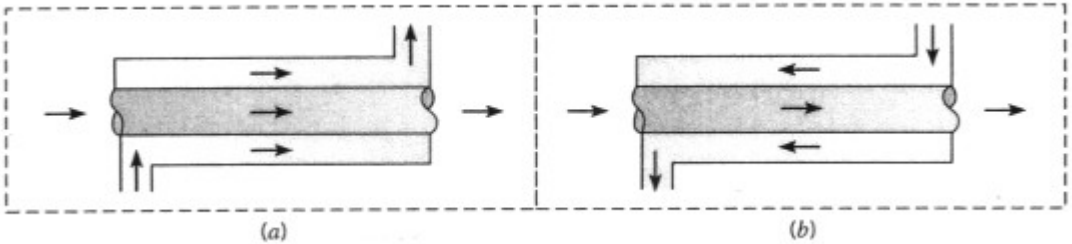
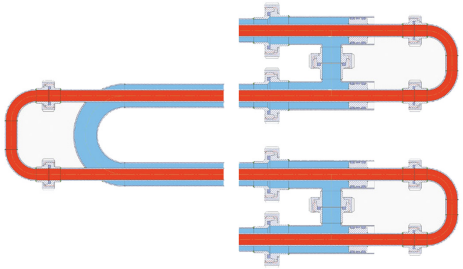
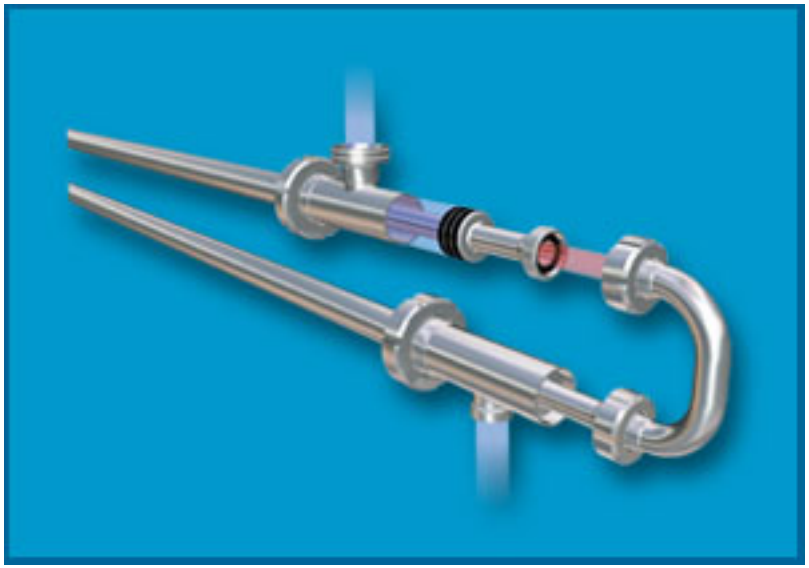
Capítulo 11: Trocadores de Calor

- Trocadores de calor são classificados pelo arranjo de escoamento e tipo de construção

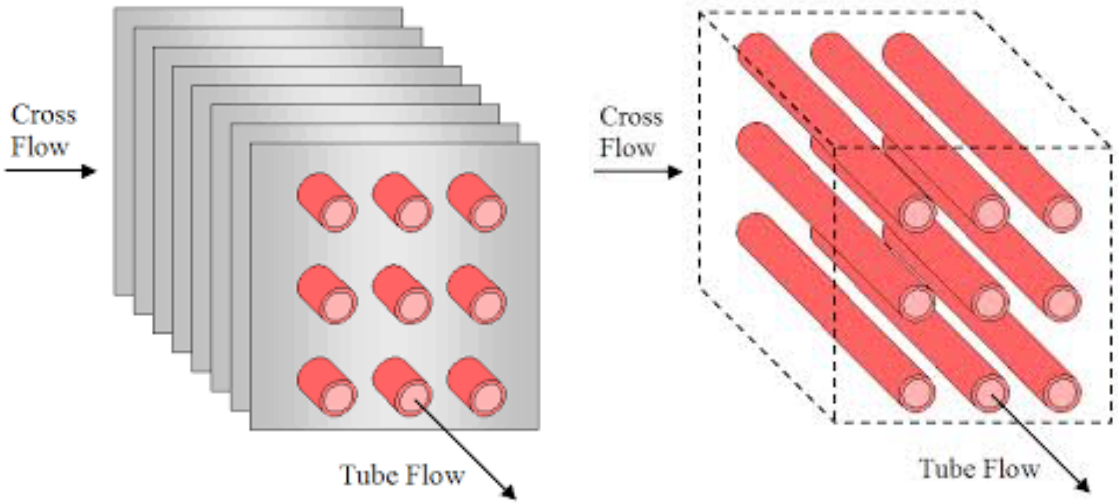
- Escoamento em paralelo (correntes opostas ou alinhadas)







- Escoamento cruzado (misturado ou não misturado)



- Tubo e carcaça

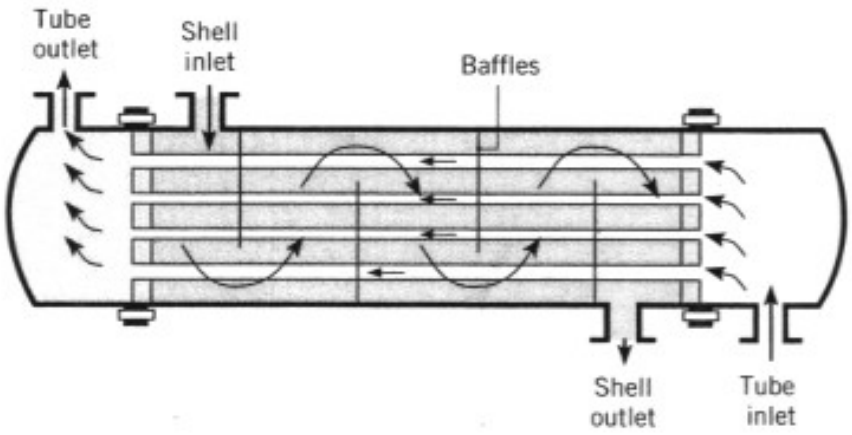
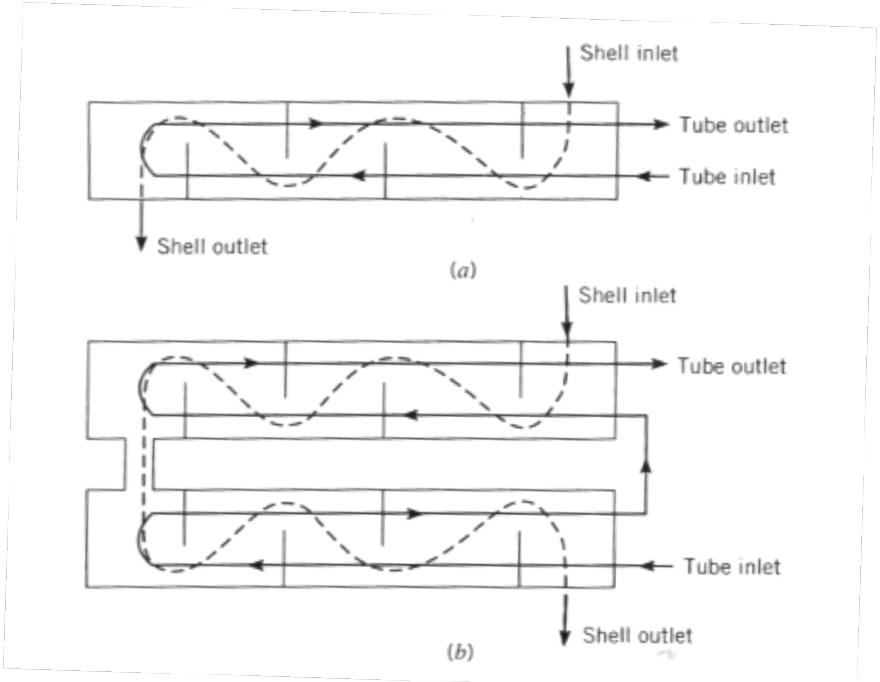
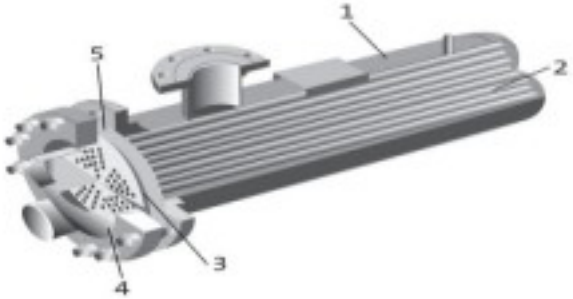
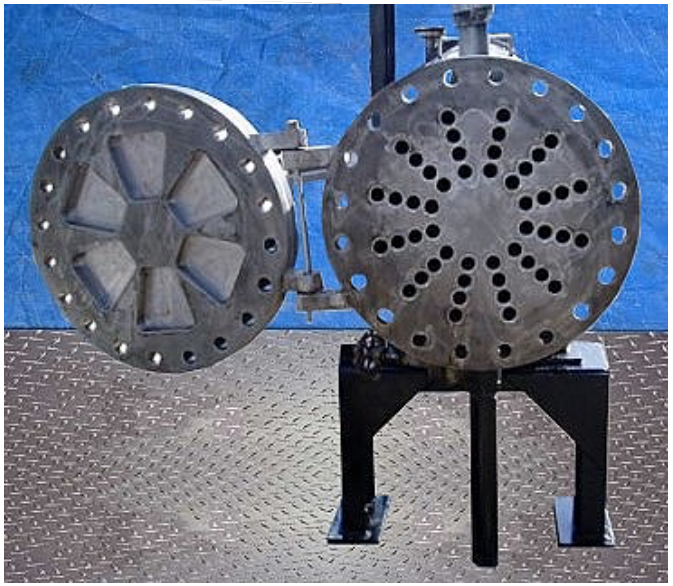


