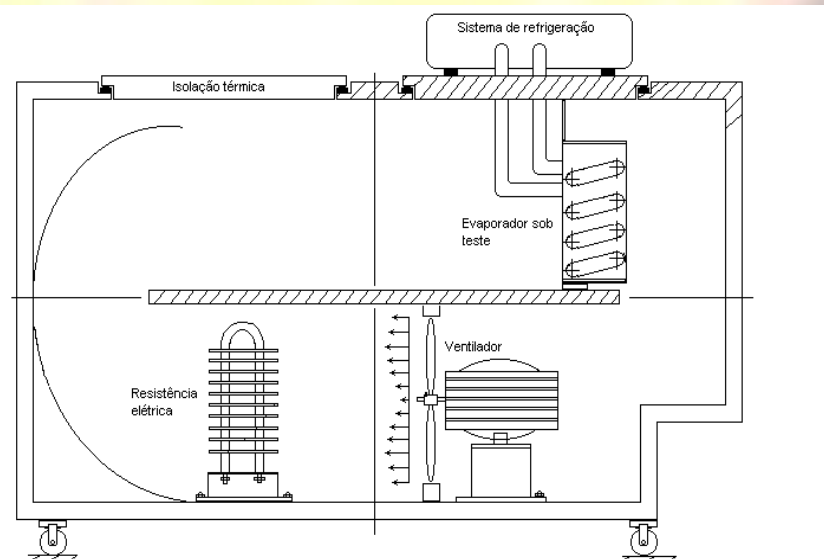
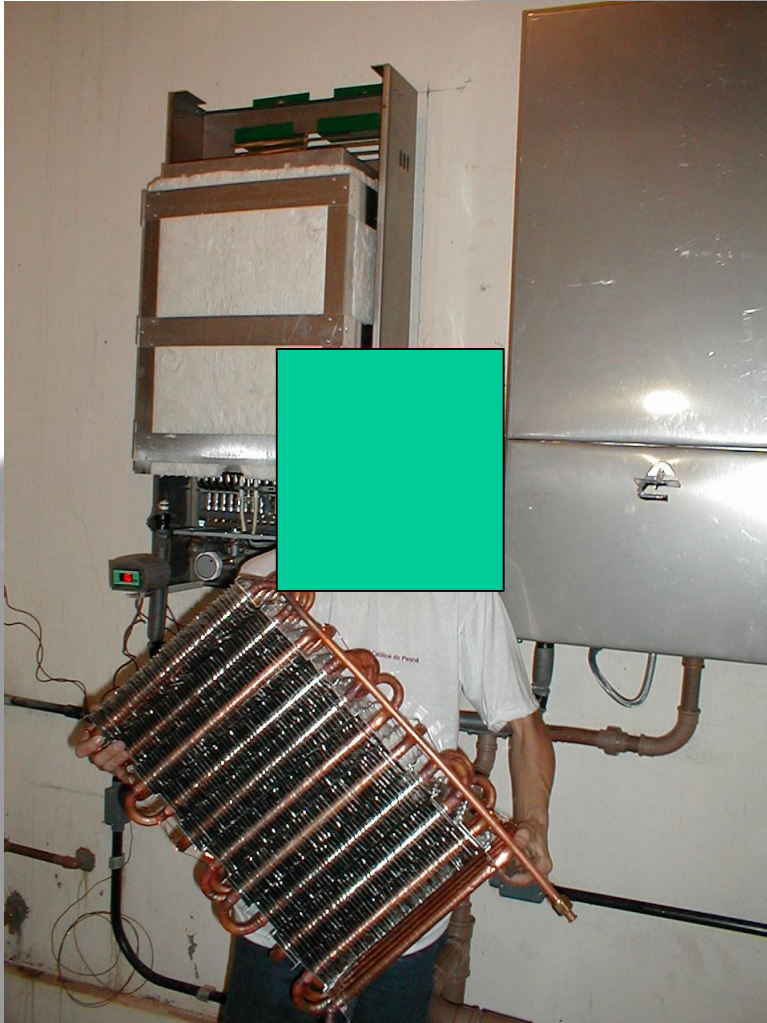




- TROCADORES DE CALOR – CAP. 11

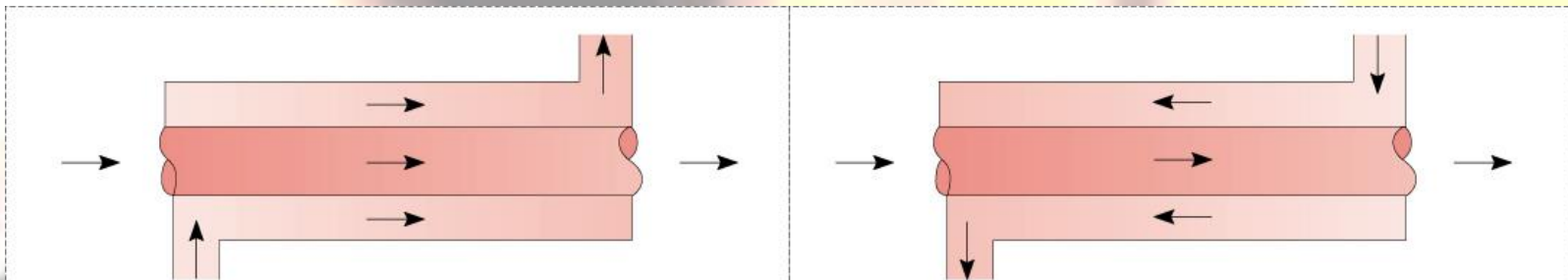
Trocadores de Calor



Heat Exchanger Types

Heat exchangers are ubiquitous to energy conversion and utilization. They involve heat exchange between two fluids separated by a solid and encompass a wide range of flow configurations.

- **Concentric-Tube Heat Exchangers**

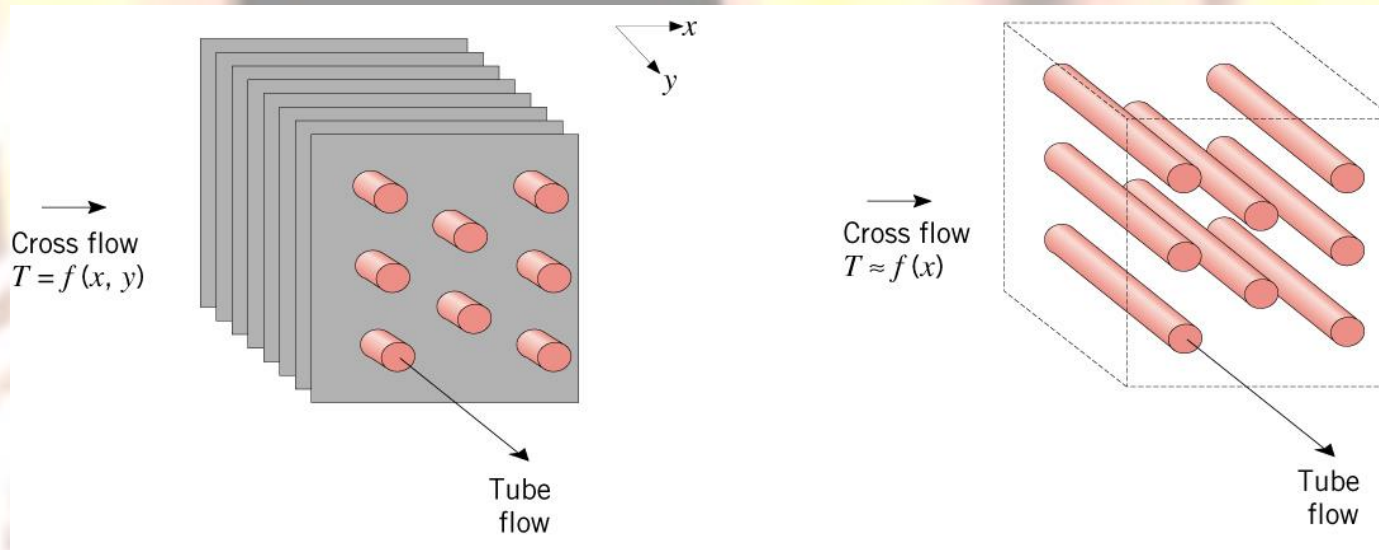


Parallel Flow

Counterflow

- Simplest configuration.
- Superior performance associated with counter flow.

- **Cross-flow Heat Exchangers**

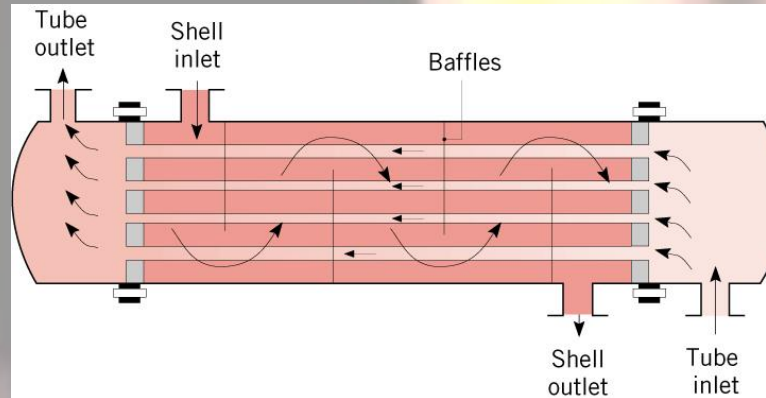


**Finned-Both Fluids
Unmixed**

**Unfinned-One Fluid Mixed
the Other Unmixed**

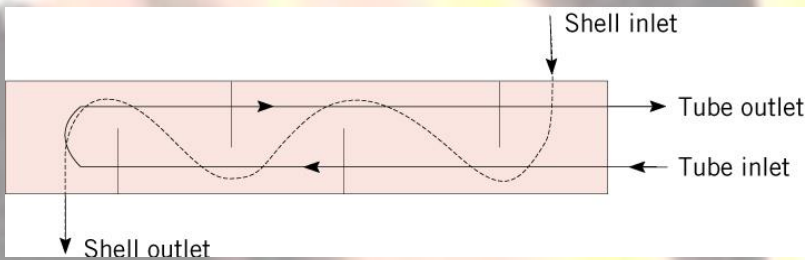
- For cross-flow over the tubes, fluid motion, and hence mixing, in the transverse direction (y) is prevented for the finned tubes, but occurs for the unfinned condition.
- Heat exchanger performance is influenced by mixing.

