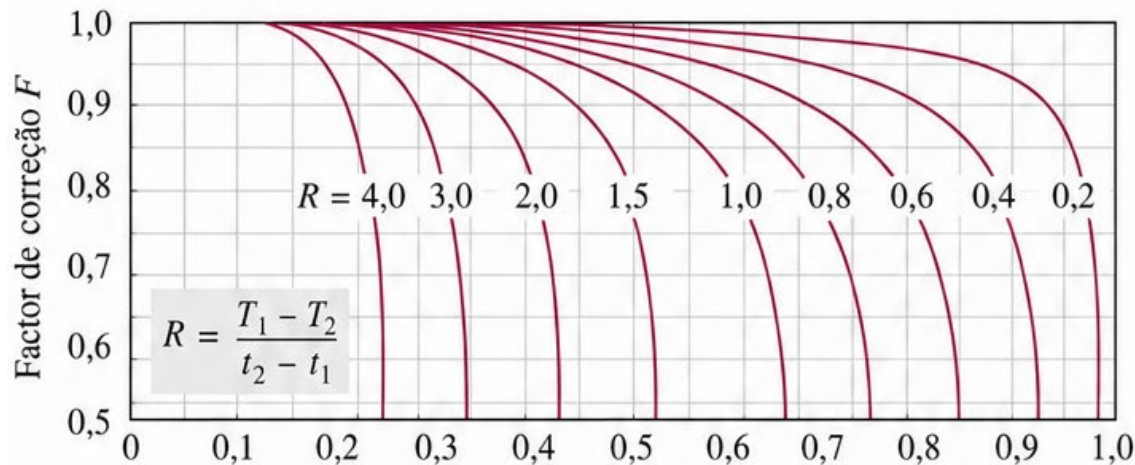
$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \quad (14.27)$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_1 - t_2} = \frac{(\dot{m}Cp)_{\text{lado do tubo}}}{(\dot{m}Cp)_{\text{lado da carcaca}}} \quad (14.28)$$

Factores de correcção para trocadores de tubos e carcaça de correntes cruzadas

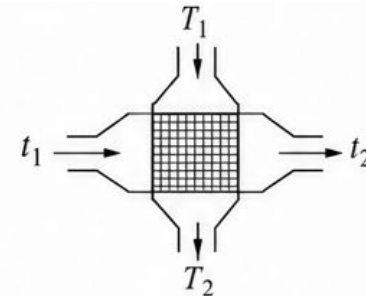
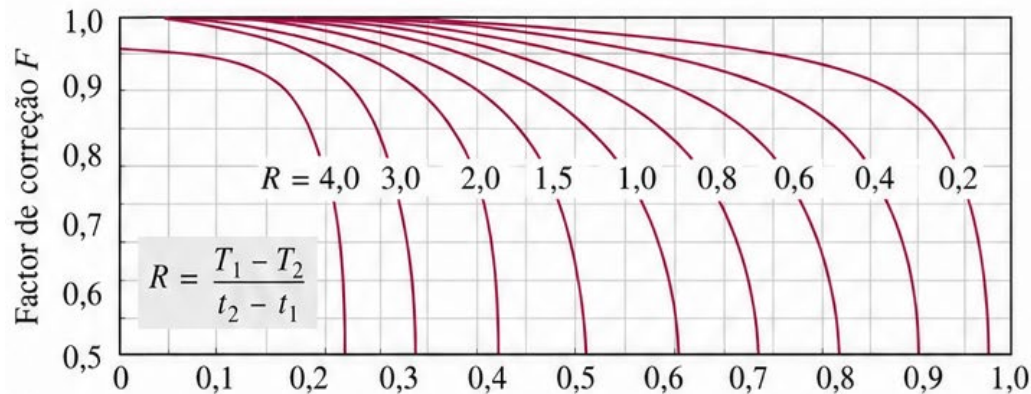


(a) Uma passagem na carcaça e 2, 4, 6, etc. (qualquer múltiplo de 2), passagens nos tubos



(b) Duas passagens na carcaça e 4, 8, 12, etc. (qualquer múltiplo de 4), passagens nos tubos

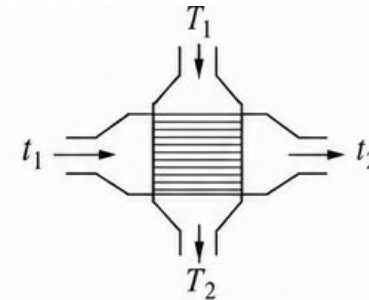
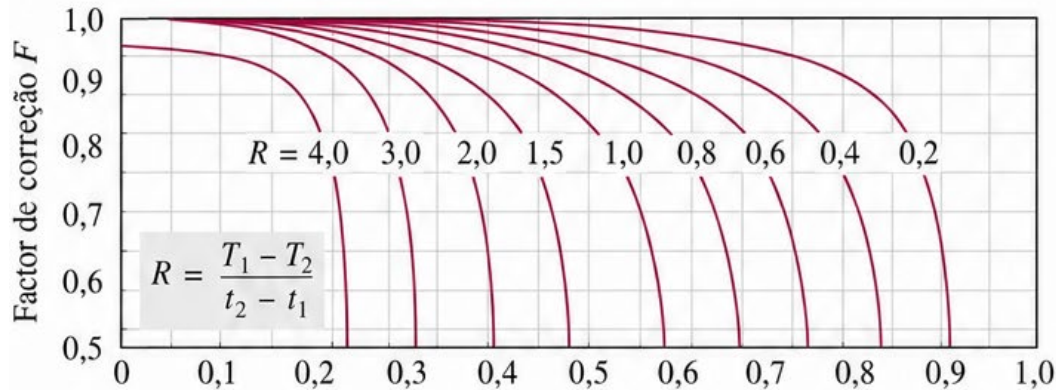
Factores de correcção para trocadores de tubo e carcaça e de correntes cruzadas



$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$$

P = Parâmetro de desempenho

(c) Escoamento cruzado de passagem simples com ambos os fluidos *não misturados*



$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$$

P = Parâmetro de desempenho

(d) Escoamento cruzado de passagem simples com um fluido *misturado* e o outro *não misturado*

14.3.3 Método do NUT (Número de unidades de transferência)

O método da diferença média logarítmica de temperatura é de fácil utilização na análise de trocadores de calor, quando as temperaturas de entrada e de saída dos fluidos quente e frio são conhecidos ou podem ser determinadas a partir do balanço energético. Uma vez ΔT_{lm} , os fluxos de massa e o coeficiente global de transferência de calor estejam disponíveis, a área da superfície de transferência de calor do trocador de calor pode ser determinada a partir de:

$$Q = UA_s \Delta T_{lm} \quad (14.29)$$

14.3.3 Método do NUT (Número de unidades de transferência)

O procedimento a ser seguido no processo de seleção pelo método NUT é composto por cinco etapas a saber:

1. Seleciona-se o tipo de trocador de calor adequado para a aplicação;
2. Determina-se a temperatura desconhecida de entrada ou de saída e a taxa de transferência de calor, utilizando o balanço energético;
3. Calcula-se a diferença de temperatura média logarítmica ΔT_{lm} e o factor de correção F , se necessário;
4. Obtem-se (ou seleciona-se) calculando o valor do coeficiente global de transferência de calor U ;
5. Calcula-se a área da superfície de transferência de calor A_s .