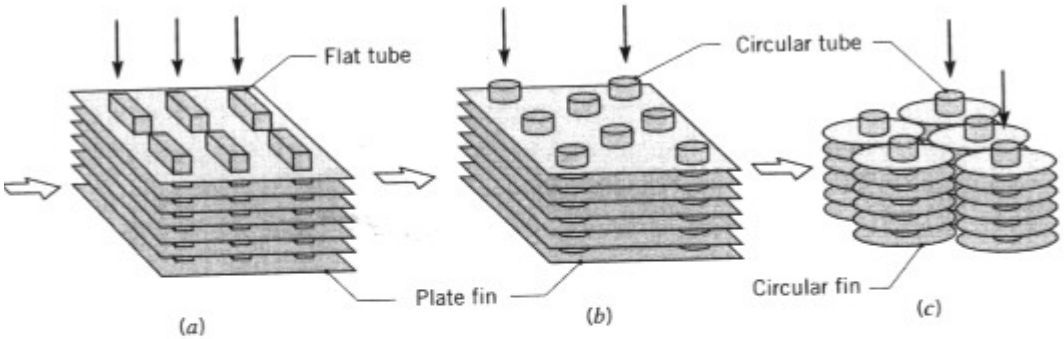
FIGURE 11.3 Shell-and-tube heat exchanger with one shell

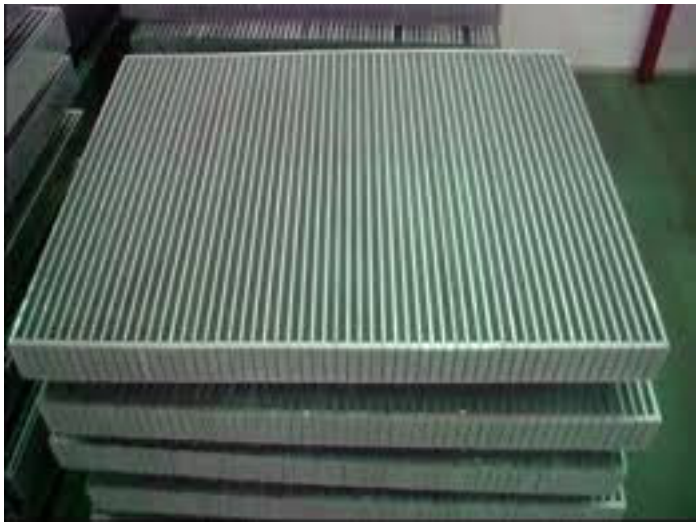


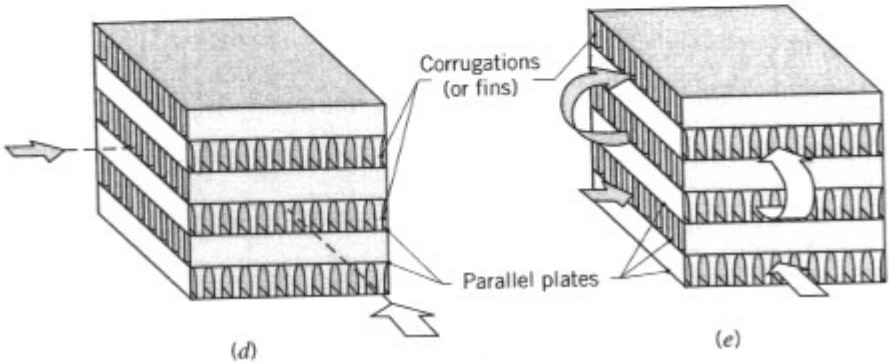




•Trocadores de calor compactos (alta densidade de tubos aletados)







Taxa de Transferência de Calor

$$q = UA\Delta T_{ref}$$

➢ Coeficiente global de troca de calor

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{U_c A_c} = \frac{1}{U_h A_h}$$

c – fluido frio (cold)
h - fluido quente (hot)

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{(\eta_o hA)_c} + \frac{R''_{f,c}}{(\eta_o A)_c} + R_w + \frac{R''_{f,h}}{(\eta_o A)_h} + \frac{1}{(\eta_o hA)_h}$$

R_f - resistência térmica adicional devida a deposição de partículas na parede ("*fouling factor*")

η_o - eficiência da superfície ou efetividade da temperatura

obs: em geral R_{cond} é desprezado pois usa-se paredes finas e materiais com altos k

Desprezando R_f:

$$q = \eta_o hA(T_m - T_\infty)$$

$$\eta_o = 1 - \frac{A_f}{A}(1 - \eta_f)$$

η_o - eficiência da superfície ou efetividade da temperatura

η_f - eficiência de uma aleta (Tabela 3.5)

A_f - área total da superfície das aletas

A - área total da superfície

obs: se R_f não é desprezível, deve-se utilizar $U=h/(1+hR_f'')$ ao invés de h na expressão para q

Resistência adicional

Fluid	R''_f (m² · K/W)
Seawater and treated boiler feedwater (below 50°C)	0.0001
Seawater and treated boiler feedwater (above 50°C)	0.0002
River water (below 50°C)	0.0002–0.001
Fuel oil	0.0009
Refrigerating liquids	0.0002
Steam (nonoil bearing)	0.0001

Coeficiente global

Fluid Combination	U (W/m² · K)
Water to water	850–1700
Water to oil	110–350
Steam condenser (water in tubes)	1000–6000
Ammonia condenser (water in tubes)	800–1400
Alcohol condenser (water in tubes)	250–700
Finned-tube heat exchanger (water in tubes, air in cross flow)	25–50

-Para os trocadores sem aletas das figuras anteriores. o coeficiente global de troca de calor é dado por:

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o}$$

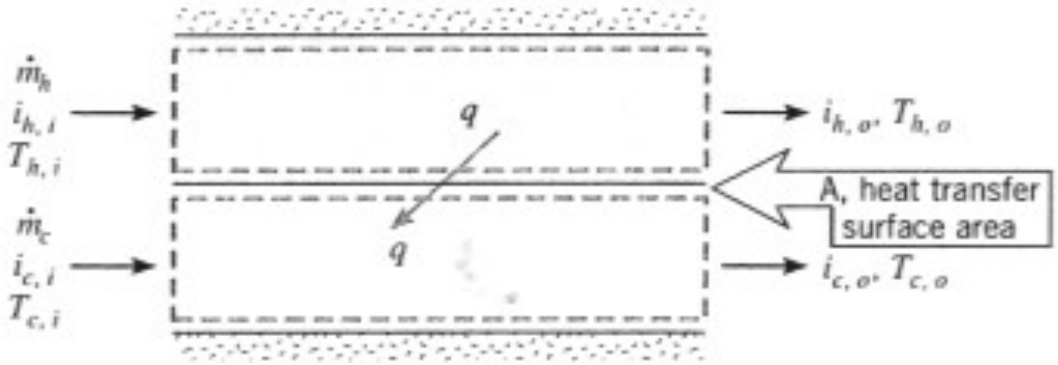
$$= \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R''_{f,i}}{A_i} + \frac{\ln(D_o / D_i)}{2\pi k L} + \frac{R''_{f,o}}{A_o} + \frac{1}{h_o A_o}$$