- **Shell-and-Tube Heat Exchangers**

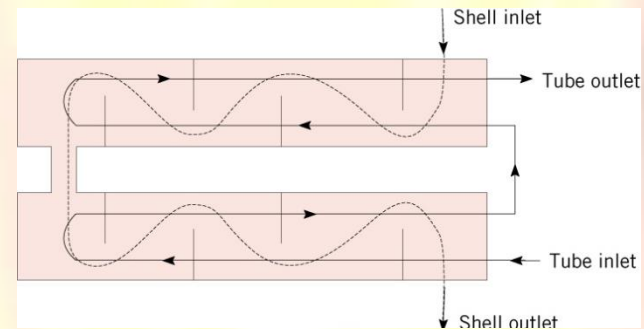


One Shell Pass and One Tube Pass

- **Baffles** are used to establish a cross-flow and to induce turbulent mixing of the **shell-side fluid**, both of which enhance convection.
- The number of tube and shell passes may be varied, e.g.:

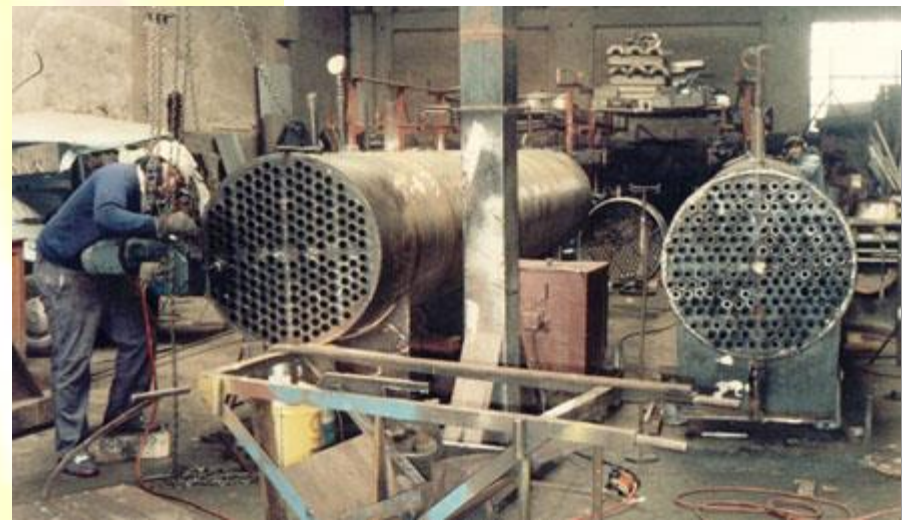
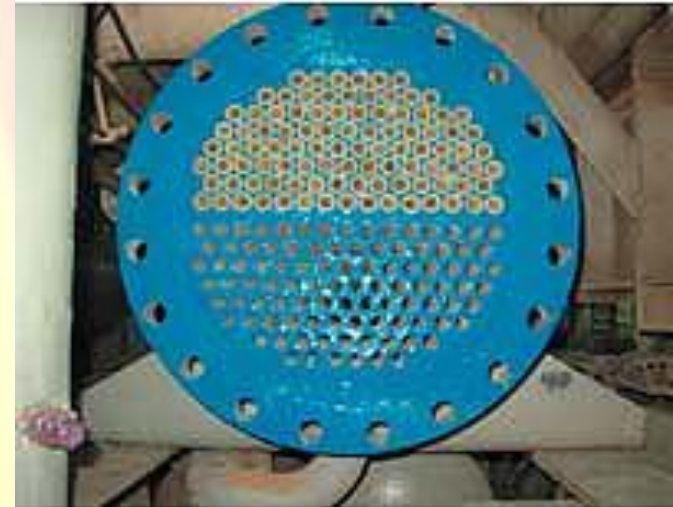


**One Shell Pass,
Two Tube Passes**



**Two Shell Passes,
Four Tube Passes**

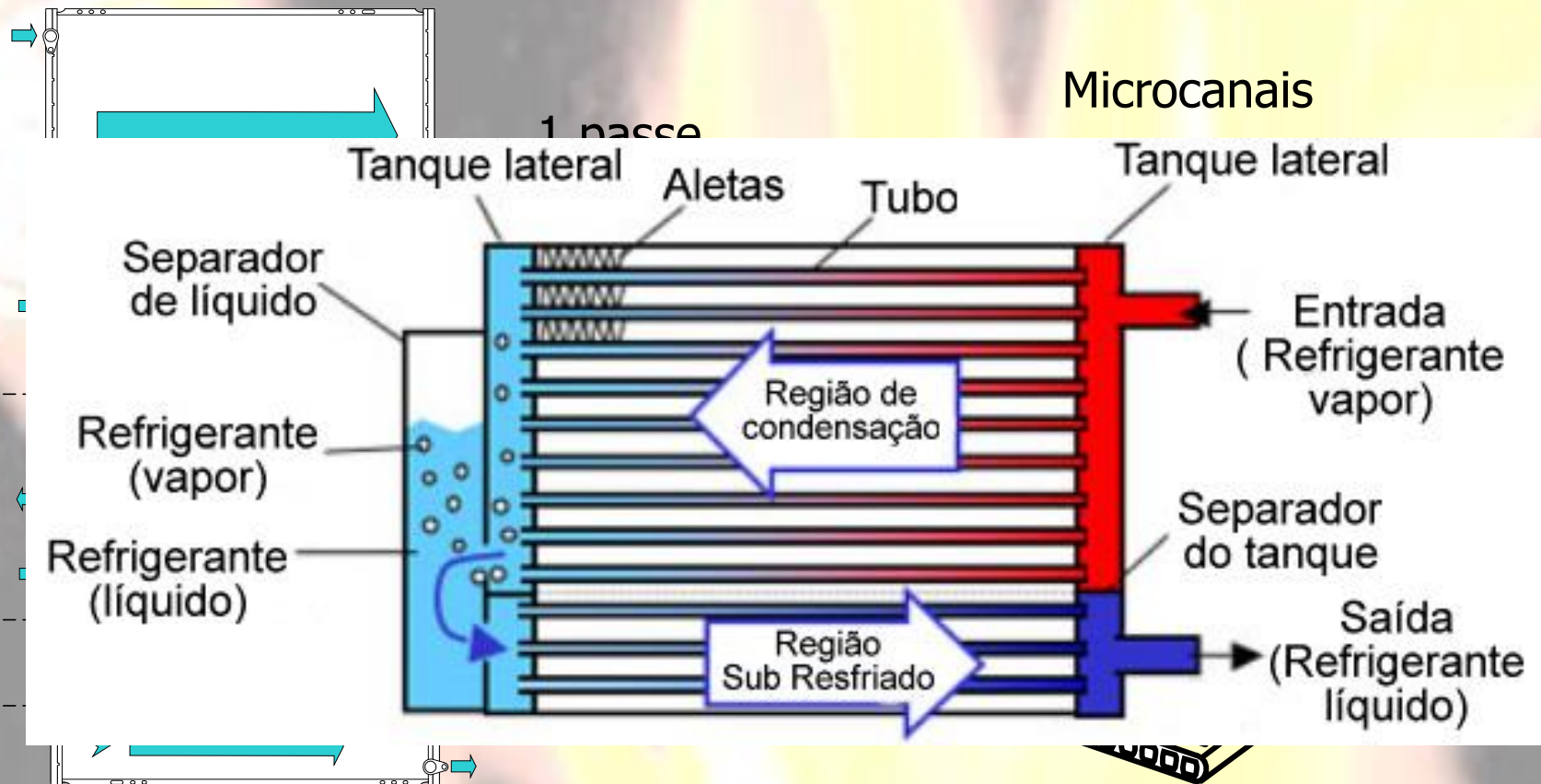
Trocadores de calor



Condensador



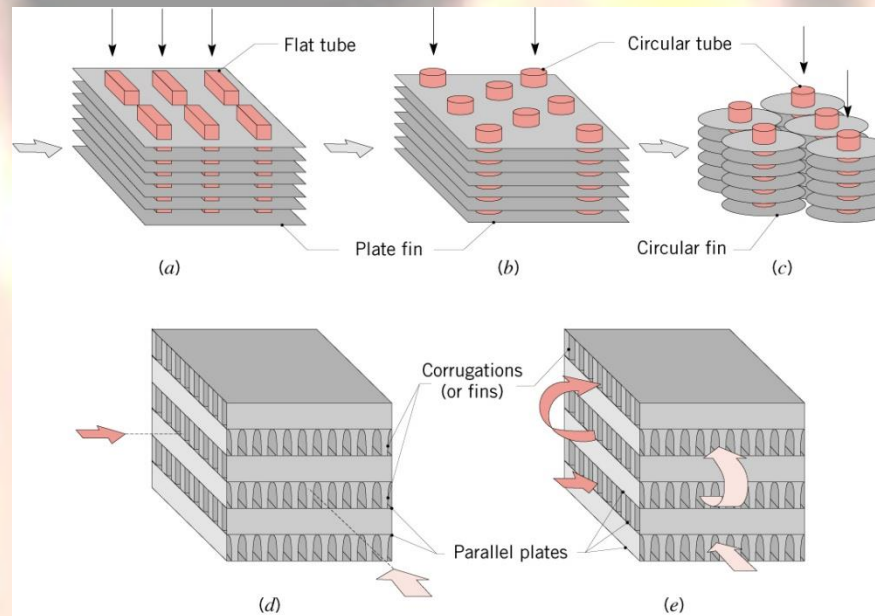
Os condensadores de fluxo paralelo surgiram melhorando ainda mais a eficiência e com peso reduzido.



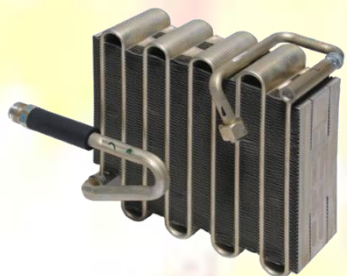
Sistema de sub-resfriamento

- **Compact Heat Exchangers**

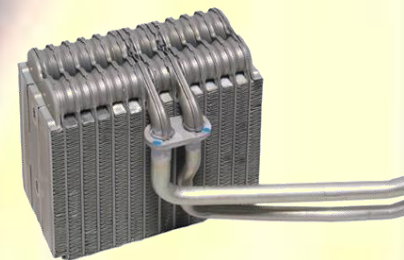
- Widely used to achieve **large heat rates per unit volume**, particularly when one or both fluids is a gas.
- Characterized by **large heat transfer surface areas per unit volume, small flow passages, and laminar flow**.