14.3.3 Método do NUT (Número de unidades de transferência)

É uma questão simples o uso do método ΔT_{lm} para analisar um trocador de calor quando as temperaturas de entrada dos fluidos e as temperaturas de saída são conhecidas, especificadas ou se determinam-se com facilidade pelas expressões do balanço de energia. Mas quando se conhecem somente as temperaturas de entrada este método exige um processo iterativo. Neste caso é preferível usar uma outra abordagem, o método denominado **efectividade-NUT**.

14.3.3 Método do NUT

Para eliminar as iterações na procura de solução dos problemas atrás referidos, Kays e London sugeriram o método chamado efectividade-NUT em 1955, o que simplificou bastante o dimensionamento de trocadores de calor.

Este método é baseado num parâmetro adimensional chamado efectividade de transferência de calor ε , que é definido como:

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{\max}} = \frac{\text{Taxa real de transferencia}}{\text{Taxa maxima possivel de transferencia}} \quad (14.30)$$

14.3.3 Método do NUT

A taxa real de transferência de calor pode ser determinada de:

$$Q = C_f (T_{f,out} - T_{f,in}) = C_q (T_{q,in} - T_{q,out}) \quad (14.31)$$

Para determinar a máxima possibilidade de transferência de calor é preciso conhecer-se a diferença máxima de temperaturas que é entre a temperatura máxima do fluido quente e a mínima do fluido frio.

$$\Delta T_{\max} = T_{q,in} - T_{f,in} \quad (14.32)$$

14.3.3 Método do NUT

Geralmente o calor máximo transferido num termopermutador ocorre no fluido que tem o mínimo mc pois pelo balanço de energia, o calor recebido por um fluido é igual ao calor perdido pelo outro:

$$Q_{\max} = C_{\min} (T_{q,in} - T_{f,in}) \quad (14.33)$$

Onde:

$$C_{\min} \text{ e o menor entre } C_q = \dot{m}_q C_{pq} \text{ e } C_f = \dot{m}_f C_{pf}$$

A determinação de Q_{\max} requer o conhecimento da temperatura de entrada dos fluidos quente e frio e do seu fluxo mássico. Se a efectividade for conhecida o calor real do trocador de calor determina-se de:

$$Q = \varepsilon \cdot Q_{\max} = \varepsilon \cdot C_{\min} (T_{q,in} - T_{f,in}) \quad (14.34)$$

14.3.3 Método do NUT

A efectividade de um trocador de calor depende da sua geometria bem como do arranjo dos fluxos. Desenvolve-se em seguida a determinação da efectividade para um trocador de tubo e carcaça com fluxos paralelos. A equação 14.23 pode-se transformar em:

$$\ln \frac{T_{q,out} - T_{f,out}}{T_{q,in} - T_{f,in}} = -\frac{UA_s}{C_f} \left(1 + \frac{C_f}{C_c} \right) \quad (14.35)$$

Resolvendo 14.30 para $T_{q,out}$ obtém-se:

$$T_{q,out} = T_{q,in} - \frac{C_f}{C_q} (T_{f,out} - T_{f,in}) \quad (14.36)$$

14.3.3 Método do NUT

Substituindo esta relação na equação 14.35, depois de fazer as adições e subtrações:

$$\ln \frac{T_{q,in} - T_{f,in} + T_{f,in} - T_{f,out} - \frac{C_f}{C_q} (T_{f,out} - T_{f,in})}{T_{q,in} - T_{f,in}} = -\frac{UA_s}{C_f} \left(1 + \frac{C_f}{C_q} \right)$$

Que se pode simplificar para:

$$\ln \left[1 - \left(1 + \frac{C_f}{C_c} \right) \frac{T_{f,out} - T_{f,in}}{T_{q,in} - T_{f,in}} \right] = -\frac{UA_s}{C_f} \left(1 + \frac{C_f}{C_c} \right) \quad \mathbf{(14.37)}$$

14.3.3 Método do NUT

Manipula-se a definição de efectividade para obter:

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{\max}} = \frac{C_f (T_{f,out} - T_{f,in})}{C_{\min} (T_{q,in} - T_{f,in})} \rightarrow \frac{(T_{f,out} - T_{f,in})}{(T_{q,in} - T_{f,in})} = \varepsilon \frac{C_{\min}}{C_f} \quad (14.38)$$

Substituindo este resultado na Equação 14.36 e resolvendo em ordem a efectividade, obtém-se a equação para um trocador de calor de fluxo paralelo:

$$\varepsilon_{\text{fluxo paralelo}} = \frac{1 - \exp \left[-\frac{UA_s}{C_f} \left(1 + \frac{C_f}{C_q} \right) \right]}{\left(1 + \frac{C_f}{C_q} \right) \frac{C_{\min}}{C_f}} \quad (14.39)$$

14.3.3 Método do NUT

Utilizando C_q ou C_f para obter o C_{\min} obtém-se finalmente:

$$\varepsilon_{\text{fluxo paralelo}} = \frac{1 - \exp\left[-\frac{UA_s}{C_{\min}}\left(1 + \frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right)\right]}{1 + \frac{C_{\min}}{C_{\max}}} \quad (14.40)$$

A relação de efectividade nos trocadores de calor geralmente envolve o grupo adimensional UA_s/C_{\min} . A esta grandeza chama-se número de unidades de transferência, por ser indicativo da dimensão do trocador de calor

14.3.3 Método do NUT

O número de unidades de transferência é dado por:

$$NUT = \frac{UA_s}{C_{\min}} = \frac{UA_s}{(\dot{m}C_p)_{\min}} \quad (14.41)$$

É conveniente definir outra grandeza adimensional chamada **relação de capacidade** que é dada por:

$$c = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \quad (14.42)$$

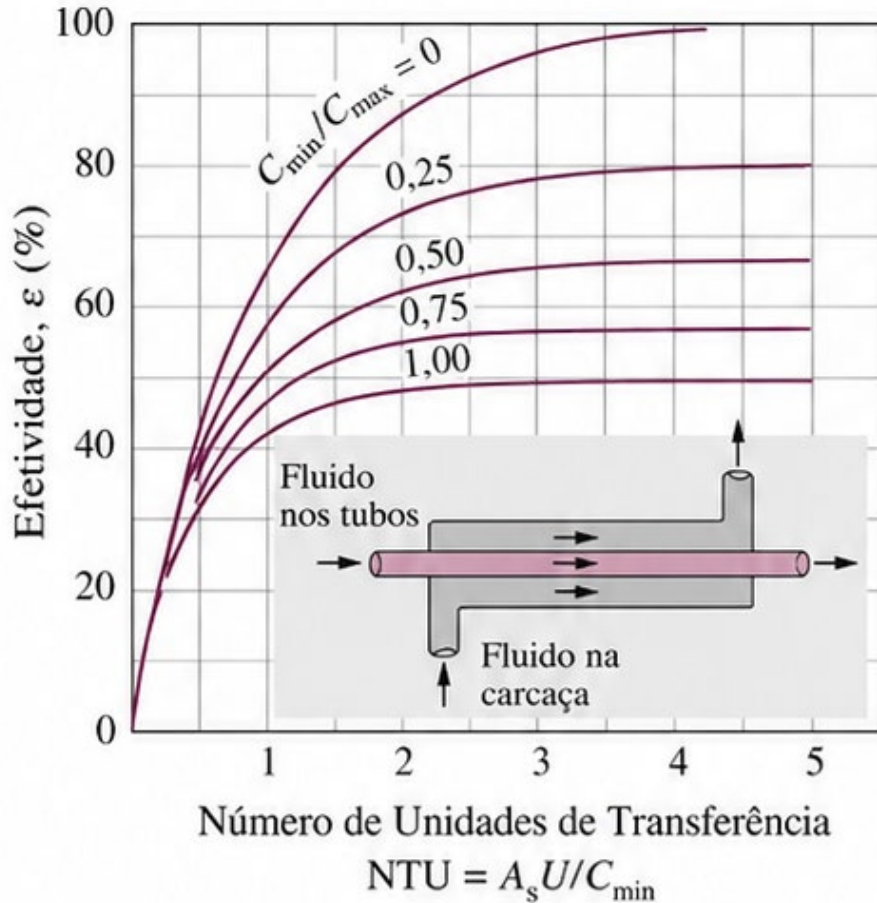
Então a efectividade é uma grandeza adimensional que é função do NUT e da relação de capacidade