- Diferença média logaritmica de temperatura

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

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

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



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

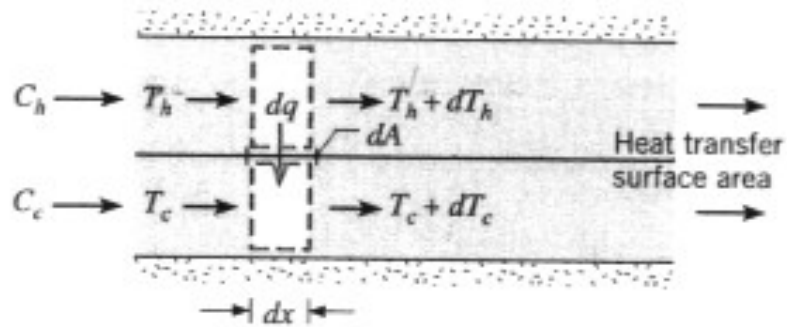
ΔT_m - diferença média característica de temperatura

$$\Delta T \equiv T_h - T_c$$

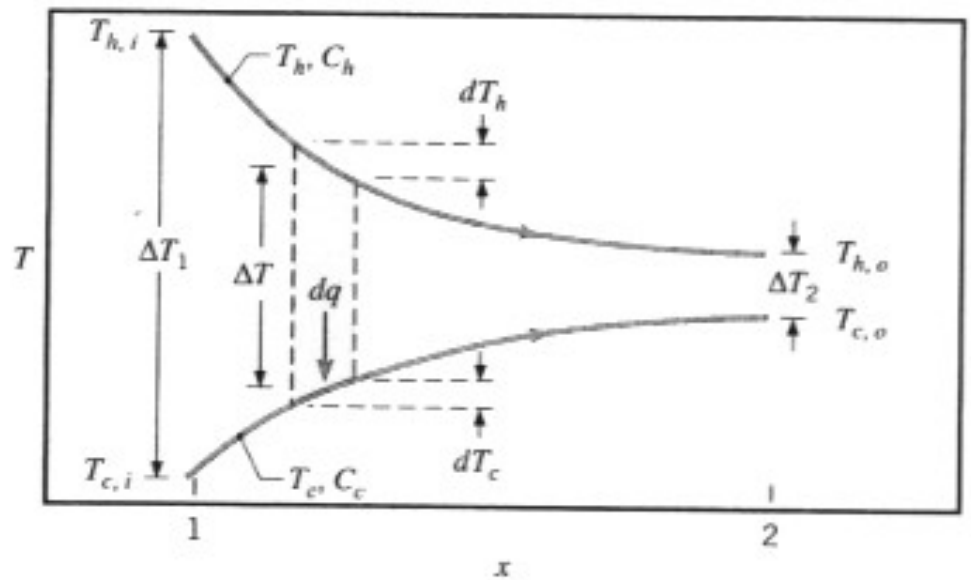
$$q = UA\Delta T_m$$

- Trocador de calor com correntes paralelas (CP)

- ΔT_m é determinado por um balanço de calor num elemento de fluido, para os fluidos quente e frio



- Hipóteses:
  - TC isolado;
  - condução axial desprezível;
  - U, c_p e c_v ctes;
  - Ep e Ec desprezíveis



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

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

$$dq = U \Delta T dA$$

Convenção: 1- entrada do trocador
2 - saída do trocador

C - capacitância térmica

$\Delta T = T_h - T_c$ - diferença local de temperatura

$$d(\Delta T) = dT_h - dT_c \Rightarrow d(\Delta T) = -dq\left(\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c}\right) \qquad dq = U\Delta T dA$$

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

Logo $$\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right) = -UA\left(\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c}\right) = -UA\left(\frac{T_{h,i} - T_{h,o}}{q} + \frac{T_{c,o} - T_{c,i}}{q}\right)$$

$$= \frac{-UA}{q}\left[\left(T_{h,i} - T_{c,i}\right) - \left(T_{h,o} - T_{c,o}\right)\right]$$

Para escoamento paralelo,

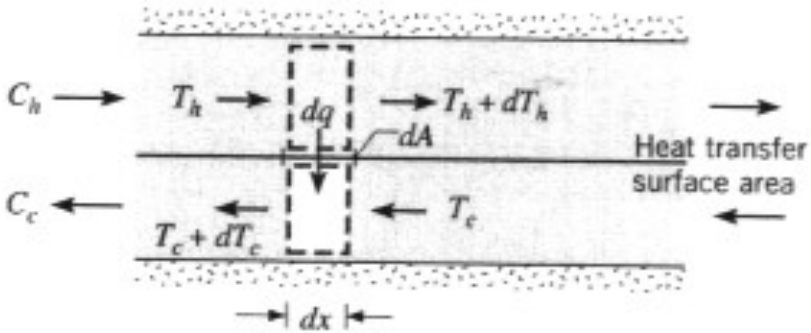
$$\Delta T_2 = \left(T_{h,o} - T_{c,o}\right)$$

$$\Delta T_1 = \left(T_{h,i} - T_{c,i}\right)$$

$$\Rightarrow q = UA\underbrace{\frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\mathbf{ln}(\Delta T_2 / \Delta T_1)}}_{=\Delta T_{lm}} = UA\Delta T_{lm}$$

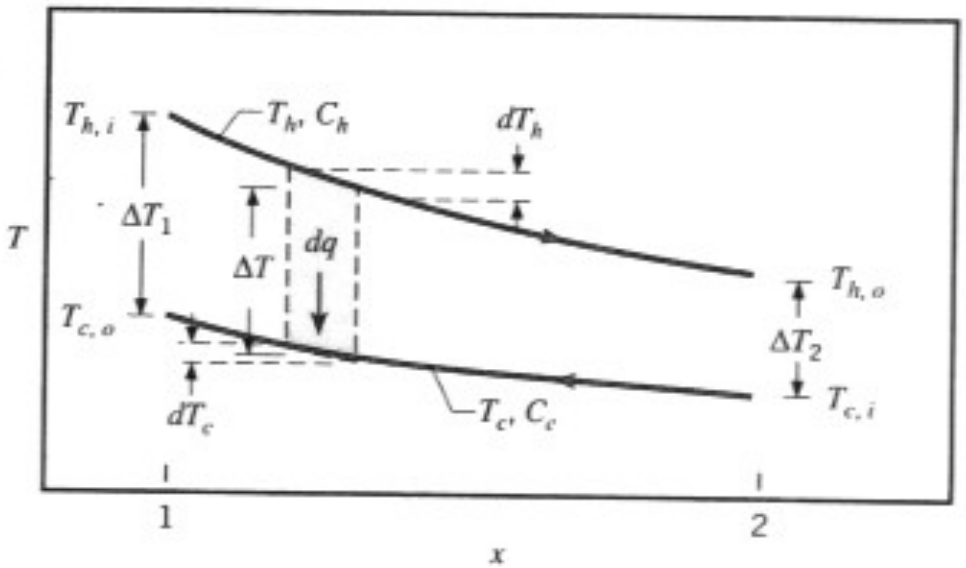
- Trocador de calor com escoamento contra-corrente (CC)

- As mesmas equações obtidas para trocadores de correntes paralelas devem ser utilizadas. Porém, agora tem-se:



$$\Delta T_1 = \left(T_{h,1} - T_{c,1}\right) = \left(T_{h,i} - T_{c,o}\right)$$

$$\Delta T_2 = \left(T_{h,2} - T_{c,2}\right) = \left(T_{h,o} - T_{c,i}\right)$$

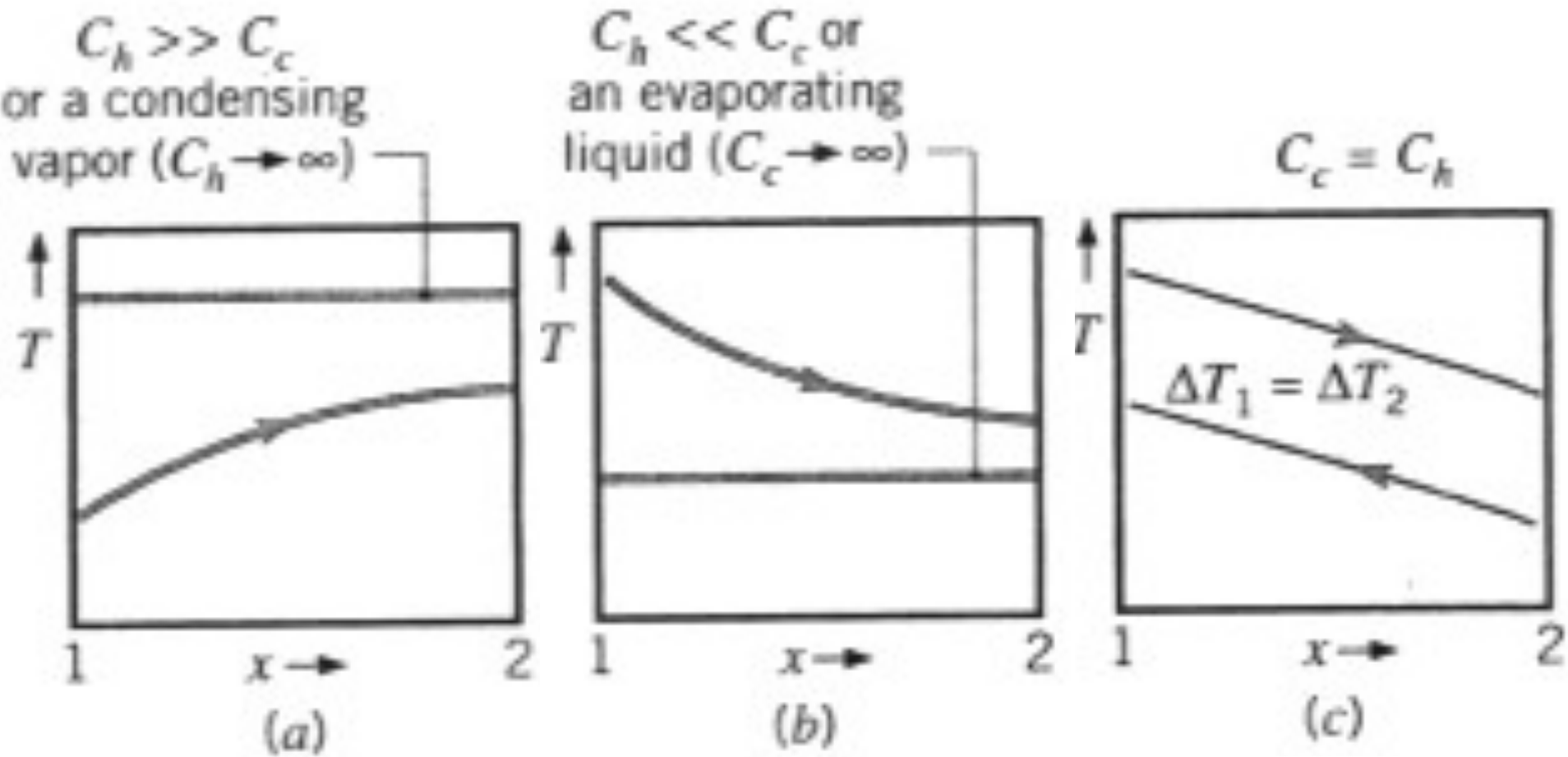


- Para as mesmas temperaturas na entrada e saída, $\Delta T_{lm,CC} > \Delta T_{lm,CP}$