- (a) Fin-tube (flat tubes, continuous plate fins)
- (b) Fin-tube (circular tubes, continuous plate fins)
- (c) Fin-tube (circular tubes, circular fins)
- (d) Plate-fin (single pass)
- (e) Plate-fin (multipass)

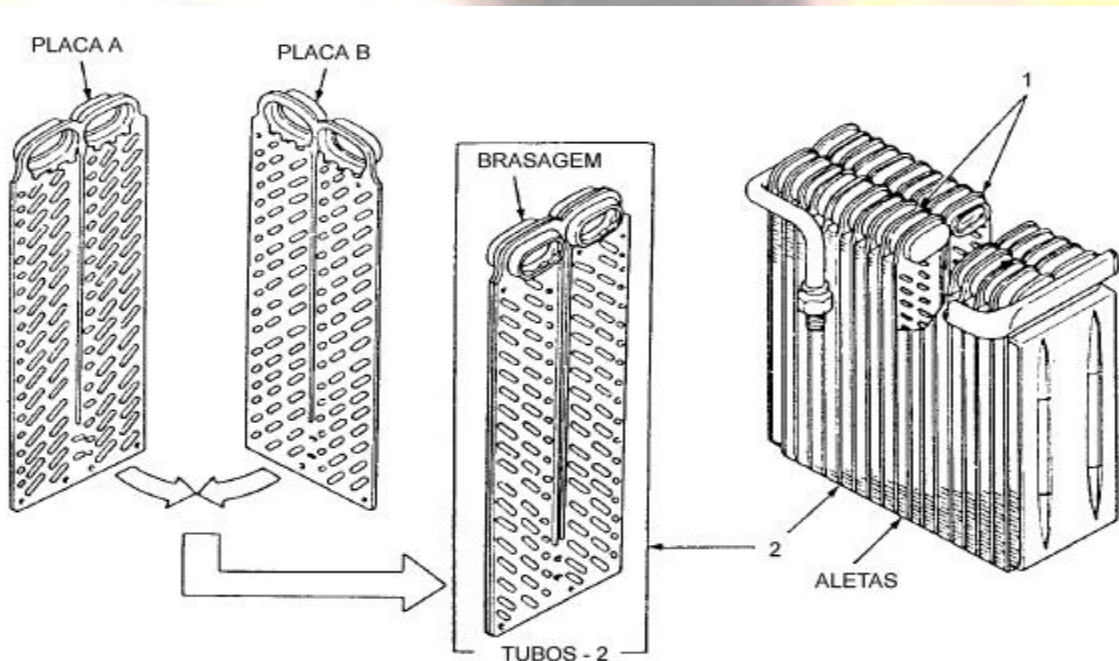


Evaporador

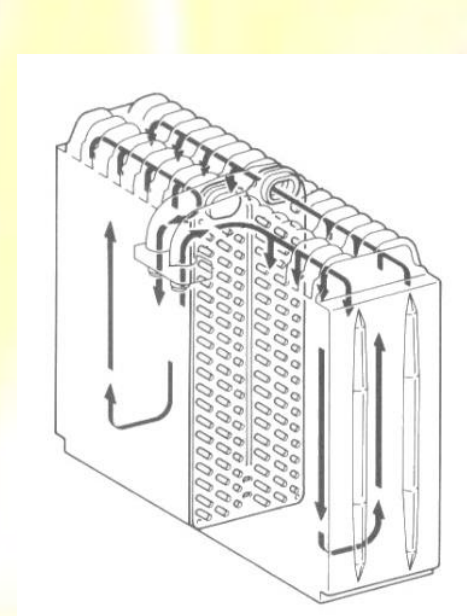


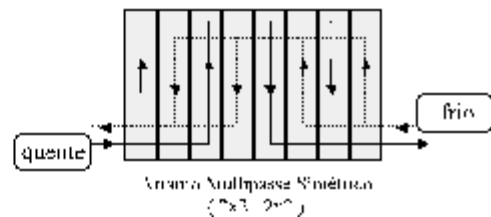
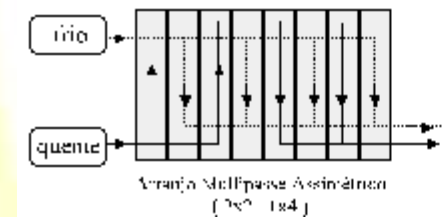
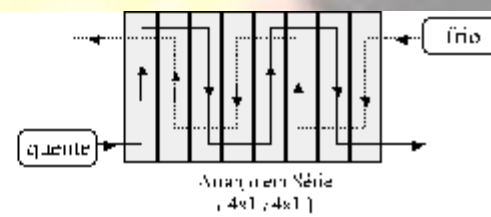
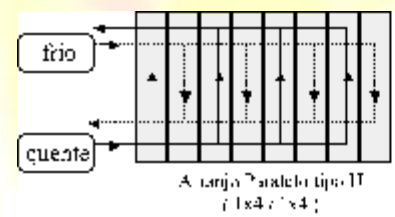
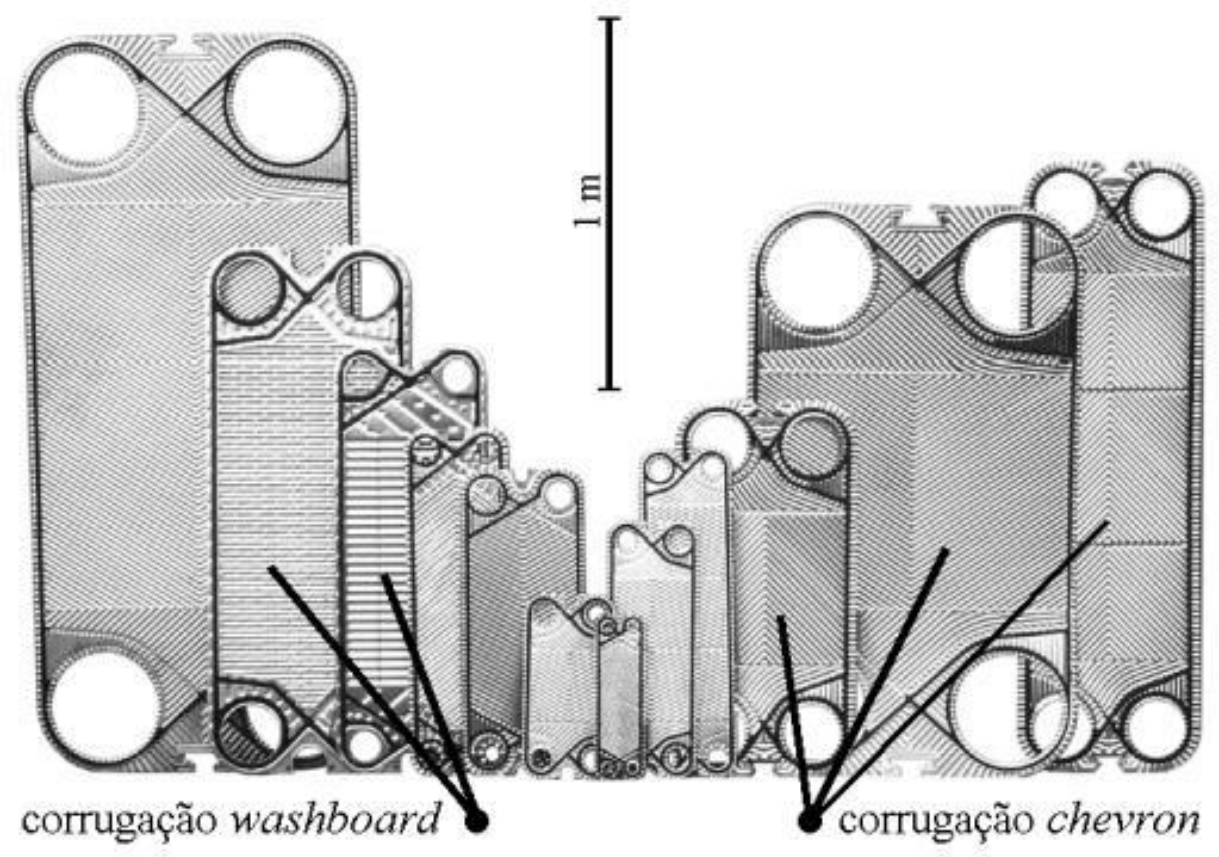
Este trocador de calor no início também era constituído de tubos circulares fixados por expansão mecânica, sendo substituído pelo modelo serpentina e depois pelo evaporador de placas.