$$\varepsilon = \text{função} \left(UA_s / C_{\min}, C_{\min} / C_{\max} \right) = \text{função} (NUT, c)$$

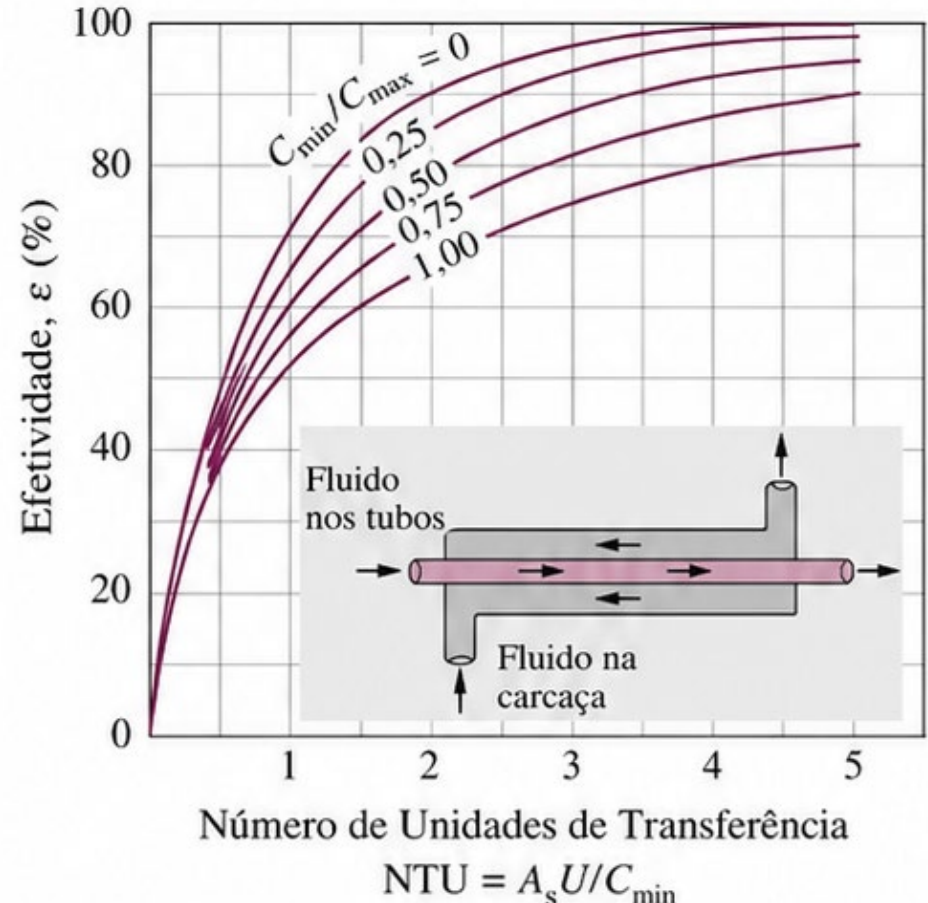
Relações de Efectividade

Tubo e carcaça	Fluxos concorrentes	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NUT(1+c)]}{1+c}$
	Fluxos contra-corrente	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NUT(1-c)]}{1 - c \exp[-NUT(1-c)]}$
Tubo e carcaça 2,4,...tubos		$\varepsilon = 2 \left\{ 1 + c + \sqrt{1+c^2} \frac{1 + \exp[-NUT\sqrt{1+c^2}]}{1 - \exp[-NUT\sqrt{1+c^2}]} \right\}^{-1}$
Fluxos cruzados (uma passagem)	Ambos os fluídos não misturados	$\varepsilon = 1 - \exp\left\{ \frac{NUT^{0,22}}{c} [\exp(-c NUT^{0,78}) - 1] \right\}$
	C_{\max} misturado C_{\min} não misturado	$\varepsilon = \frac{1}{c} (1 - \exp\{1 - c[1 - \exp(-NUT)]\})$
	C_{\min} misturado C_{\max} não misturado	$\varepsilon = 1 - \exp\left\{ -\frac{1}{c} [1 - \exp(-c \cdot NUT)] \right\}$
Todos os trocadores com $c=0$		$\varepsilon = 1 - \exp(-NTU)$