$\Rightarrow$para um mesmo U, a área superficial requerida para o trocador CC é menor do que para o trocador CP

- Casos especiais:

$$dq = -C_h dT_h = C_c dT_c$$



Trocadores de calor com mais de um passe e com escoamento cruzado

-As equações obtidas podem ser utilizadas com a seguinte correção: $\Delta T_{lm} = F\ \Delta T_{lm,CC}$

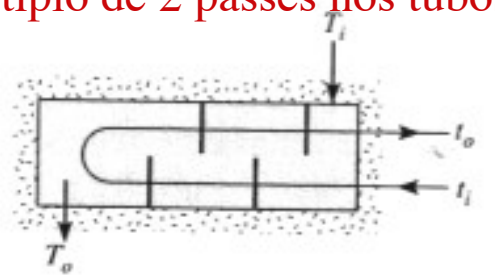
-Deve-se utilizar os mesmos ΔT_1 e ΔT_2 do CC

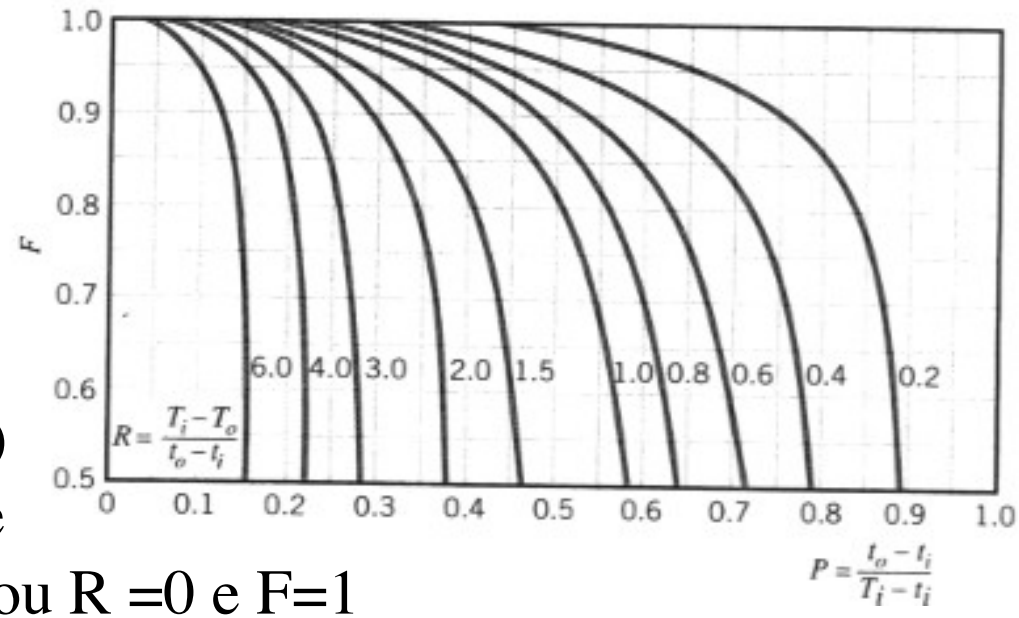
-F pode ser obtido por gráficos

- T e t podem corresponder a qualquer fluido (quente ou frio)

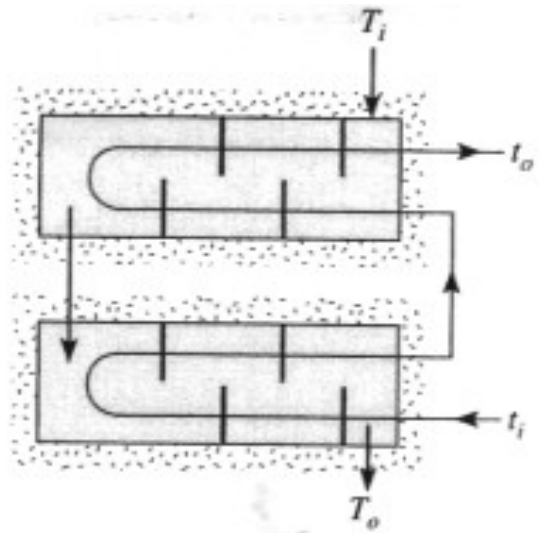
-Se a variação de temperatura de algum fluido for desprezível, P ou R =0 e F=1 ⇒comportamento do TC é independente da configuração

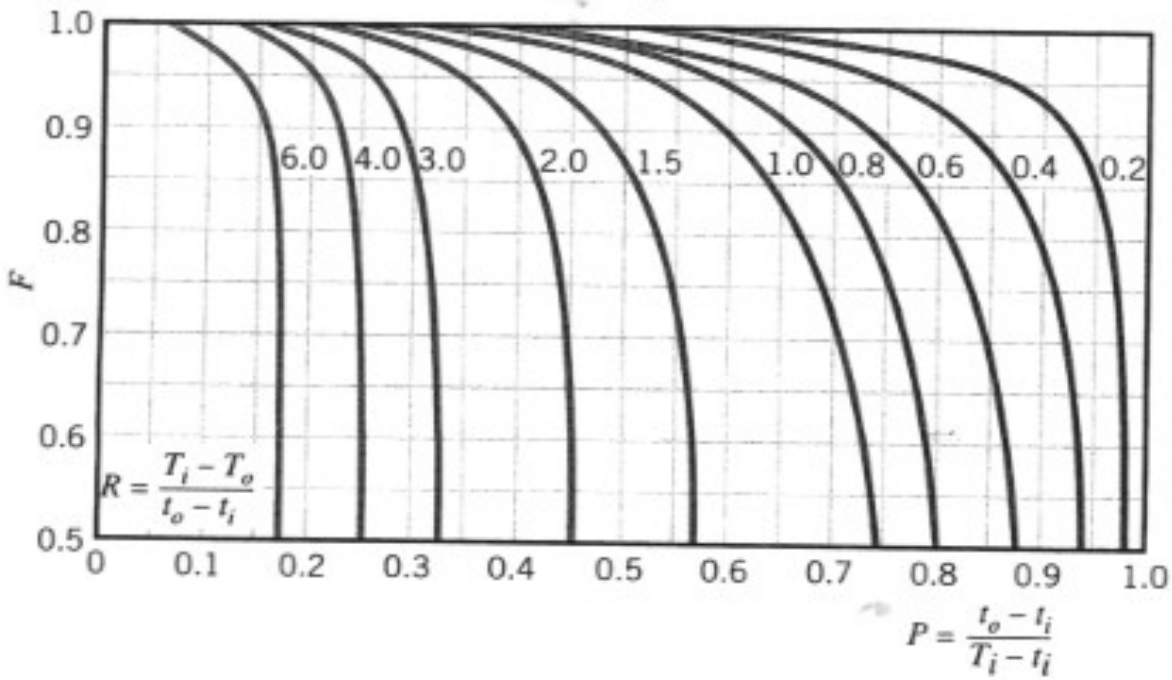
TC tubo e carcaça,1 passe na carcaça e múltiplo de 2 passes nos tubos (2,4, 8, etc)