Montagem da placas



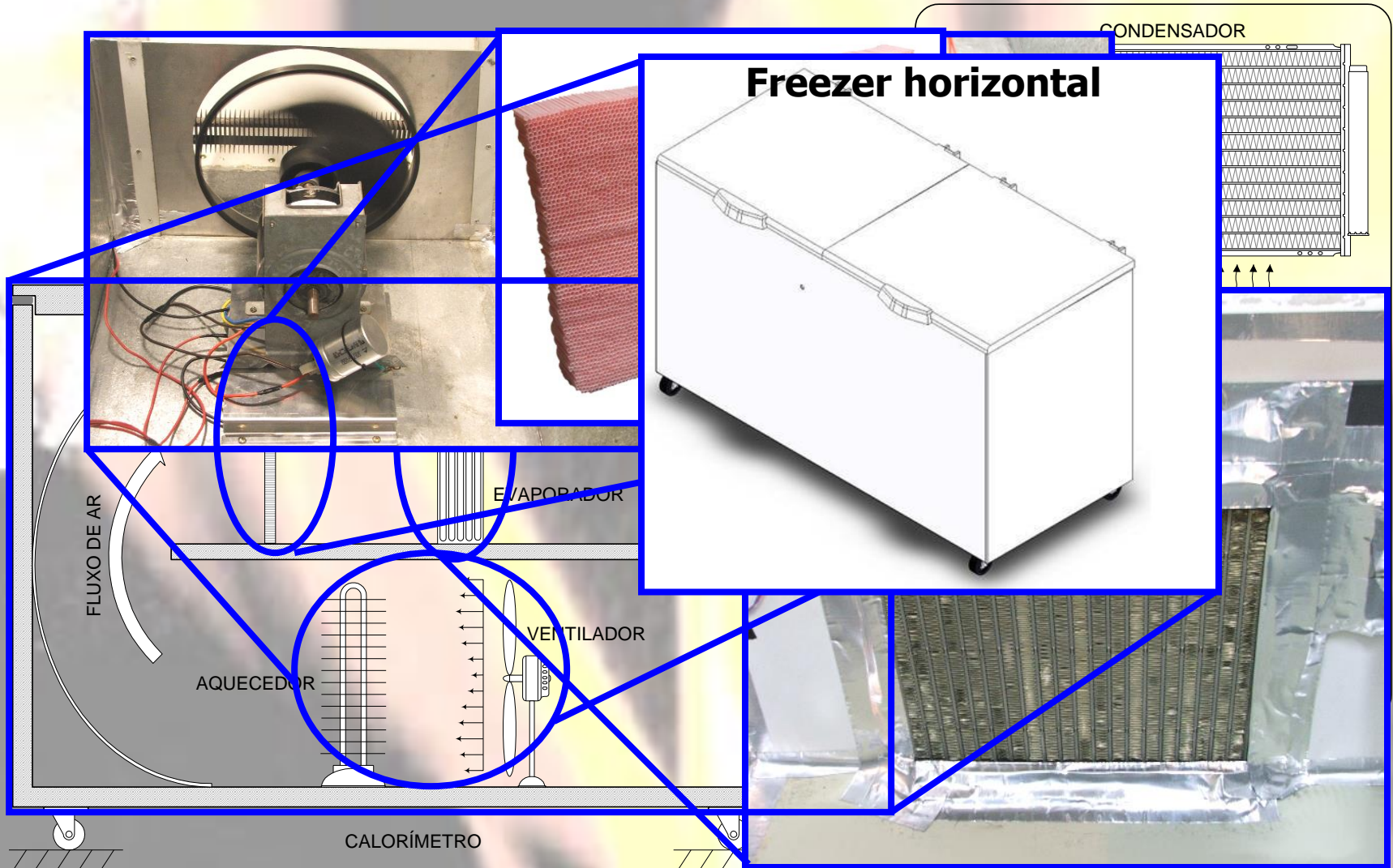
Fluxo do Gás





Calorímetro

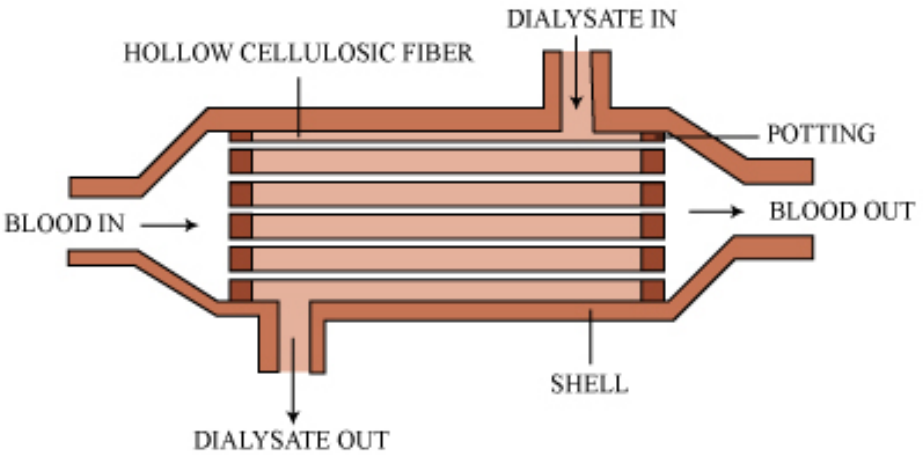
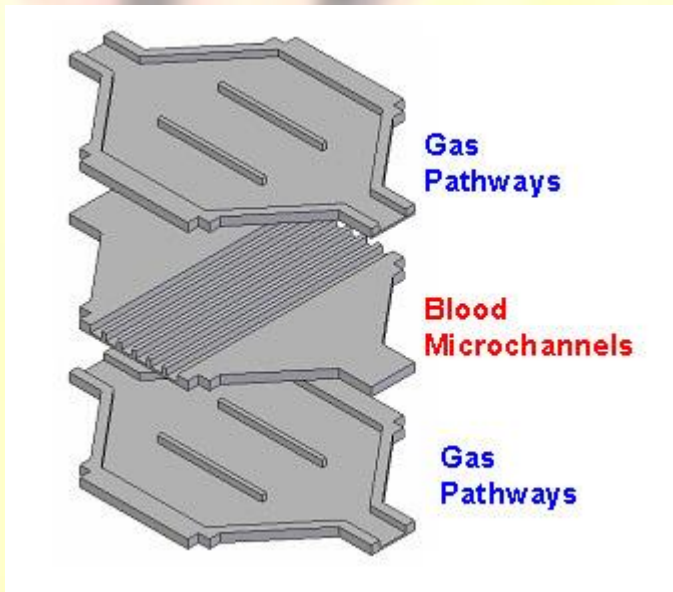
O calorímetro permite simular o efeito da carga térmica e medir a transferência de calor no evaporador.



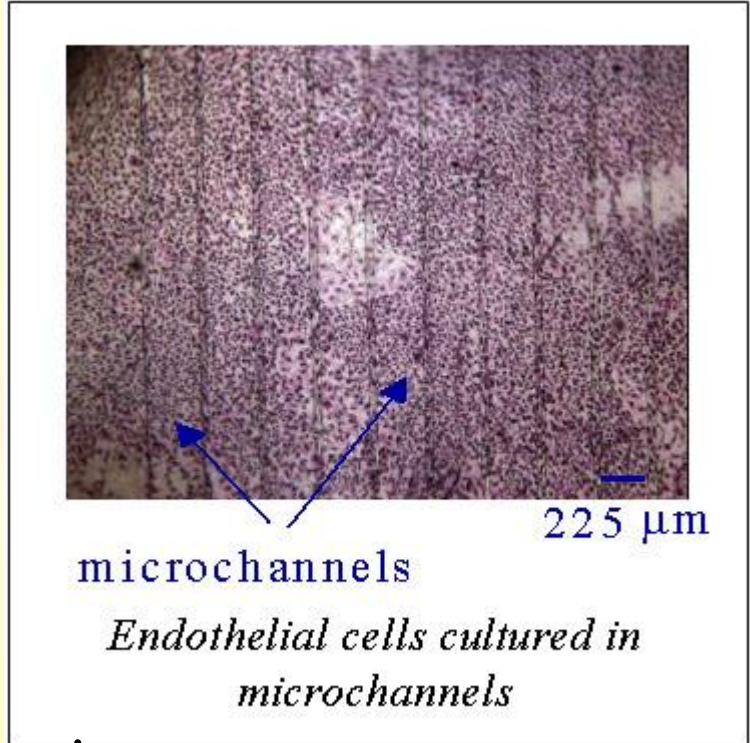


Artificial lung

膜型人工肺
(フォローファイバー)



SCHEMATIC DIAGRAM OF HOLLOW FIBER MEMBRANE HEMODIALYZER
NOT DRAWN TO SCALE. Assume flow arrangement is: PURE COUNTERCURRENT FLOW



• www.myoops.org/.../CourseHome/index.htm

• www.mirm.pitt.edu/.../projects/projects4.asp

Coeficiente Global de Transferência de Calor

$$\begin{aligned} \frac{1}{UA} &= \frac{1}{U_C A_C} = \frac{1}{U_H A_H} \\ &= \frac{1}{(\eta_o h A)_C} + \frac{R''_{f,C}}{(\eta_o A)_C} + R_W + \frac{R''_{f,H}}{(\eta_o A)_H} + \frac{1}{(\eta_o h A)_H} \end{aligned}$$

TABELA 11.1 Fatores de incrustações representativos [1]

FLUIDO	R_f^n ($m^2 \cdot K/W$)
Água do mar e água de alimentação tratada para caldeira (abaixo de 50°C)	0,0001
Água do mar e água de alimentação tratada para caldeira (acima de 50°C)	0,0002
Água do rio (abaixo de 50°C)	0,0002–0,001
Óleo combustível	0,0009
Líquidos refrigerantes	0,0002
Vapor (sem óleo lubrificante)	0,0001

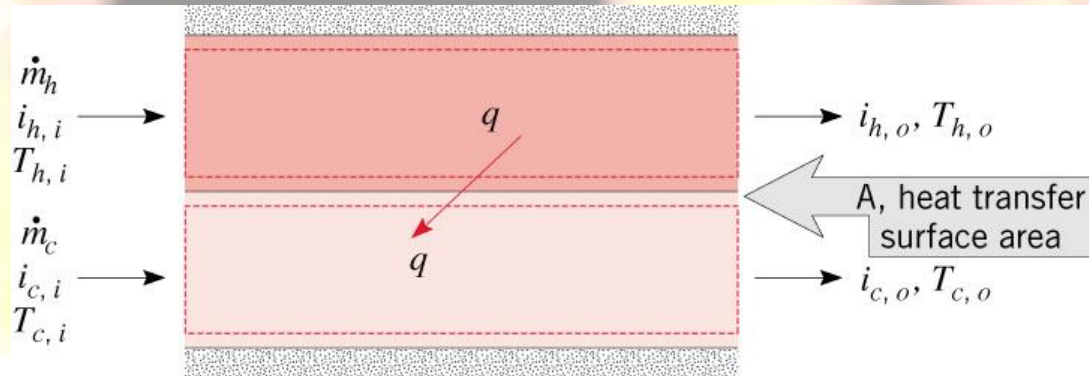
TABELA 11.2 Valores representativos do coeficiente global de transferência de calor

COMBINAÇÃO DE FLUIDO	U ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)
Água-água	850–1700
Água-óleo	110–350
Condensador de vapor (água nos tubos)	1000–6000
Condensador de amônia (água nos tubos)	800–1400
Condensador de álcool (água nos tubos)	250–700
Trocador de calor com tubo aletado (água nos tubos, ar no escoamento cruzado)	25–50

Overall Energy Balance

- Application to the *hot (h)* and *cold (c)* fluids:

Energy Balance



- Assume negligible heat transfer between the exchanger and its surroundings and negligible potential and kinetic energy changes for each fluid.

$$q = \dot{m}_h (i_{h,i} - i_{h,o})$$

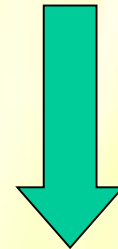
$$q = \dot{m}_c (i_{c,o} - i_{c,i})$$

$i \rightarrow$ fluid enthalpy

- Assuming no l/v phase change and constant specific heats,

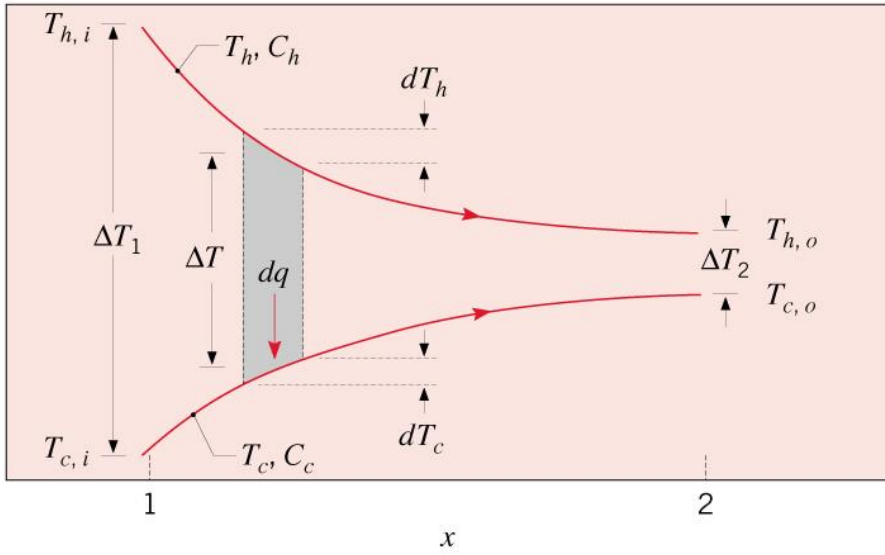
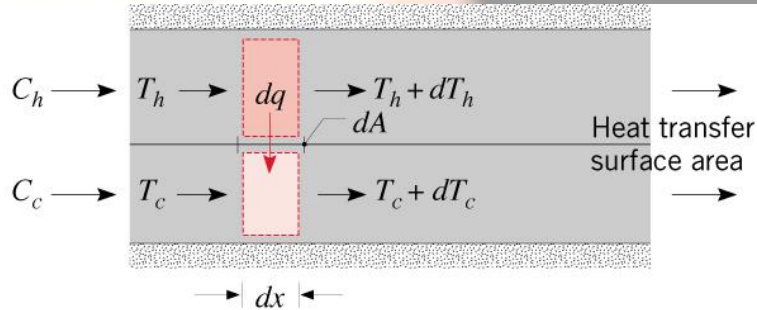
$$q = \dot{m}_h c_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o}) = C_h (T_{h,i} - T_{h,o})$$

$$q = \dot{m}_c c_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,i}) = C_c (T_{c,o} - T_{c,i})$$



$$Q = UA(\Delta T) \Big|_{\text{médio}}$$

TROCADORES DE CALOR DE CORRENTES PARALELAS



$$dq = -\dot{m}_h c_{p,h} dT_h \equiv -C_h dT_h \quad (11.10)$$

$$dq = \dot{m}_c c_{p,c} dT_c \equiv C_c dT_c \quad (11.11)$$

$$dq = U \Delta T dA \quad (11.12)$$

onde $\Delta T = T_h - T_c$ é a diferença *local* de temperatura entre os fluidos quente e frio.