Efectividade de trocadores de calor

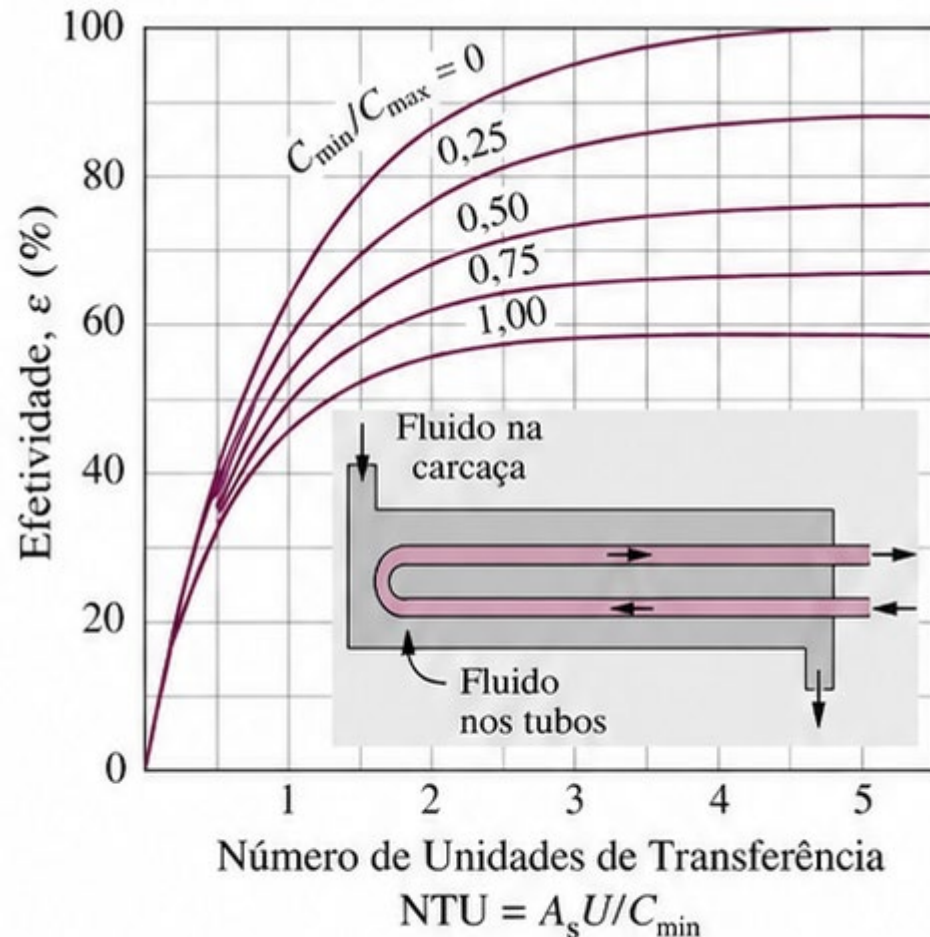


(a) Escoamento paralelo

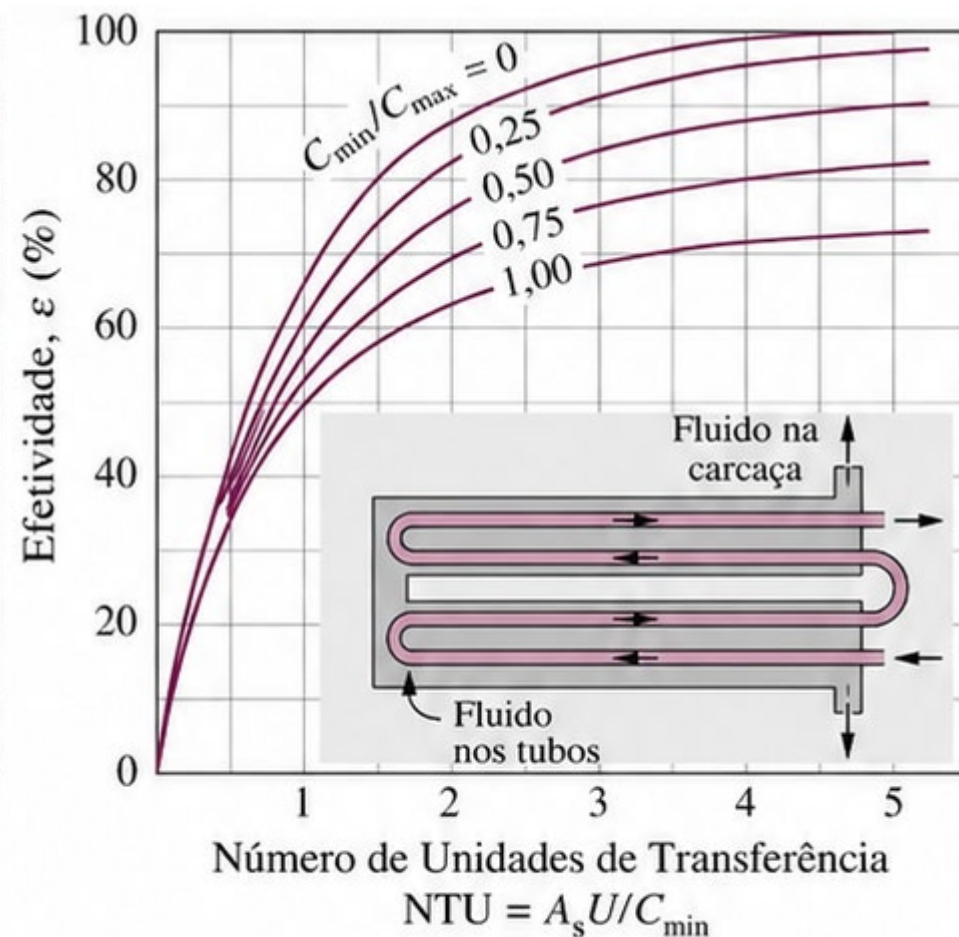


(b) Escoamento em contracorrente

Efectividade de trocadores de calor

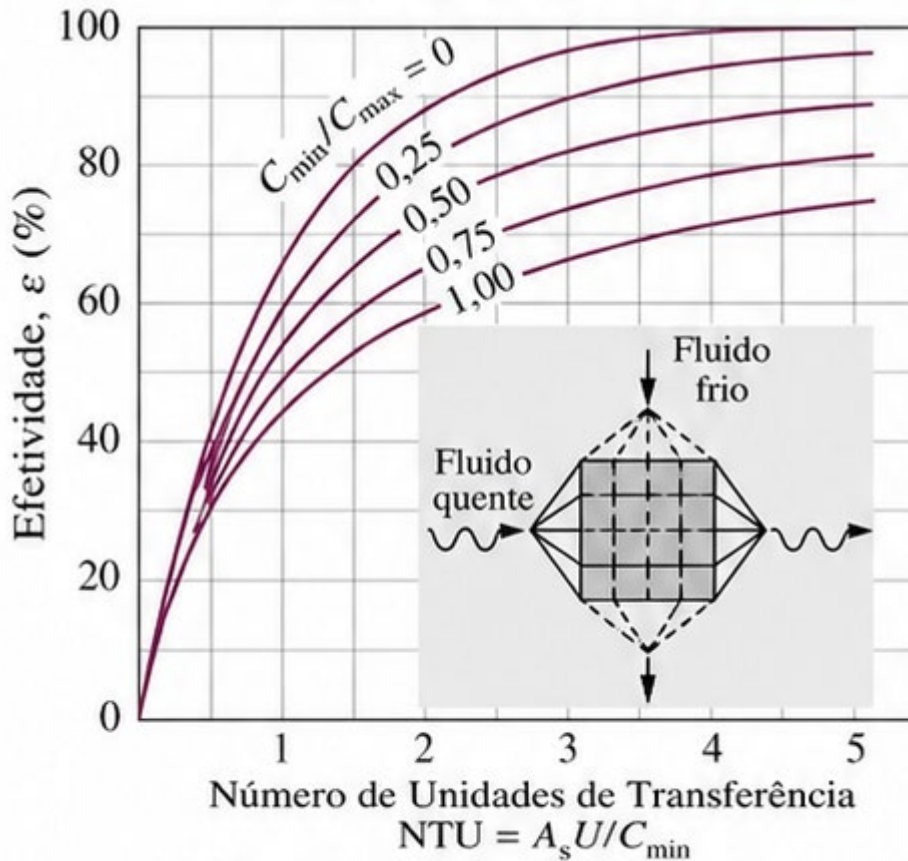


(c) Uma passagem na carcaça e 2, 4, 6, ... passagens nos tubos

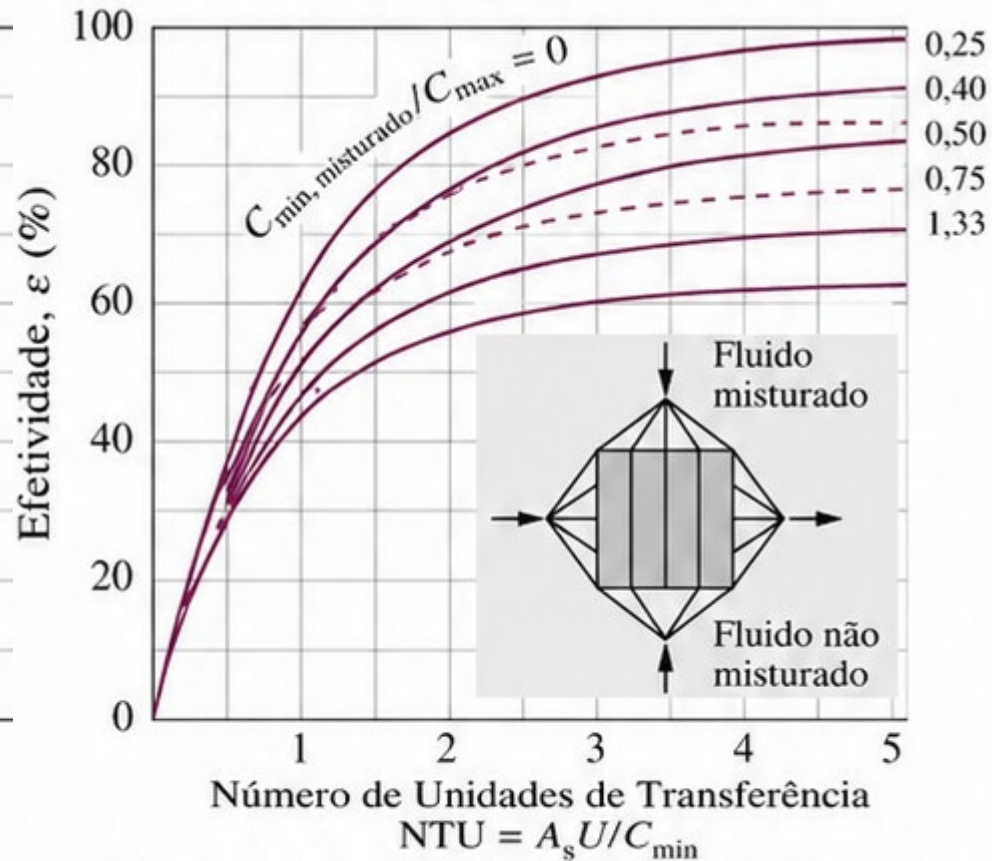


(d) Duas passagens na carcaça e 4, 8, 12, ... passagens nos tubos

Efectividade de trocadores de calor

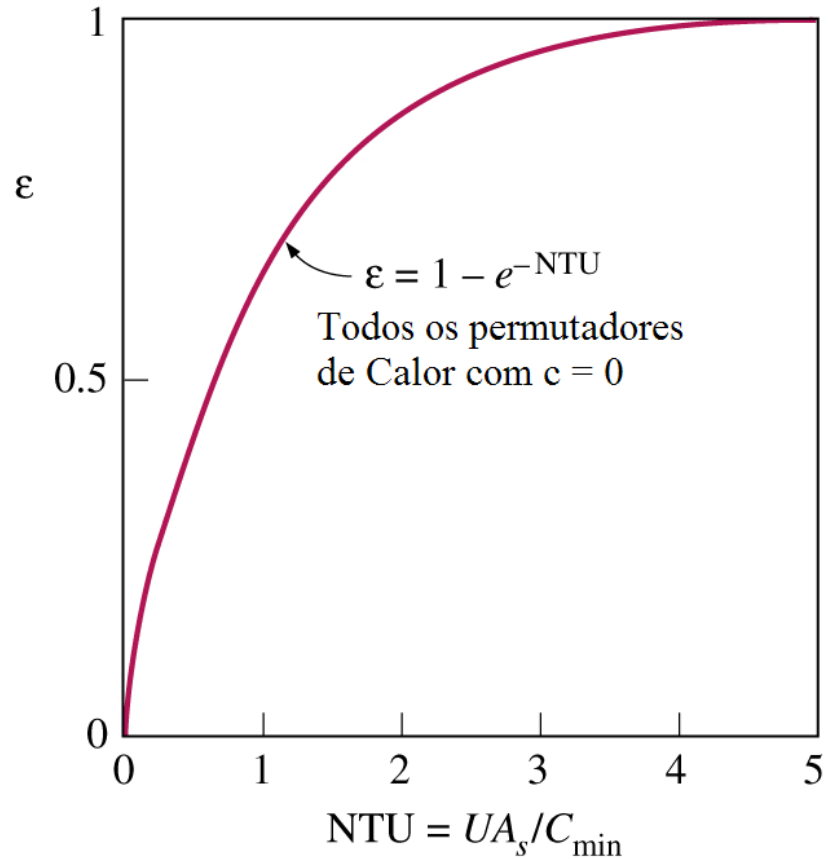
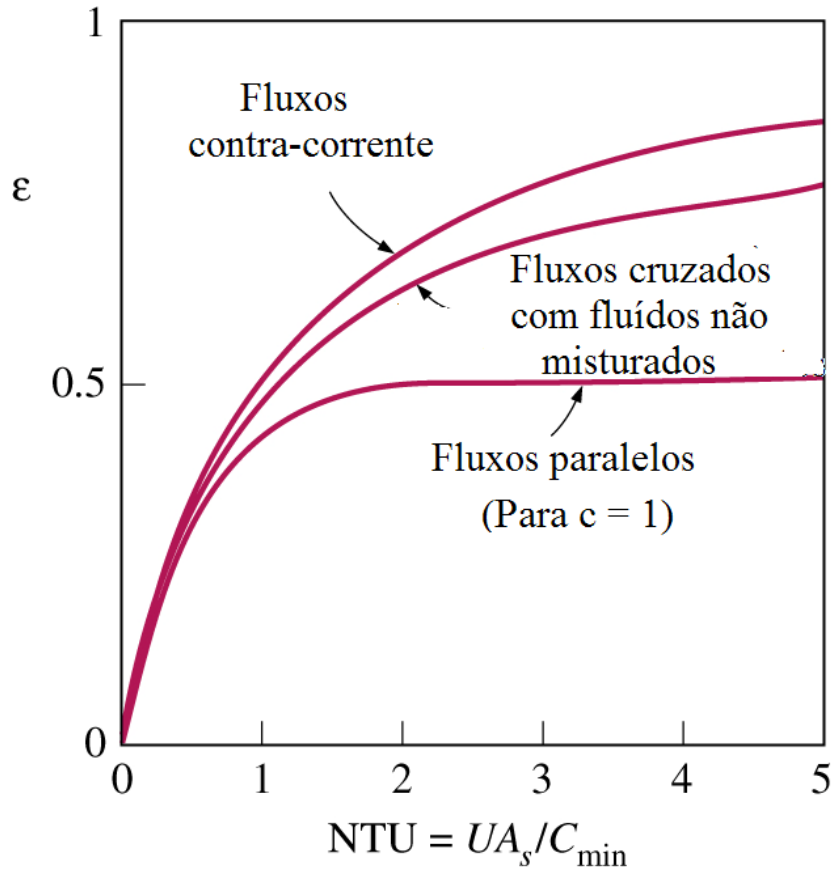


(e) Escoamento cruzado com ambos os fluidos não misturados



(f) Escoamento cruzado com um fluido misturado e o outro não misturado

Relações entre NTU e a efectividade



14.3.3 Método do NUT

A partir das relações de eficácia e dos gráficos, fazem-se as seguintes observações:

1. O valor da eficácia varia de 0 a 1. Ela aumenta rapidamente com NUT para valores pequenos (até cerca de $NUT = 1,5$), mas lentamente para valores maiores. Portanto, o uso de um trocador de calor com um grande NUT (geralmente maior que 3) e, portanto, de grande porte não pode ser justificada economicamente, uma vez que um grande aumento do NUT corresponde a um pequeno aumento de eficácia. Assim, um trocador de calor com muito alta eficácia pode ser altamente desejável do ponto de vista de transferência de calor mas indesejável do ponto de vista econômico.