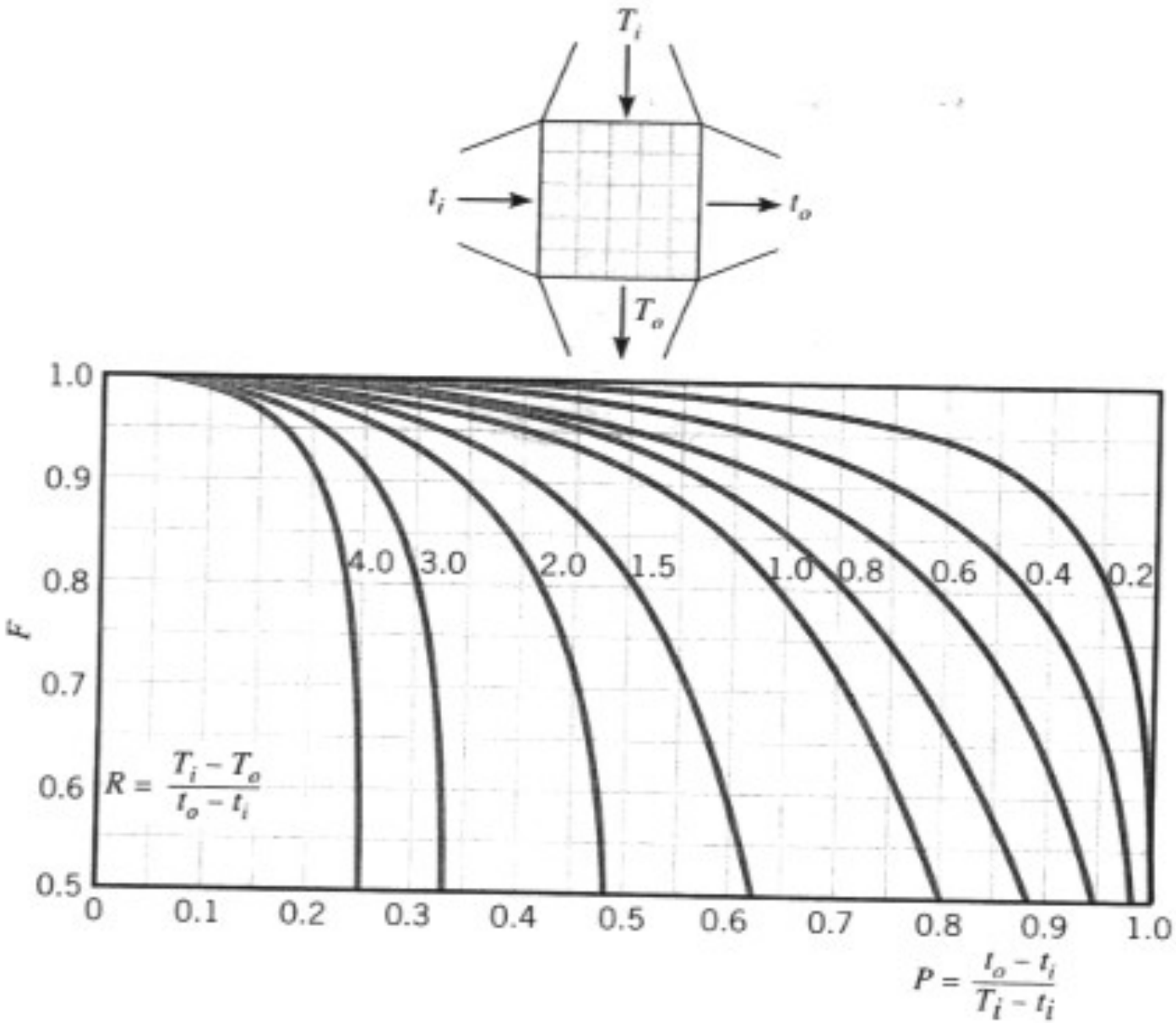


TC tubo e carcaça, 2 passes na carcaça e qualquer múltiplo de 4 passes nos tubos (4, 8, etc)

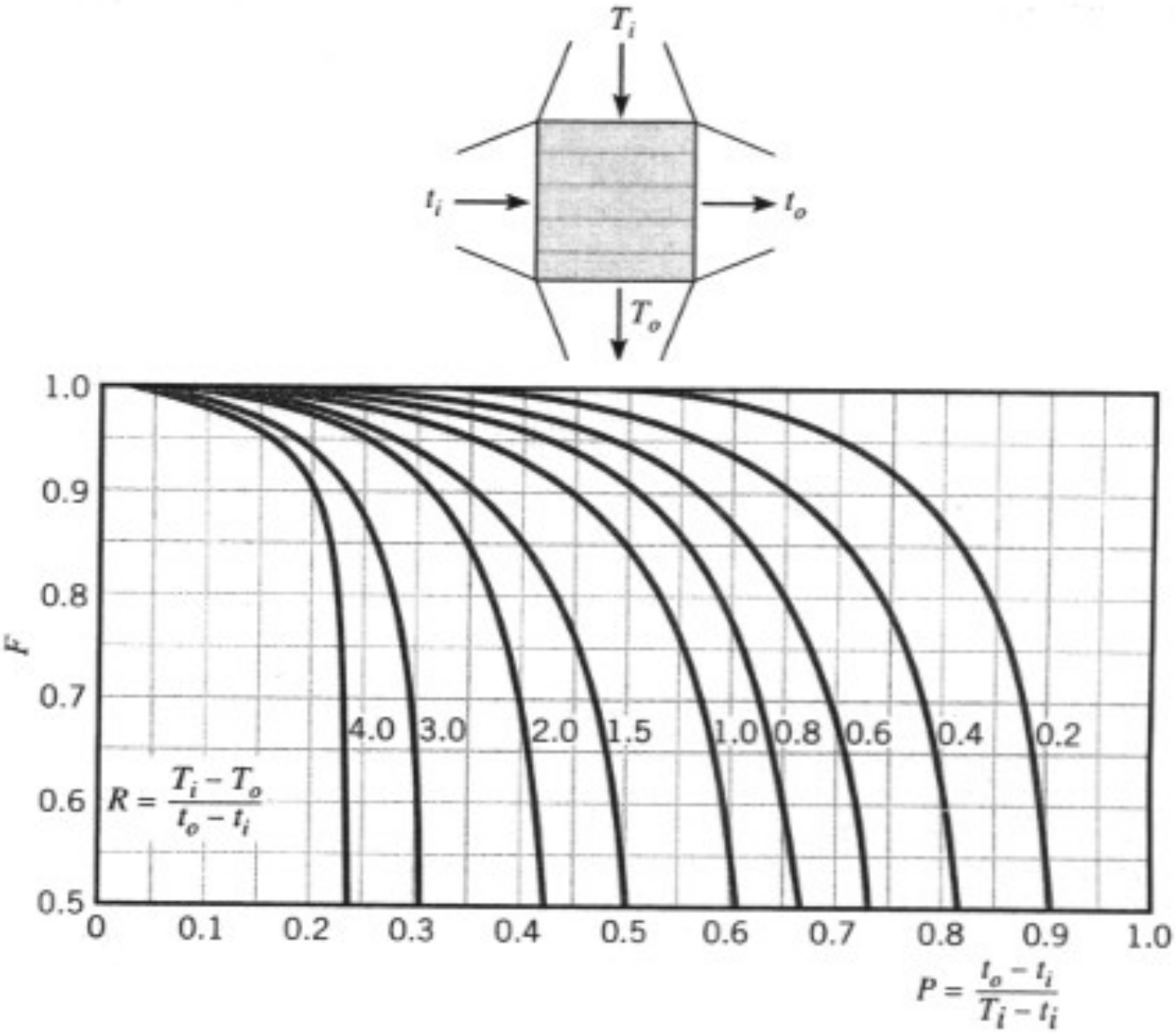




TC 1 passe, escoamento cruzado, fluidos não misturados



TC 1 passe, escoamento cruzado, 1 fluido misturado



Exemplo:

Um trocador de calor bitubular (tubos concêntricos) com configuração contra-corrente é utilizado para resfriar o óleo lubrificante para um grande motor de turbina a gás industrial. A vazão em massa da água de resfriamento através do tubo interno (D_i=25 mm) é de 0,2 kg/s, enquanto que a vazão do óleo através da região anular (D_e=45 mm) é 0,1 kg/s. O óleo e a água entram a temperaturas de 100 e 30°C, respectivamente. Qual deve ser o comprimento do trocador, para obter uma temperatura de saída do óleo a 60°C?

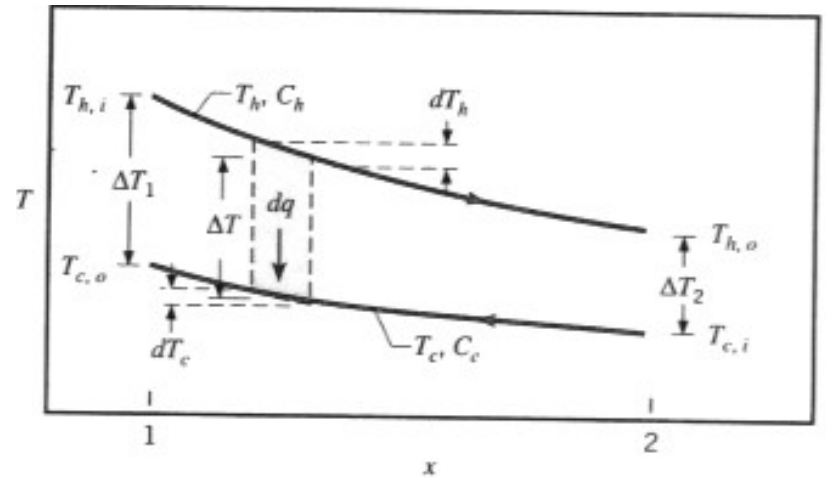
Exemplo:

Um trocador tubo e carcaça deve ser projetado para aquecer 2,5 kg/s de água de 15 ^{0}C a 85 ^{0}C. O aquecimento deve ser obtido com a passagem de óleo motor, disponível a 160 ^{0}C, do lado da carcaça. No escoamento do óleo, o coeficiente de troca de calor externo aos tubos é conhecido e igual a h_o=400 W/m^{2}K. A água escoa através de dez tubos. Cada tubo tem paredes finas e diâmetro igual a 25 mm, e faz 8 passes na carcaça. Se o óleo deixa o trocador a 100 ^{0}C, qual é a sua vazão mássica? Qual deve ser o comprimento dos tubos para o aquecimento desejado?

$$q = \dot{m}_c c_{p,c}(T_{c,i} - T_{c,o}) = 2{,}5 \times 4181 \times (85 - 15) = 7.317 \times 10^5 W$$

$$\dot{m}_h = q / [c_{p,h}(T_{h,i} - T_{h,o})] = 731700 / [2350 \times (160 - 100)] = 5.19 kg / s$$

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



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

Para escoamento cruzado,

$$\Delta T_1 = (T_{h,i} - T_{c,o}) = 160 - 85 = 75$$

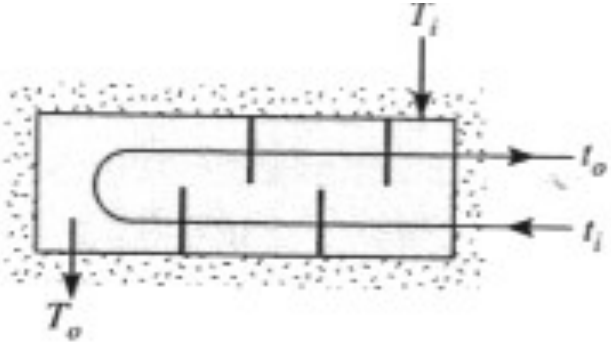
$$\Delta T_2 = (T_{h,o} - T_{c,i}) = 100 - 15 = 85$$

$$\Delta T_{lmCC} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)} = \frac{85 - 75}{\ln(85/75)} = 79{,}9$$

R=(160-100)/(85-15)=0,857

$\Rightarrow F=0.98$

P=(85-15)/(160-15)=0,482

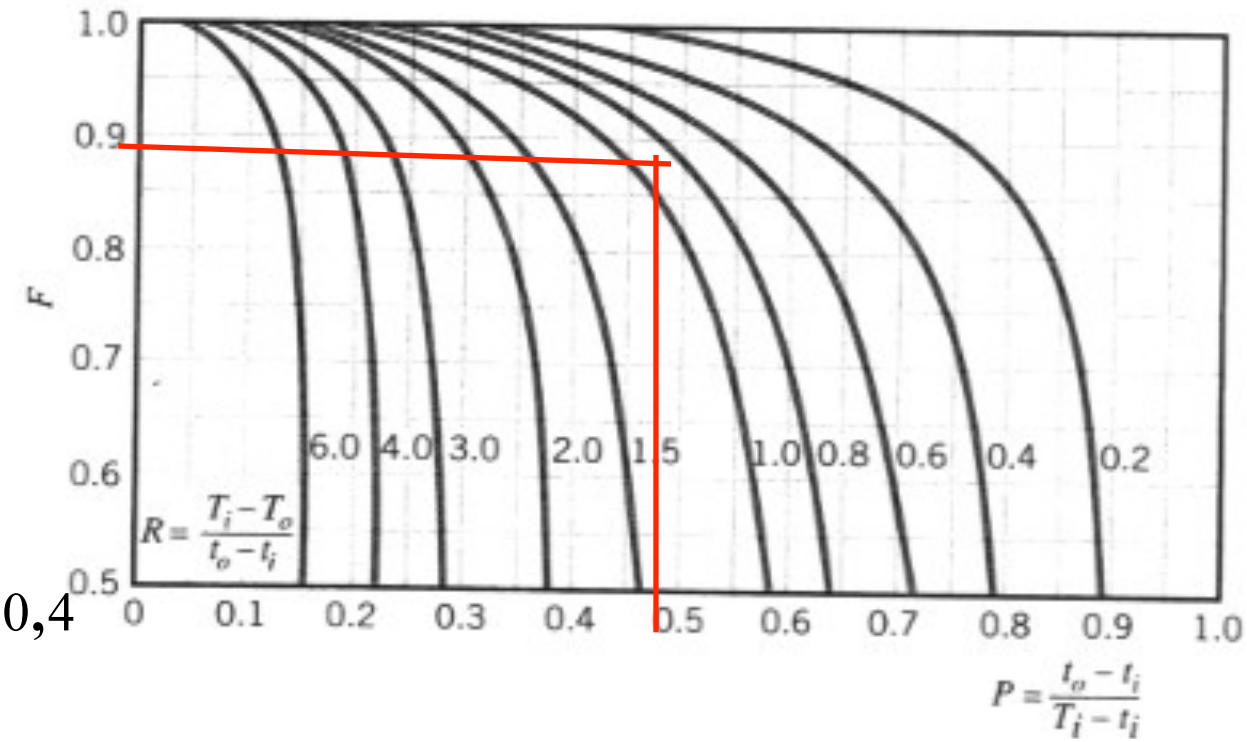


$\Delta T_{lm}= F\ \Delta T_{lm,CC}=56,2$

$$q = UN_t \pi DL\ \Delta T_{lm}$$

$$L = q / [UN_t \pi\ D\ \Delta T_{lm}]$$

$$U = \frac{1}{1/h_i + 1/h_o}$$



$$Nu_i = 0,023\,\mathbf{Re}_i^{4/5}\ \mathbf{Pr}^{0,4}$$

$$\mathbf{Re}_i = \frac{\rho\, u_m D}{\mu} = \frac{4\dot{m} / N_t}{\pi\, D\, \mu} = \frac{4 \times 2{,}5 / 10}{\pi\, 0{,}025\, 0{,}548} = 23234$$

$$\mathbf{Pr} = 3{,}56$$

$$Nu_i = 0{,}023\, \mathbf{Re}_i^{4/5}\, \mathbf{Pr}^{0{,}4} = 119 \Rightarrow h_i = \frac{Nu_i k}{D} = \frac{119 \times 0{,}643}{0{,}025} = 3061 \frac{W}{m^2 K}$$

$$U = \frac{1}{1/h_i + 1/h_o} = 354 \frac{W}{m^2 K}$$

$$L = \frac{q}{[U N_t\, \pi\, D\, \Delta T_{lm}]} = \frac{731700}{354 \times 10 \times \pi \times 0{,}025 \times 79{,}9}$$

$$L = 37{,}9 m \quad L_{carcaca} = \frac{L}{N_p} = \frac{37{,}9}{8} = 4{,}7 m$$

- Análise de trocadores de calor: método NTU da efetividade

-O método da DMLT só é bom ser utilizado quando conhecemos as temperaturas na entrada e saída do TC. Quando as temperaturas não são conhecidas, o processo é iterativo.

-Nestes casos, pode-se utilizar uma análise alternativa: o método NTU da efetividade

-Efetividade do TC: $$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}}$$

- q - troca de calor real
- q_{max} - máxima troca de calor possível

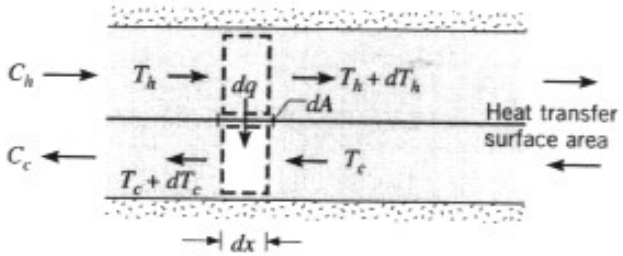
-q_{max} : TC com L→∞

-Exemplo: TC é CC, $C_c < C_h (\Rightarrow |dT_c| > |dT_h|)$ e $T_{c,o}=T_{h,i}$

Observa-se que quando $C_c < C_h$: $q_{max}=C_c(T_{h,i}-T_{c,i})$

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

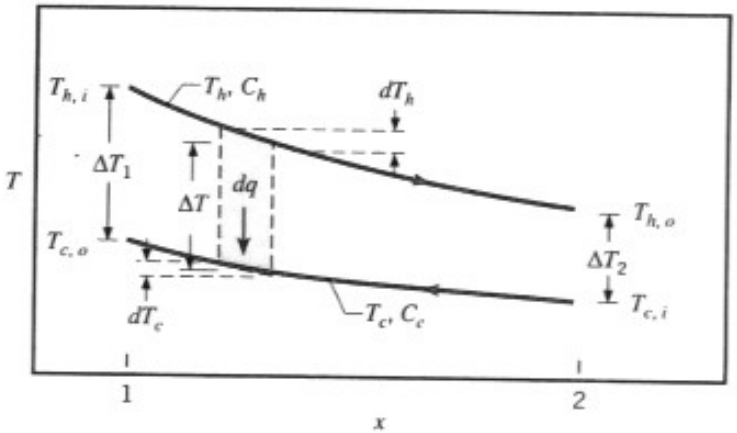
$\Rightarrow q_{max}=C_{min}(T_{h,i}-T_{c,i})$



$$\text{Logo,} \quad \varepsilon = \frac{C_h\left(T_{h,i} - T_{h,o}\right)}{C_{\min}\left(T_{h,i} - T_{c,i}\right)}$$

$$\text{ou} \quad \varepsilon = \frac{C_c\left(T_{c,o} - T_{c,i}\right)}{C_{\min}\left(T_{h,i} - T_{c,i}\right)}$$

$$0 \le \varepsilon \le 1$$



-Se ε, $T_{h,i}$ e $T_{c,i}$ são conhecidos, pode-se determinar q: $q=\varepsilon C_{min}(T_{h,i}-T_{c,i})$