Para determinar a forma integrada da Eq. 11.12, iniciamos pela substituição das Eqs. 11.10 e 11.11 na forma diferencial da Eq. 11.8

$$d(\Delta T) = dT_h - dT_c$$

para obter

$$d(\Delta T) = -dq \left(\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c} \right)$$

Substituindo para dq da Eq. 11.12 e integrando através do trocador de calor, obtemos

$$\int_1^2 \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -U \left(\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c} \right) \int_1^2 dA$$

ou

$$\ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right) = -UA \left(\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c} \right) \quad (11.13)$$

Substituindo para C_h e C_c das Eqs. 11.6b e 11.7b, respectivamente, segue que

$$\begin{aligned}\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right) &= -UA\left(\frac{T_{h,i} - T_{h,s}}{q} + \frac{T_{c,s} - T_{c,e}}{q}\right) \\ &= -\frac{UA}{q}[(T_{h,e} - T_{c,e}) - (T_{h,s} - T_{c,s})]\end{aligned}$$

Reconhecendo que, para o trocador de calor com correntes paralelas da Fig. 11.7, $\Delta T_1 = (T_{h,e} - T_{c,e})$ e $\Delta T_2 = (T_{h,s} - T_{c,s})$, obtemos então

$$q = UA \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2/\Delta T_1)}$$

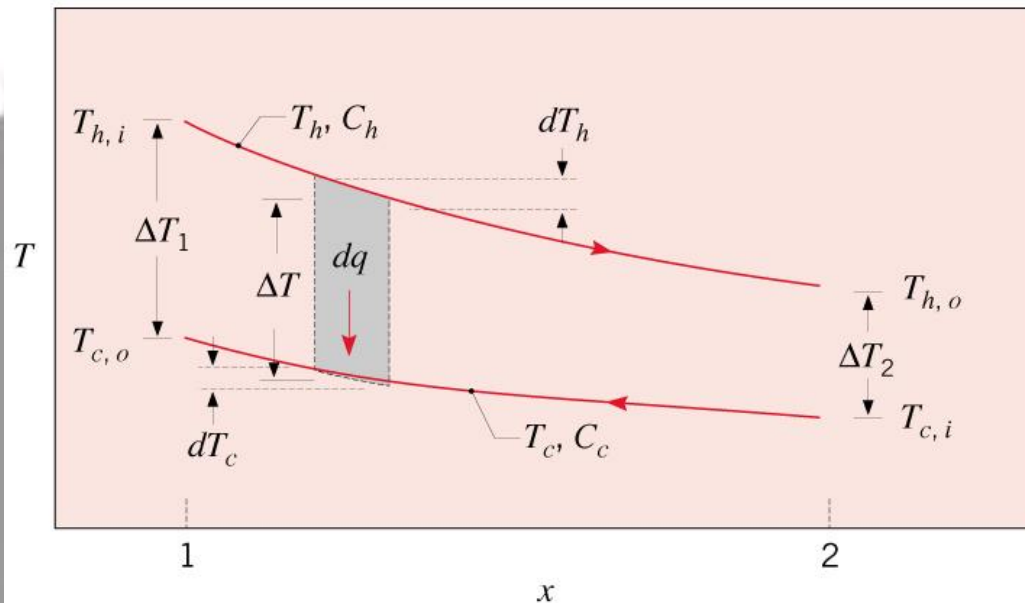
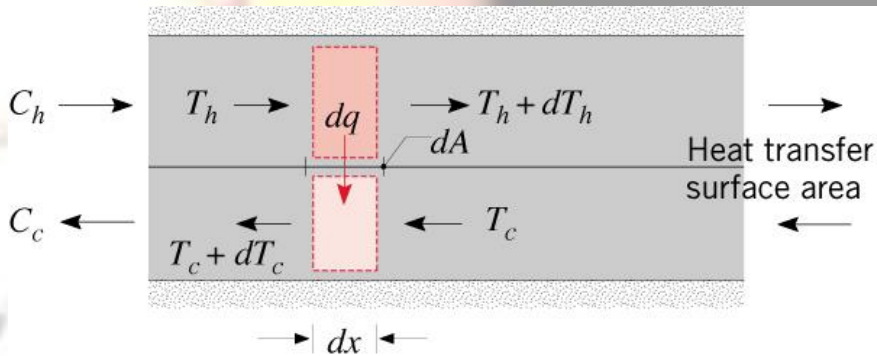
Comparando a expressão anterior com a Eq. 11.9, concluímos que a diferença média de temperatura apropriada é a *média logarítmica da diferença de temperatura*, ΔT_{lm} . Da mesma forma, podemos escrever

$$q = UA \Delta T_{lm} \quad (11.14)$$

onde

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2/\Delta T_1)} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1/\Delta T_2)} \quad (11.15)$$

TROCADORES DE CALOR COM CORRENTES CONTRÁRIAS



$$\begin{bmatrix} \Delta T_1 \equiv T_{h,1} - T_{c,1} = T_{h,e} - T_{c,s} \\ \Delta T_2 \equiv T_{h,2} - T_{c,2} = T_{h,s} - T_{c,e} \end{bmatrix}$$

A Methodology for Heat Exchanger Design Calculations

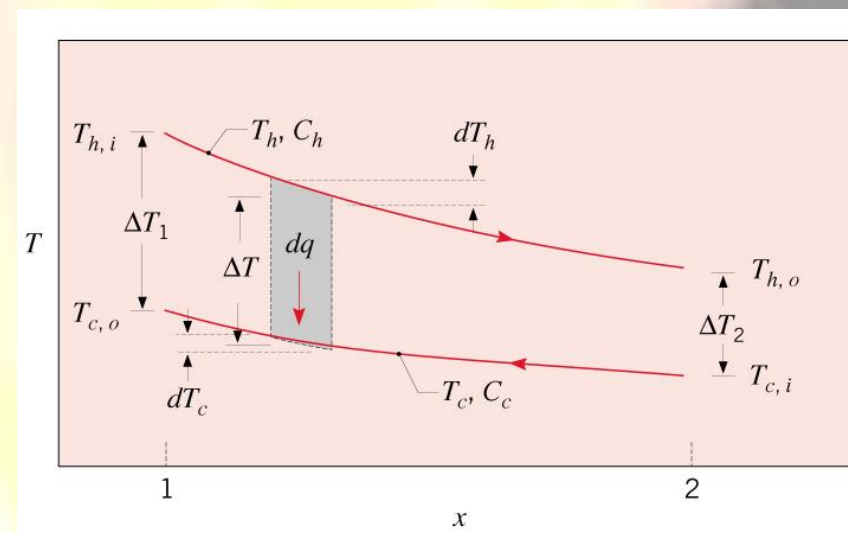
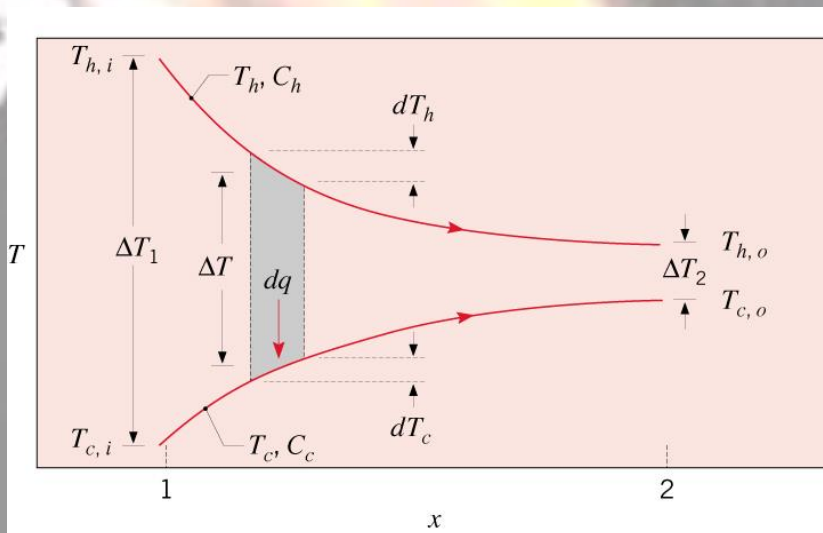
- The Log Mean Temperature Difference (LMTD) Method -

- A form of Newton's Law of Cooling may be applied to heat exchangers by using a log-mean value of the temperature difference between the two fluids:

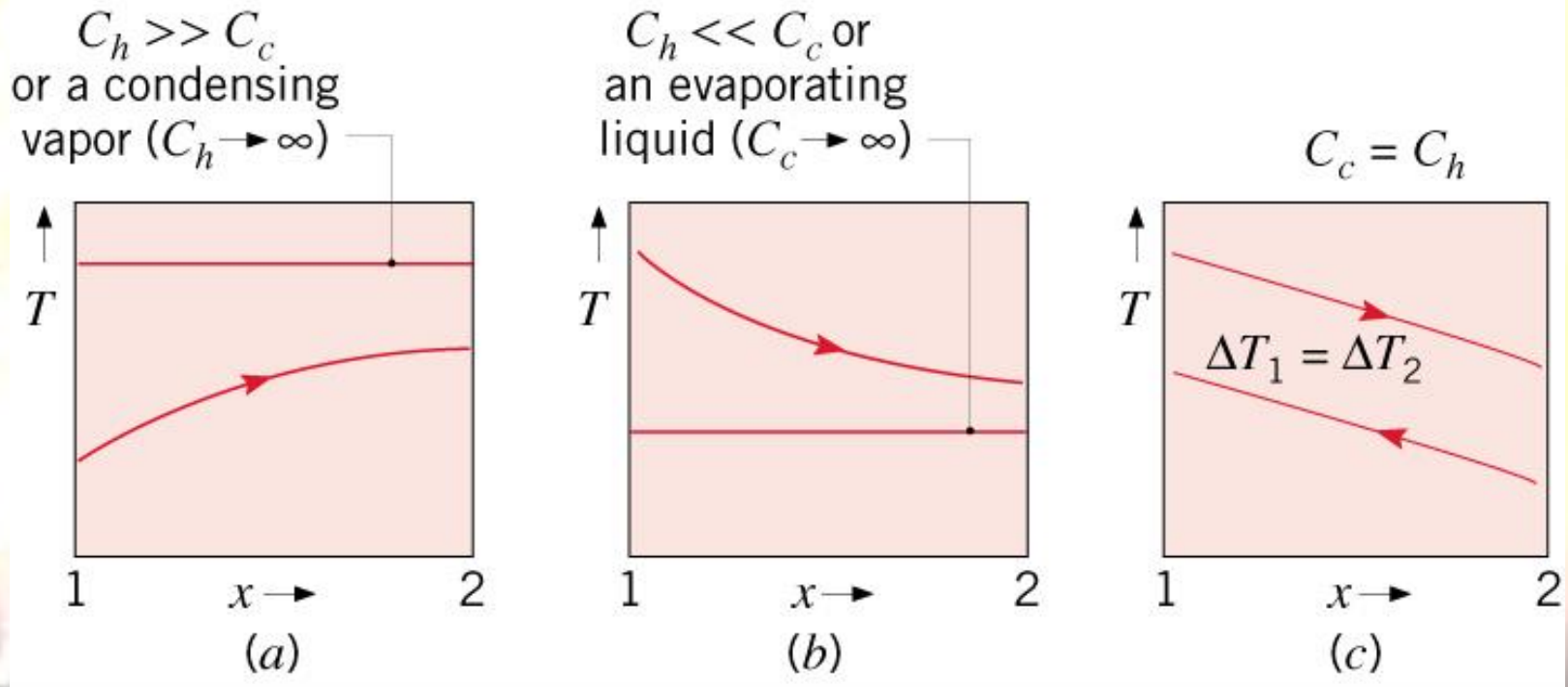
$$q = U A \Delta T_{1m}$$

$$\Delta T_{1m} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$$

Evaluation of ΔT_1 and ΔT_2 depends on the heat exchanger type.



CONDIÇÕES ESPECIAIS



➤ Case (a): $C_h \gg C_c$ or h is a condensing vapor ($C_h \rightarrow \infty$).

– Negligible or no change in T_h ($T_{h,o} = T_{h,i}$).

➤ Case (b): $C_c \gg C_h$ or c is an evaporating liquid ($C_c \rightarrow \infty$).

– Negligible or no change in T_c ($T_{c,o} = T_{c,i}$).

➤ Case (c): $C_h = C_c$.

$$\Delta T_1 = \Delta T_2 = \Delta T_{1m}$$

**TROCADORES DE CALOR COM
CORRENTES CRUZADAS E PASSES
MÚLTIPLOS**

$$\Delta T_{lm} = F \Delta T_{lm,CC}$$

CC: Corrente Contrária

TROCADORES DE CALOR COM CORRENTES CRUZADAS E PASSES MÚLTIPLOS

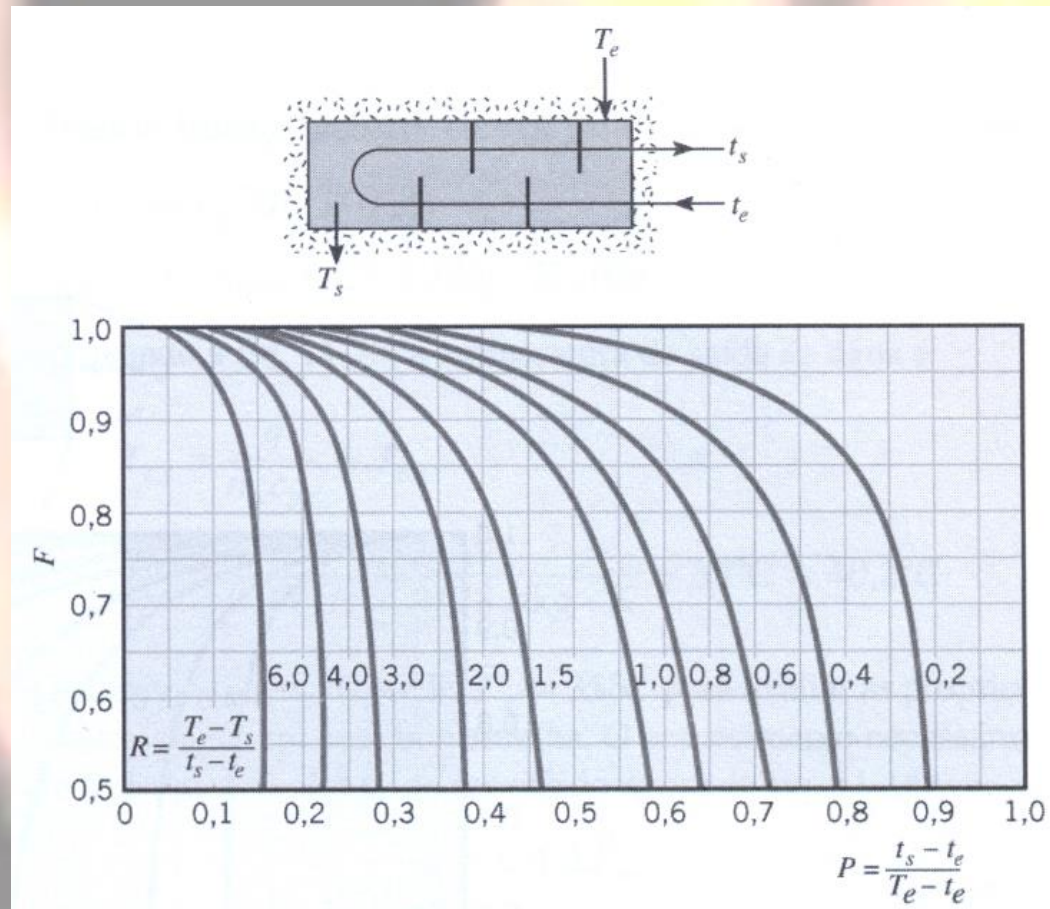


Fig. 11.10 Fator de correção para um trocador casco e tubo com um casco e um número de passes, múltiplo de dois, nos tubos (dois, quatro etc. passes por tubo).

TROCADORES DE CALOR COM CORRENTES CRUZADAS E PASSES MÚLTIPLOS

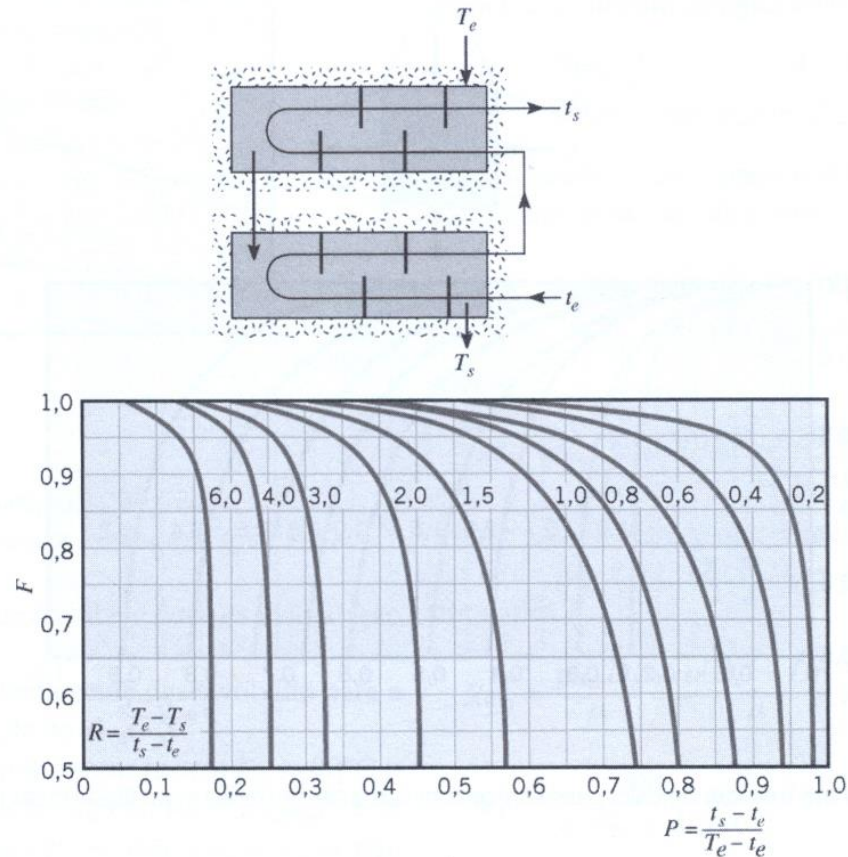


Fig. 11.11 Fator de correção para um trocador casco e tubo com dois passes no casco e um número de passes múltiplo de quatro nos tubos (quatro, oito etc. passes por tubo).

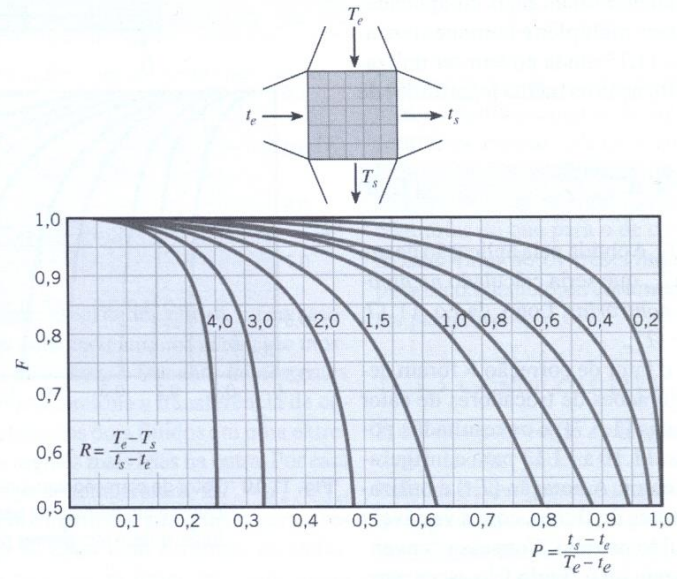


Fig. 11.12 Fator de correção para um trocador de calor de passe único com correntes cruzadas e os dois fluidos não-misturados.