14.3.3 Método do NUT

2. Para um dado NUT e relação de capacidade $c=C_{\min}/C_{\max}$, o permutador de calor em contra-corrente tem a maior eficácia, seguida de perto pelos trocadores de calor de fluxo cruzado, com ambos os fluidos não misturados. Como se pode esperar, os menores valores de eficácia são encontradas em trocadores de calor de fluxo concorrente;
3. A efetividade de um trocador de calor é independente da relação de capacidade c para valores de NUT inferiores a 0,3;

14.3.3 Método do NUT

4. O valor da relação de capacidade c varia entre 0 e 1. Para um determinado NUT, a eficácia atinge um máximo de $c = 0$ e um mínimo para $c = 1$. O caso $c = C_{\min}/C_{\max} \rightarrow 0$ corresponde a $C_{\max} \rightarrow \infty$, que acontece durante um processo de mudança de fase num condensador ou caldeira. Todas as relações de eficácia neste caso, reduzem-se a:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\max} = 1 - \exp(-NUT) \quad (14.43)$$

independentemente do tipo de trocador de calor, é de notar que a temperatura do condensado ou vapor permanece constante.

Relações de NUT para trocadores de calor

Tubo duplo	Fluxos concorrentes	$NUT = \frac{-\ln[1 - (1 + c)\varepsilon]}{1 + c}$
	Fluxos contra-corrente	$NUT = \frac{1}{(1 - c)} \ln\left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon c - 1}\right)$
Tubo e carcaça 2,4,...tubos		$NUT = -\frac{1}{\sqrt{1 + c^2}} \ln\left(\frac{2/\varepsilon - 1 - c - \sqrt{1 + c^2}}{2/\varepsilon - 1 - c + \sqrt{1 + c^2}}\right)$
	C_{\max} misturado C_{\min} não misturado	$NUT = -\ln\left[1 + \frac{\ln(1 - \varepsilon c)}{c}\right]$
	C_{\min} misturado C_{\max} não misturado	$NUT = -\frac{\ln[c \ln(1 - \varepsilon) + 1]}{c}$
Todos os trocadores com $c=0$		$NUT = -\ln(1 - \varepsilon)$

14.4 Dimensionamento da Bomba

A força necessária para mover um fluido através de um banco de tubos é proporcional à queda de pressão e quando a queda de pressão é conhecida, a potência de bombeamento requerida pode ser determinada de:

$$\dot{W}_{bomb} = \dot{V}\Delta P = \frac{\dot{m}\Delta P}{\rho} \quad (7.49)$$

Onde $\dot{V} = V(N_T S_T L)$ é o fluxo volumétrico e $\dot{m} = \rho\dot{V} = \rho V(N_T S_T L)$ o fluxo mássico do fluido que atravessa o banco de tubos.

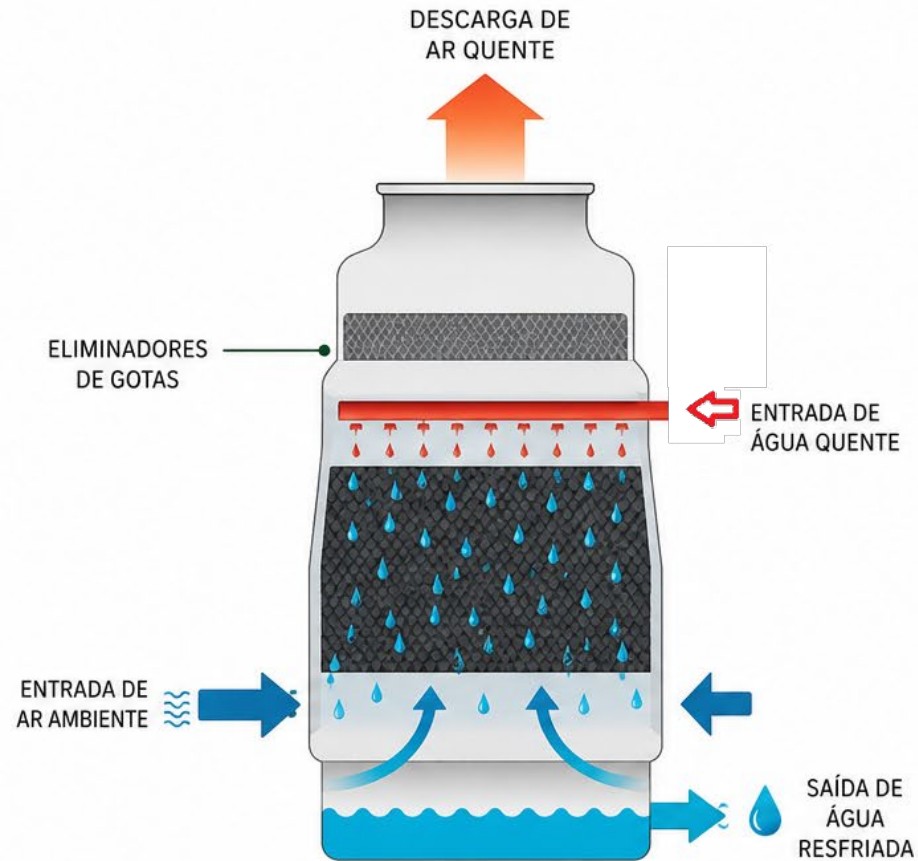
14.5 Aplicações de Trocadores de Calor

- Os trocadores de calor desempenham papel importante nas diversas áreas do conhecimento e pesquisa científica e aplicações tecnológicas.
- Na indústria são usados para aquecer ou resfriar fluidos para usos diversos. São encontrados sob a forma de torres de refrigeração, caldeiras, condensadores, evaporadores, leito fluidizado, recuperadores.
- Dispositivos de conforto ambiental e conservação de alimentos, como condicionadores de ar, aquecedores de água domésticos e frigoríficos se baseiam fundamentalmente em trocadores de calor.
- A produção de bebidas destiladas utiliza esta tecnologia; alambiques, por exemplo.

14.5 Aplicações de Trocadores de Calor

- A manutenção da temperatura adequada ao funcionamento dos motores de automóveis é conseguida através de radiadores.
- Podemos imaginar uma infinidade de aplicações para este dispositivo; a transferência otimizada e a conservação de energia sob a forma de calor é um desafio constante; trocadores de calor mais eficientes e baratos uma necessidade.
- Não poderia se deixar de lembrar que a facilidade de manutenção é uma condicionante do projecto, já que deverá ser executada periodicamente para garantir a eficiência do trocador; incrustações aumentam a resistência térmica, diminuem a taxa de troca de calor, portanto devem ser retiradas.