- Para qualquer TC, mostra-se que:

$$\varepsilon = f\left(NTU, \frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right)$$

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

- NTU: número de unidades de transferência

- Relações para o cálculo da efetividade

- Para o TC correntes paralelas com $C_{min}=C_h$:

$$\varepsilon = \frac{T_{h,i} - T_{h,o}}{T_{h,i} - T_{c,i}}$$

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

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

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

$$\varepsilon + \varepsilon \frac{C_{\mathbf{min}}}{C_{\mathbf{max}}} = \frac{T_{h,i} - T_{h,o}}{T_{h,i} - T_{c,i}} + \frac{T_{c,o} - T_{c,i}}{T_{h,i} - T_{c,i}} = 1 - \frac{T_{h,o} - T_{c,o}}{T_{h,i} - T_{c,i}}$$

Usando as equações acima, chega-se a

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

obs: o mesmo resultado é obtido quando $C_{min}=C_c$

- Relações para o cálculo da efetividade

- Para o TC correntes paralelas com $C_{min}=C_h$:

do balanço de energia :

$$\ln\left(\frac{T_{h,o}-T_{c,o}}{T_{h,i}-T_{c,i}}\right)=-\frac{UA}{C_{\mathbf{min}}}\left(1+\frac{C_{\mathbf{min}}}{C_{\mathbf{max}}}\right)\Rightarrow\left(\frac{T_{h,o}-T_{c,o}}{T_{h,i}-T_{c,i}}\right)=\exp\left[-NTU\left(1+\frac{C_{\mathbf{min}}}{C_{\mathbf{max}}}\right)\right]$$

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

Substituindo esta eq. na anterior :

$$\varepsilon=\frac{1-\exp\left\{-\mathrm{NTU}\left[1+(C_{\mathbf{min}}/C_{\mathbf{max}})\right]\right\}}{1+(C_{\mathbf{min}}/C_{\mathbf{max}})}$$

obs: o mesmo resultado é obtido quando $C_{min}=C_c$

$C_r = C_{min}/C_{max}$

NTU=n(NTU)$_1$
ε_1 é calculado da eq. anterior, com (NTU)$_1$

eq. exata p/ C_r=1 e boa aproximação p/ $0<C_r<=1$

TABLE 11.3 Heat Exchanger Effectiveness Relations [5]

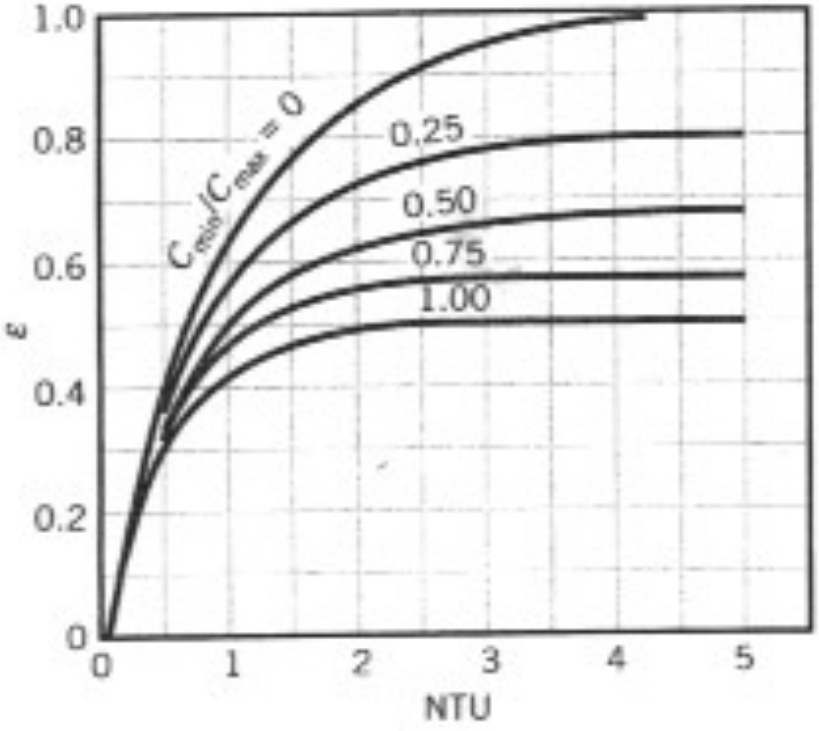
Flow Arrangement	Relation		
Concentric tube			
Parallel flow	$\varepsilon = \dfrac{1-\exp[-\mathrm{NTU}(1+C_r)]}{1+C_r}$		(11.29a)
Counterflow	$\varepsilon = \dfrac{1-\exp[-\mathrm{NTU}(1-C_r)]}{1-C_r\exp[-\mathrm{NTU}(1-C_r)]}$	$(C_r<1)$	
	$\varepsilon = \dfrac{\mathrm{NTU}}{1+\mathrm{NTU}}$	$(C_r=1)$	(11.30a)
Shell and tube			
One shell pass (2, 4, . . . tube passes)	$\varepsilon_1 = 2\left\{1+C_r+(1+C_r^2)^{1/2}\right.$		
	$\left.\times\dfrac{1+\exp[-\mathrm{NTU}(1+C_r^2)^{1/2}]}{1-\exp[-\mathrm{NTU}(1+C_r^2]^{1/2}]}\right\}^{-1}$		(11.31a)
n Shell passes ($2n$, $4n$, . . . tube passes)	$\varepsilon = \left[\left(\dfrac{1-\varepsilon_1 C_r}{1-\varepsilon_1}\right)^n - 1\right]\left[\left(\dfrac{1-\varepsilon_1 C_r}{1-\varepsilon_1}\right)^n - C_r\right]^{-1}$		(11.32a)
Cross flow (single pass)			
Both fluids unmixed	$\varepsilon = 1-\exp\left[\left(\dfrac{1}{C_r}\right)(\mathrm{NTU})^{0.22}\{\exp[-C_r(\mathrm{NTU})^{0.78}]-1\}\right]$		(11.33)
C_{max} (mixed), C_{min} (unmixed)	$\varepsilon = \left(\dfrac{1}{C_r}\right)(1-\exp\{-C_r[1-\exp(-\mathrm{NTU})]\}$		(11.34a)
C_{max} (mixed), C_{min} (unmixed)	$\varepsilon = 1-\exp(-C_r^{-1}\{1-\exp[-C_r(\mathrm{NTU})]\})$		(11.35a)
All exchangers ($C_r = 0$)	$\varepsilon = 1-\exp(-\mathrm{NTU})$		(11.36a)