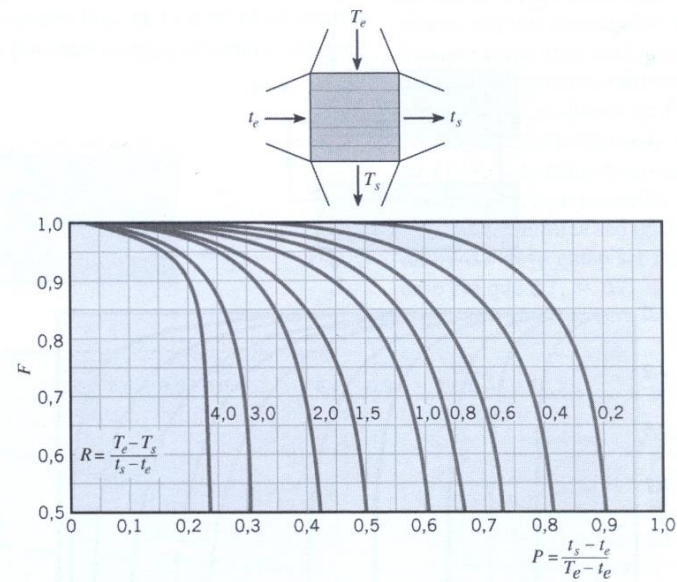


Fig. 11.13 Fator de correção para um trocador de calor passe único com correntes cruzadas e um fluido misturado e o outro não-m

Método ε -NUT

- Heat exchanger effectiveness, ε :

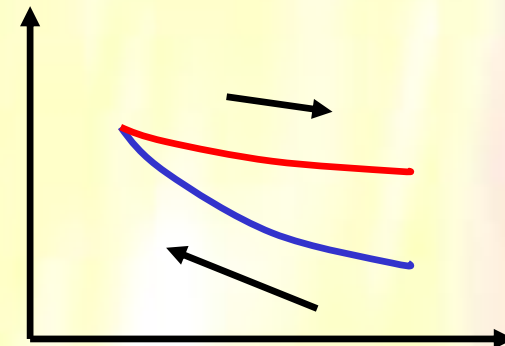
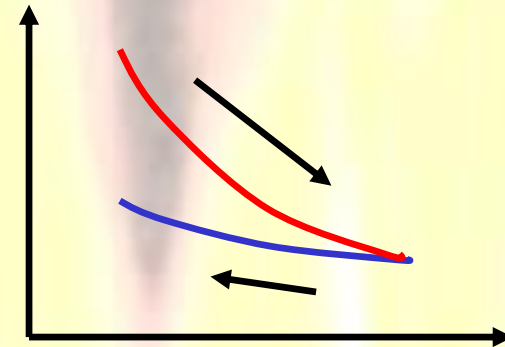
$$\varepsilon = \frac{q}{q_{\max}}$$

$$0 \leq \varepsilon \leq 1$$

- Maximum possible heat rate:

$$q_{\max} = C_{\min} (T_{h,i} - T_{c,i})$$

$$C_{\min} = \begin{cases} C_h & \text{if } C_h < C_c \\ \text{or} \\ C_c & \text{if } C_c < C_h \end{cases}$$



$L \rightarrow \infty$

- Number of Transfer Units, NTU

$$NTU \equiv \frac{UA}{C_{\min}}$$

- A dimensionless parameter whose magnitude influences HX performance:

$$q \uparrow \text{ with } \uparrow NTU$$

Heat Exchanger Relations

$$\left\{ \begin{array}{l} q = \dot{m}_h (i_{h,i} - i_{h,o}) \\ \text{or} \\ q = C_h (T_{h,i} - T_{h,o}) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} q = \dot{m}_c (i_{c,o} - i_{c,i}) \\ \text{or} \\ q = C_c (T_{c,o} - T_{c,i}) \end{array} \right.$$

$$q = \varepsilon C_{\min} (T_{h,i} - T_{c,i})$$

- **Performance Calculations:**

$$\varepsilon = f(NTU, \underbrace{C_{\min} / C_{\max}}_{C_r})$$

Relations \rightarrow Table 11.3 or Figs. 11.10 - 11.15

TABELA 11.3 Relações de efetividade do trocador de calor [5]

ARRANJO DE CORRENTES	RELAÇÃO	
Tubo Concêntrico		
Correntes paralelas	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NUT(1 + C_r)]}{1 + C_r}$	(11.29a)
Correntes contrárias	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NUT(1 + C_r)]}{1 - C_r \exp[-NUT(1 - C_r)]}$	$(C_r < 1)$
	$\varepsilon = \frac{NUT}{1 + NUT}$	$(C_r = 1)$ (11.30a)
Casco e tubo		
Um passe no casco (2, 4, ... passes no tubo)	$\varepsilon_1 = 2 \left\{ 1 + C_r + (1 + C_r^2)^{1/2} \right.$	
n passes no casco ($2n, 4n, \dots$ passes no tubo)	$\left. \times \frac{1 + \exp[-NUT(1 + C_r^2)^{1/2}]}{1 - \exp[-NUT(1 + C_r^2)^{1/2}]} \right\}^{-1}$	(11.31a)
	$\varepsilon = \left[\left(\frac{1 - \varepsilon_1 C_r}{1 - \varepsilon_1} \right)^n - 1 \right] \left[\left(\frac{1 - \varepsilon_1 C_r}{1 - \varepsilon_1} \right)^n - C_r \right]^{-1}$	(11.32a)
Correntes cruzadas (passe único)		
Ambos os fluidos não-misturados	$\varepsilon = 1 - \exp \left[\left(\frac{1}{C_r} \right) (NUT)^{0,22} \{ \exp[-C_r(NUT)^{0,78}] - 1 \} \right]$	(11.33)
C_{\max} (misturado) C_{\min} (não-misturado)	$\varepsilon = \left(\frac{1}{C_r} \right) (1 - \exp \{-C_r[1 - \exp(-NUT)]\})$	(11.34a)
C_{\min} (misturado) C_{\max} (não-misturado)	$\varepsilon = 1 - \exp(-C_r^{-1} \{1 - \exp[-C_r(NUT)]\})$	(11.35a)
Todos os trocadores ($C_r = 0$)	$\varepsilon = 1 - \exp(-NUT)$	(11.36a)

TABELA 11.4 Relações NUT do trocador de calor

ARRANJO DE CORRENTES	RELAÇÃO
Tubo concêntrico	
Correntes paralelas	$\text{NUT} = - \frac{\ln [1 - \varepsilon(1 + C_r)]}{1 + C_r} \quad (11.29)$
Correntes contrárias	$\text{NUT} = \frac{1}{C_r - 1} \ln \left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon C_r - 1} \right) \quad (C_r < 1)$
	$\text{NUT} = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \quad (C_r = 1) \quad (11.30)$
Casco e tubo	
Um passe no casco (2, 4, ... passes no tubo)	$\text{NUT} = - (1 + C_r^2)^{-1/2} \ln \left(\frac{E - 1}{E + 1} \right) \quad (11.31)$
	$E = \frac{2/\varepsilon_1 - (1 + C_r)}{(1 + C_r^2)^{1/2}} \quad (11.31c)$
n passes no casco ($2n, 4n, \dots$ passes no tubo)	Use as Eqs. 11.31b e 11.31c com $\varepsilon_1 = \frac{F - 1}{F - C_r} \quad F = \left(\frac{\varepsilon C_r - 1}{\varepsilon - 1} \right)^{1/n} \quad (11.32b,c)$
Correntes cruzadas (passe único)	
C_{\max} (misturado), C_{\min} (não-misturado)	$\text{NUT} = - \ln \left[1 + \left(\frac{1}{C_r} \right) \ln(1 - \varepsilon C_r) \right] \quad (11.34b)$
C_{\min} (misturado), C_{\max} (não-misturado)	$\text{NUT} = - \left(\frac{1}{C_r} \right) \ln [C_r \ln(1 - \varepsilon) + 1] \quad (11.35b)$
Todos os trocadores ($C_r = 0$)	$\text{NUT} = - \ln(1 - \varepsilon) \quad (11.36b)$

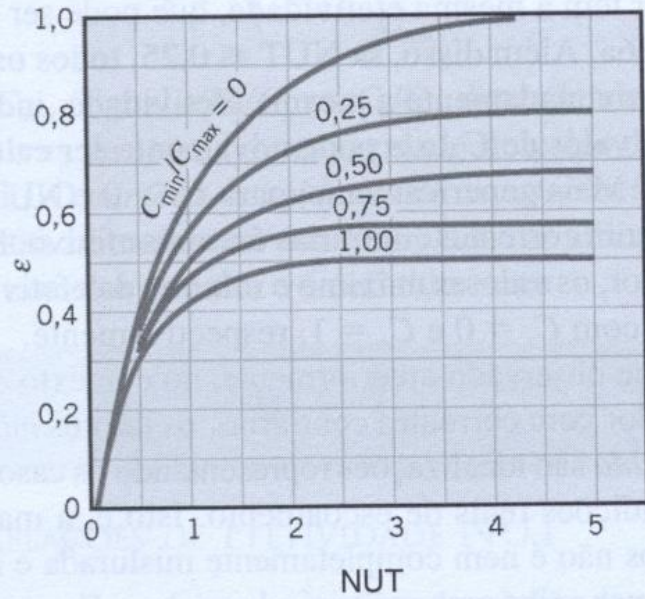


Fig. 11.14 Efetividade de um trocador de calor com correntes paralelas (Eq. 11.29).

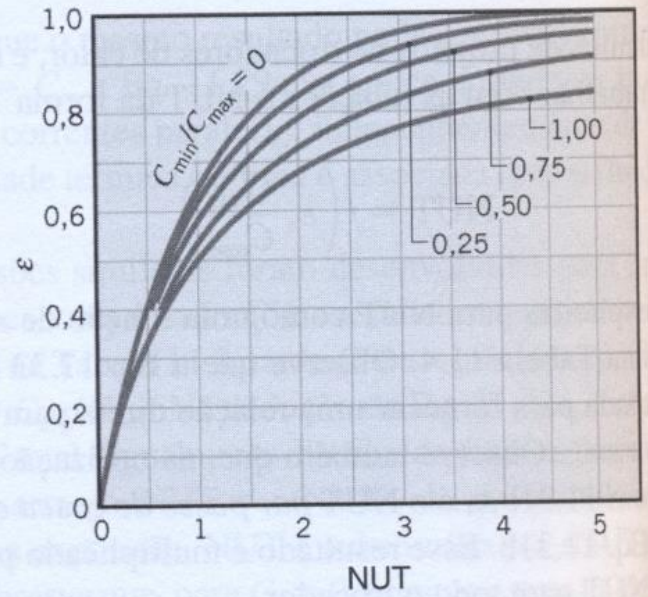
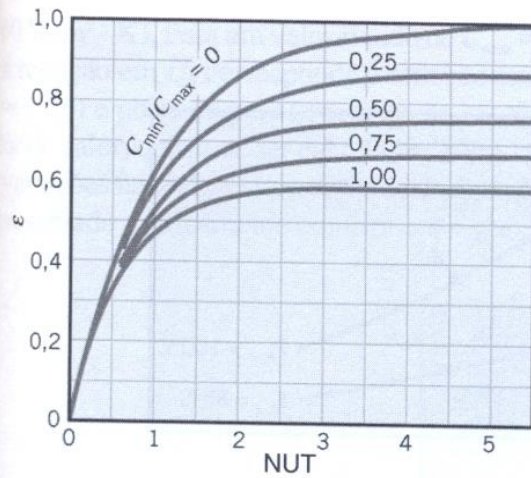


Fig. 11.15 Efetividade de um trocador de calor com correntes contrárias (Eq. 11.30).



11.16 Efetividade de um trocador de calor casco e tubo com um passe no casco e um número qualquer de passes múltiplo de dois nos tubos (dois, quatro etc. passes por tubo) (Eq. 11.31).