Torres de Refrigeração







Condensadores

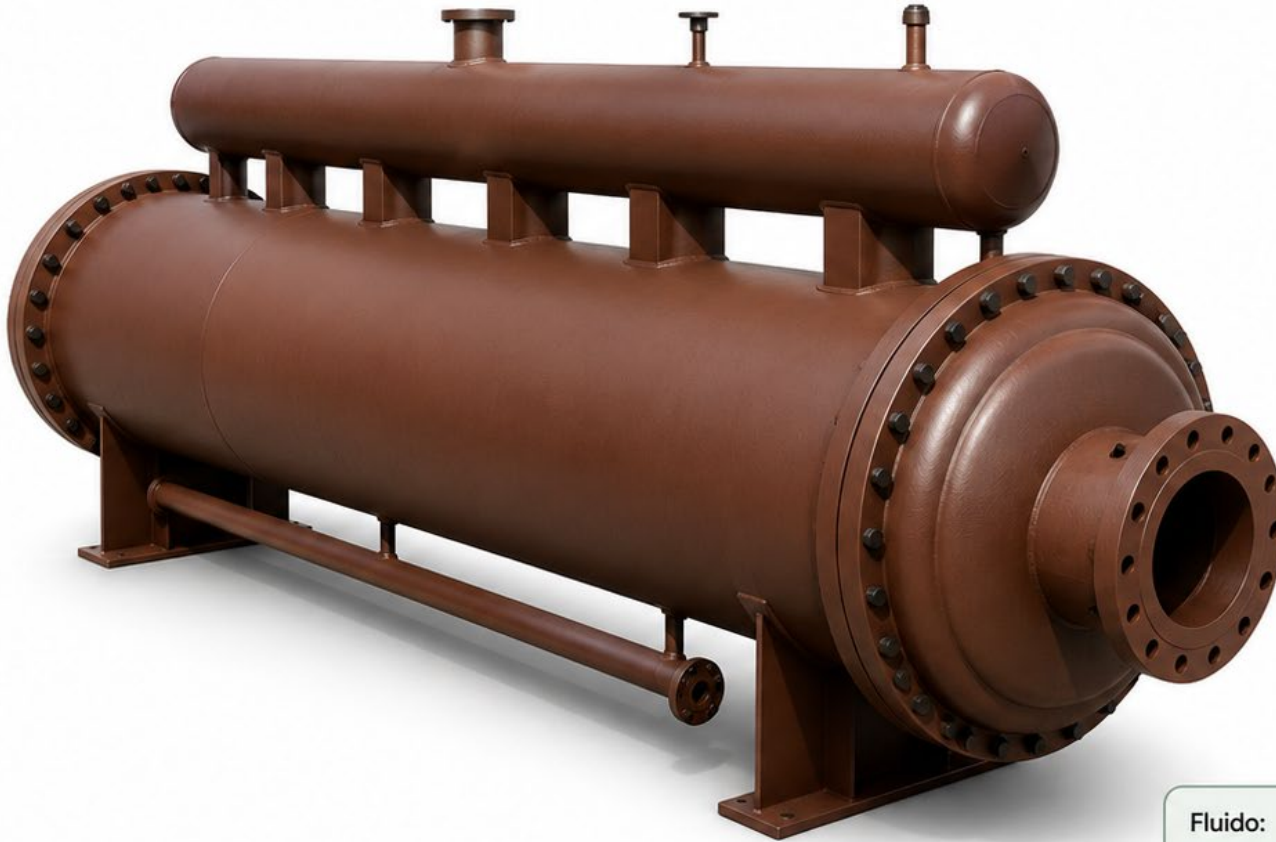


Condensador horizontal de gases com superfície de troca térmica de **350 m²**, utilizado na planta de extração de óleo vegetal.

Características principais

-  **Tipo:** Casco e tubos (fluxo horizontal)
-  **Aplicação:** Condensação de vapores e recuperação de líquidos
-  **Superfície de troca térmica:** 350 m²
-  **Utilização:** Sistema de vácuo e extração de óleo vegetal

Evaporadores



Descrição

Evaporador de amônia do tipo casco e tubos, com fluxo horizontal, projectado para elevado desempenho térmico e confiabilidade em sistemas industriais de refrigeração e processos.

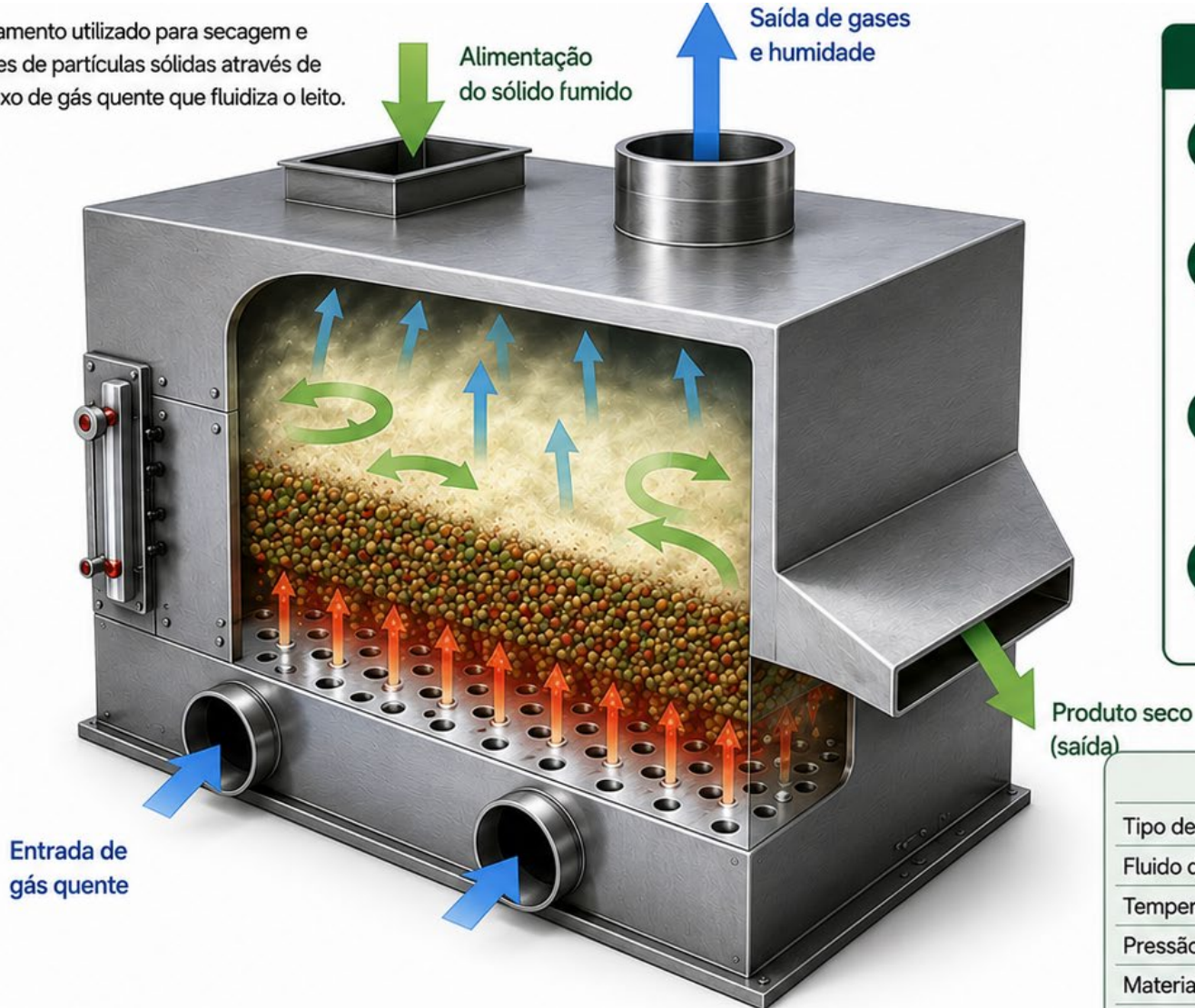
Características principais

-  **Tipo:**
Casco e tubos
(fluxo horizontal)
-  **Aplicação:**
Evaporação de
soluções (amônia)
-  **Capacidade térmica:**
2.400.000 Kcal/h
-  **Fluido de trabalho:**
Amônia
-  **Construção robusta**
para operação segura
e eficiente

Fluido:	Amônia
Arranjo:	Casco e tubos
Fluxo:	Horizontal
Capacidade:	2.400.000 Kcal/h
Aplicação:	Sistemas de refrigeração e processos industriais
Normas de projeto:	ASME / TEMA
Material:	Aço carbono

Leito Fluidizado

Equipamento utilizado para secagem e reações de partículas sólidas através de um fluxo de gás quente que fluidiza o leito.



Características principais



Processo eficiente:
Excelente transferência de calor e massa.



Operação uniforme:
Mistura adequada das partículas e temperatura homogênea.



Aplicações:
Secagem, calcinação, reação química, entre outras.



Versatilidade:
Adequado para diferentes tipos de partículas sólidas.

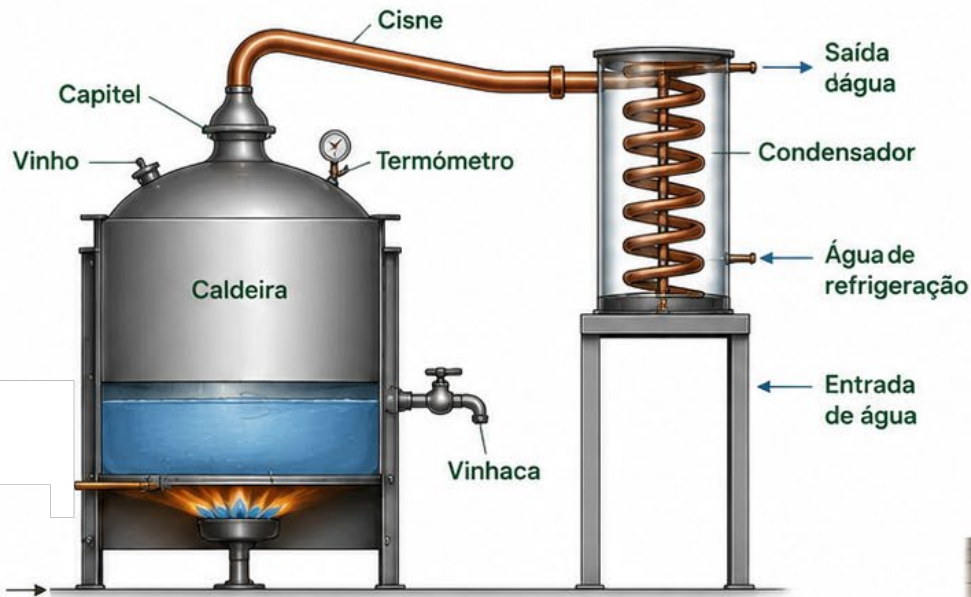
Informações Técnicas

Tipo de leito	Leito fluidizado
Fluido de trabalho	Ar quente / Gases
Temperatura típica	60 – 300 °C
Pressão de operação	Próxima à atmosférica
Material de construção	Aço carbono / Inox
Aplicação	Secagem de sólidos

Alambique

O alambique é um equipamento utilizado para a destilação de líquidos, separando componentes com diferentes pontos de ebulição, por meio do aquecimento e **condensação** dos vapores.

1. VISTA EM CORTE (ESQUEMA)



- Caldeira:** recipiente onde o líquido é aquecido até gerar vapor.
- Cisne:** tubo que conduz os vapores da caldeira ao condensador.
- Condensador:** serpentina onde os vapores são resfriados e condensados.
- Vinhaca:** resíduo líquido resultante do processo de destilação.

2. VISTA GERAL (INSTALAÇÃO)

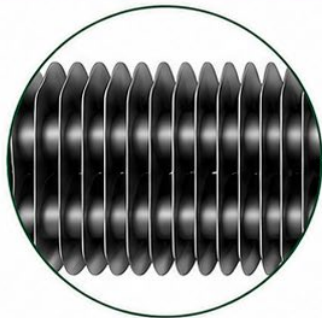


- O líquido é aquecido na caldeira.
- Os vapores sobem pelo cisne até o condensador.
- No condensador, os vapores são resfriados pela água e se transformam novamente em líquido.
- O destilado é coletado no recipiente de saída.

Radiador






O radiador é um trocador de calor que remove o calor de um fluido quente, transferindo-o para o ar ambiente, garantindo a eficiência e a segurança do sistema.

RADIADORES ALHETADOS



As alhetas aumentam a área de contato com o ar, promovendo maior transferência de calor.

CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS

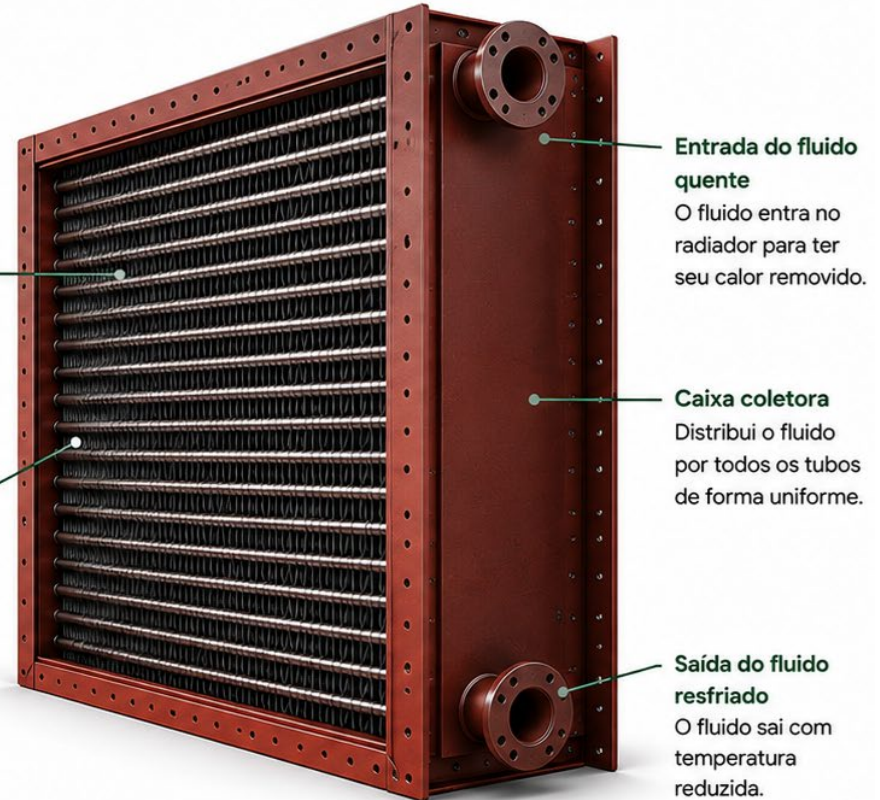
-  Alta eficiência térmica
-  Construção robusta e durável
-  Baixa perda de carga no fluido
-  Fácil manutenção e limpeza
-  Adequado para diversos fluidos e aplicações

Alletas

Aumentam a área de transferência de calor para o ar.

Tubos

Permitem a circulação do fluido quente.



PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Fluido quente entra no radiador (alta temperatura)



Fluido resfriado (baixa temperatura) retorna ao sistema

Ar ambiente