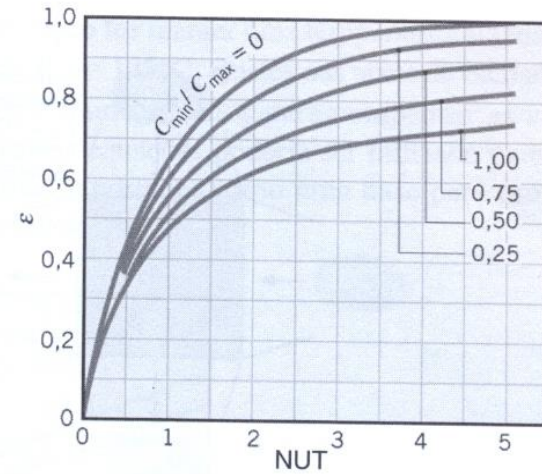
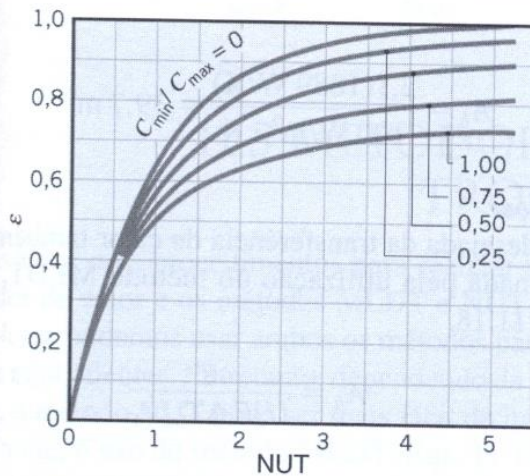


Fig. 11.18 Efetividade de um trocador de calor de passe único com correntes cruzadas com os dois fluidos não-misturados (Eq. 11.33).



11.17 Efetividade de um trocador de calor casco e tubo com dois passes no casco e um número qualquer de passes múltiplo de quatro nos tubos (quatro, oito etc. passes por tubo) (Eq. 11.32 com $n = 2$).

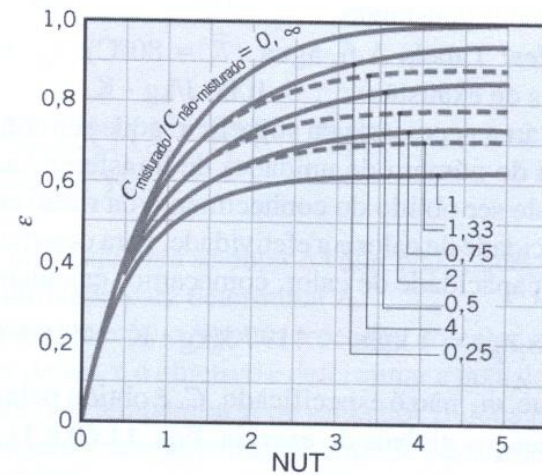


Fig. 11.19 Efetividade de um trocador de calor de passe único com correntes cruzadas e um fluido misturado e o outro não-misturado (Eqs. 11.34 e 11.35).

11.4 ANÁLISE DO TROCADOR DE CALOR: O MÉTODO DA EFETIVIDADE NUT

utilizar o método da média logarítmica de diferença de temperatura (MLDT) da análise do trocador de calor quando as temperaturas de entrada do fluido são conhecidas e as temperaturas de saída são especificadas ou determinadas imediatamente a partir das expressões do balanço de energia, Eqs. 11.6b e 11.7b. O ΔT_{lm} para o trocador pode então ser obtido. Entretanto, apenas as temperaturas de entrada forem conhecidas, o método MLDT necessita de um procedimento iterativo. Em muitos casos, é preferível utilizar uma alternativa de aproximação denominada método de *efetividade* NUT.

DEFINIÇÕES

Para definir a *efetividade de um trocador de calor*, devemos determinar a *taxa máxima de transferência de calor* que pode ser obtida pelo trocador. Essa taxa de transferência de calor pode, em princípio, ser atingida em um trocador de calor de correntes contrárias (Fig. 11.8) de comprimento infinito. Em tal caso, um dos fluidos iria sofrer a maior diferença de temperatura possível, $T_{h,e} - T_{c,e}$. Para ilustrar esse ponto, considere uma situação para a qual $C_c < C_h$, caso em que, das Eqs. 11.10 e 11.11, $\Delta T_{h,e} = |T_{h,e} - T_{h,s}|$. O fluido frio iria então experimentar a maior varia-

ção de temperatura, e, uma vez que $L \rightarrow \infty$, ele seria aquecido para a temperatura de entrada do fluido quente ($T_{c,s} = T_{h,e}$). Dessa forma, da Eq. 11.7b,

$$C_c < C_h: \quad q_{\max} = C_c(T_{h,e} - T_{c,e})$$

Similarmente, se $C_h < C_c$, o fluido quente experimentaria a maior variação de temperatura e seria resfriado para a temperatura de entrada do fluido frio ($T_{h,s} = T_{c,e}$). Da Eq. 11.6b, obtemos então

$$C_h < C_c: \quad q_{\max} = C_h(T_{h,e} - T_{c,e})$$

Dos resultados anteriores estamos então prontos para escrever a expressão geral

$$q_{\max} = C_{\min}(T_{h,e} - T_{c,e}) \quad (11.19)$$

onde C_{\min} é igual a C_c ou C_h , que é sempre menor. Para temperaturas dadas de entrada dos fluidos quente e frio, a Eq. 11.19 fornece a máxima taxa de transferência de calor que poderia ser possivelmente fornecida pelo trocador. Um rápido exercício mental convenceria o leitor de que a máxima taxa de transfe-

Agora é lógico definir a *efetividade*, ε , como a razão entre a taxa real de transferência de calor para um trocador de calor e a taxa máxima de transferência de calor possível:

$$\varepsilon \equiv \frac{q}{q_{\max}} \quad (11.20)$$

Das Eqs. 11.6b, 11.7b e 11.19, segue que

$$\varepsilon = \frac{C_h(T_{h,e} - T_{h,s})}{C_{\min}(T_{h,e} - T_{c,e})} \quad (11.21)$$

ou

$$\varepsilon = \frac{C_c(T_{c,s} - T_{c,e})}{C_{\min}(T_{h,e} - T_{c,e})} \quad (11.22)$$

Por definição a efetividade, que é adimensional, deve estar na faixa $0 \leq \varepsilon \leq 1$. Ela é útil porque, se ε , $T_{h,e}$ e $T_{c,e}$ forem dados, a taxa real de transferência de calor pode ser determinada imediatamente da expressão

$$q = \varepsilon C_{\min}(T_{h,e} - T_{c,e}) \quad (11.23)$$

Para qualquer trocador de calor pode ser mostrado que [5]

$$\varepsilon = f\left(\text{NUT}, \frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right) \quad (11.24)$$

onde C_{\min}/C_{\max} é igual a C_c/C_h ou C_h/C_c , dependendo das grandezas relativas das taxas de capacidade de calor dos fluidos quente e frio. O *número de unidades de transferência* (NUT) é um parâmetro adimensional que é amplamente utilizado para a análise do trocador de calor e é definido como

$$\text{NUT} \equiv \frac{UA}{C_{\min}} \quad (11.25)$$

11.4.2 RELAÇÕES DE EFETIVIDADE NUT

Para determinar uma forma específica da relação da efetividade NUT, Eq. 11.24, considere um trocador de calor com *correntes paralelas* para o qual $C_{\min} = C_h$. Da Eq. 11.21 obtemos então

$$\varepsilon = \frac{T_{h,e} - T_{h,s}}{T_{h,e} - T_{c,e}} \quad (11.26)$$

11.4.2 RELAÇÕES DE EFETIVIDADE NUT

Para determinar uma forma específica da relação da efetividade NUT, Eq. 11.24, considere um trocador de calor com *correntes paralelas* para o qual $C_{\min} = C_h$. Da Eq. 11.21 obtemos então

$$\varepsilon = \frac{T_{h,e} - T_{h,s}}{T_{h,e} - T_{c,e}} \quad (11.26)$$

e das Eqs. 11.6b e 11.7b segue que

$$\frac{C_{\min}}{C_{\max}} = \frac{\dot{m}_h c_{p,h}}{\dot{m}_c c_{p,c}} = \frac{T_{c,s} - T_{c,e}}{T_{h,e} - T_{h,s}}$$

Consideramos agora a Eq. 11.13, que pode ser representada como

$$\ln\left(\frac{T_{h,s} - T_{c,s}}{T_{h,e} - T_{c,e}}\right) = -\frac{UA}{C_{\min}} \left(1 + \frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right)$$

ou da Eq. 11.25

$$\frac{T_{h,s} - T_{c,s}}{T_{h,e} - T_{c,e}} = \exp\left[-NUT\left(1 + \frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right)\right]$$

Rearrmando o lado esquerdo dessa expressão como

$$\frac{T_{h,s} - T_{c,s}}{T_{h,e} - T_{c,e}} = \frac{T_{h,s} - T_{h,e} + T_{h,e} - T_{c,s}}{T_{h,e} - T_{c,e}}$$

e das Eqs. 11.6b e 11.7b segue que

$$\frac{C_{\min}}{C_{\max}} = \frac{\dot{m}_h c_{p,h}}{\dot{m}_c c_{p,c}} = \frac{T_{c,s} - T_{c,e}}{T_{h,e} - T_{h,s}}$$

Consideramos agora a Eq. 11.13, que pode ser representada como

$$\ln\left(\frac{T_{h,s} - T_{c,s}}{T_{h,e} - T_{c,e}}\right) = -\frac{UA}{C_{\min}} \left(1 + \frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right)$$

ou da Eq. 11.25

$$\frac{T_{h,s} - T_{c,s}}{T_{h,e} - T_{c,e}} = \exp\left[-NUT\left(1 + \frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right)\right]$$

Rearrmando o lado esquerdo dessa expressão como

$$\frac{T_{h,s} - T_{c,s}}{T_{h,e} - T_{c,e}} = \frac{T_{h,s} - T_{h,e} + T_{h,e} - T_{c,s}}{T_{h,e} - T_{c,e}}$$

e substituindo para $T_{c,s}$, da Eq. 11.27, segue que

$$\frac{T_{h,s} - T_{c,s}}{T_{h,e} - T_{c,e}} = \frac{(T_{h,s} - T_{h,e}) + (T_{h,e} - T_{c,e}) - (C_{\min}/C_{\max})(T_{h,e} - T_{c,e})}{T_{h,e} - T_{c,e}}$$

ou da Eq. 11.26

$$\frac{T_{h,s} - T_{c,s}}{T_{h,e} - T_{c,e}} = -\varepsilon + 1 - \left(\frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right)\varepsilon = 1 - \varepsilon \left(1 + \frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right)$$

Substituindo a expressão anterior na Eq. 11.28 e resolvendo para ε , obtemos para o trocador de calor com correntes paralelas

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp\{-NUT[1 + (C_{\min}/C_{\max})]\}}{1 + (C_{\min}/C_{\max})} \quad (11.29)$$