TABLE 11.4 Heat Exchanger NTU Relations

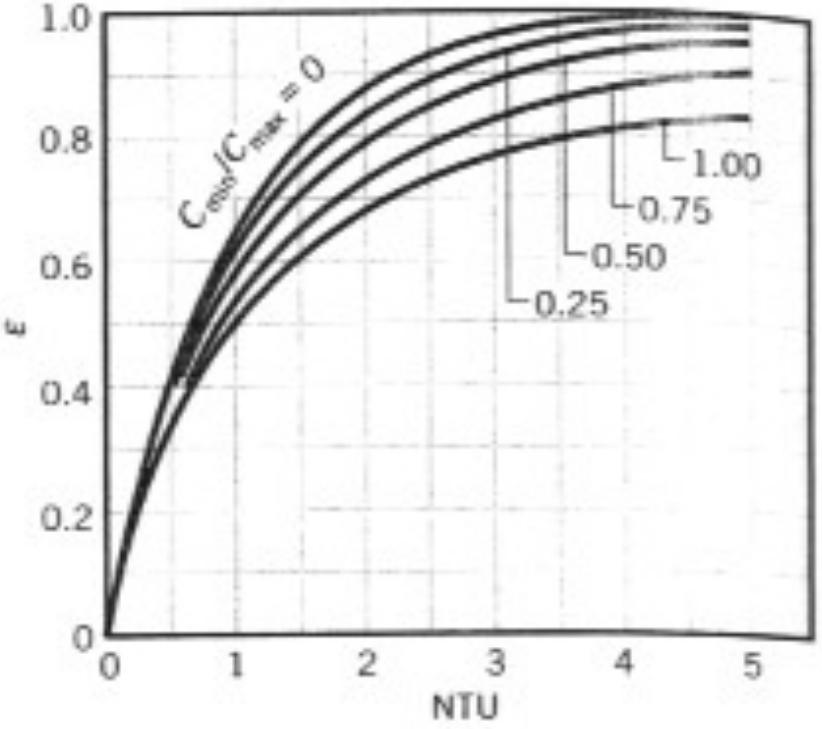
Flow Arrangement	Relation	
Concentric tube		
Parallel flow	$\mathrm{NTU} = \dfrac{\ln[1 - \varepsilon(1 + C_r)]}{1 + C_r}$	(11.29b)
Counterflow	$\mathrm{NTU} = \dfrac{1}{C_r - 1}\ln\left(\dfrac{\varepsilon - 1}{\varepsilon C_r - 1}\right) \quad (C_r < 1)$	
	$\mathrm{NTU} = \dfrac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \quad (C_r = 1)$	(11.30b)
Shell and tube		
One shell pass (2, 4, . . . tube passes)	$\mathrm{NTU} = -(1 + C_r^2)^{-1/2}\ln\left(\dfrac{E - 1}{E + 1}\right)$	(11.31b)
	$E = \dfrac{2/\varepsilon_1 - (1 + C_r)}{(1 + C_r^2)^{1/2}}$	(11.31c)
n Shell passes ($2n$, $4n$, . . . tube passes)	Use Equations 11.31b and 11.31c with	
	$\varepsilon_1 = \dfrac{F - 1}{F - C_r} \quad F = \left(\dfrac{\varepsilon C_r - 1}{\varepsilon - 1}\right)^{1/n}$	(11.32b,c)
Cross flow (single pass)		
C_{max} (mixed), C_{min} (unmixed)	$\mathrm{NTU} = -\ln\left[1 + \left(\dfrac{1}{C_r}\right)\ln(1 - \varepsilon C_r)\right]$	(11.34b)
C_{min} (mixed), C_{max} (unmixed)	$\mathrm{NTU} = -\left(\dfrac{1}{C_r}\right)\ln[C_r\ln(1 - \varepsilon) + 1]$	(11.35b)
All exchangers ($C_r = 0$)	$\mathrm{NTU} = -\ln(1 - \varepsilon)$	(11.36b)

- Relações na forma gráfica

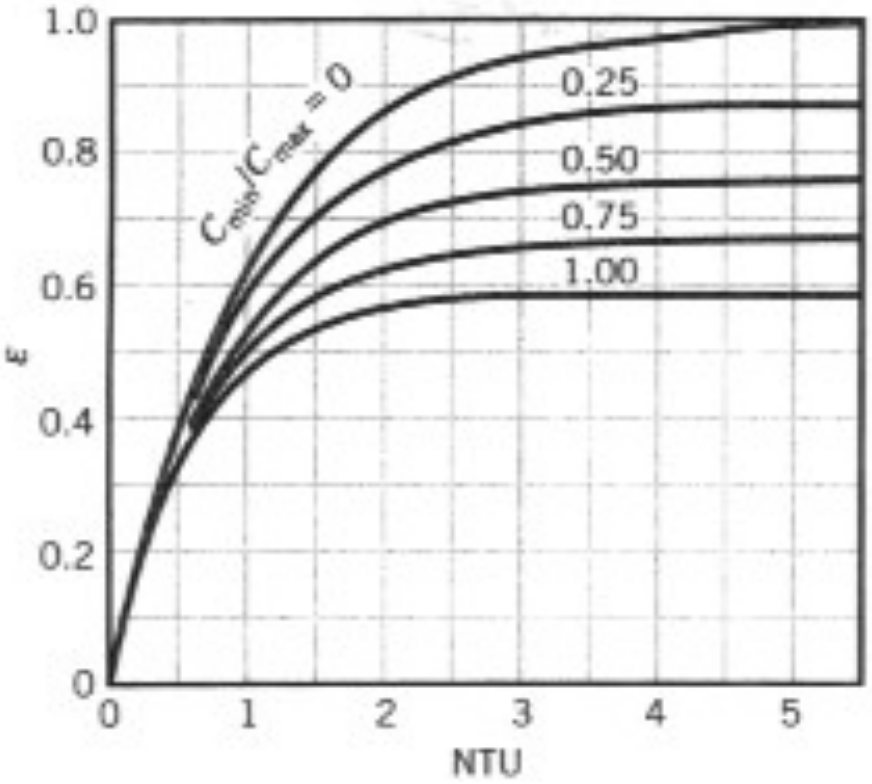
TC correntes paralelas



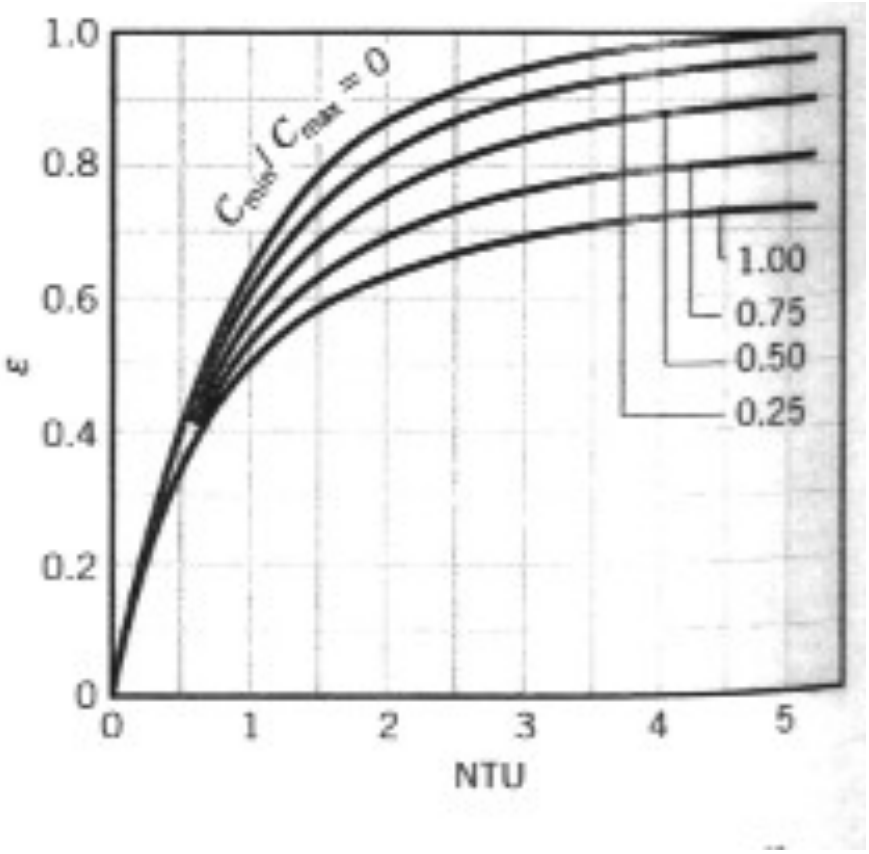
TC contra corrente



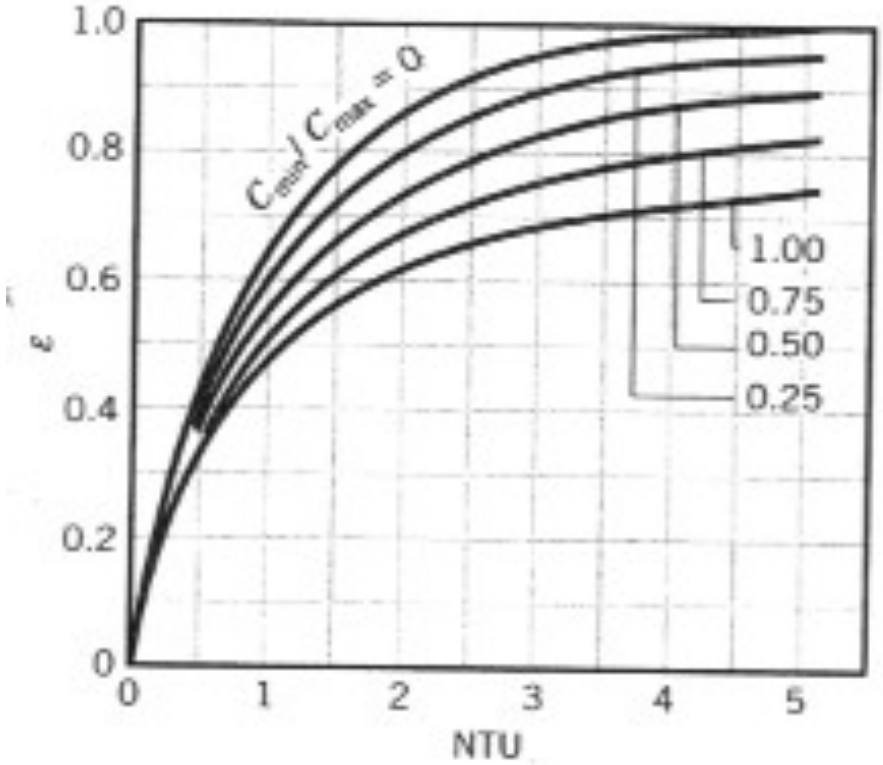
TC tubo e carcaça
1 passe carcaça e
2,4,… passes no tubo



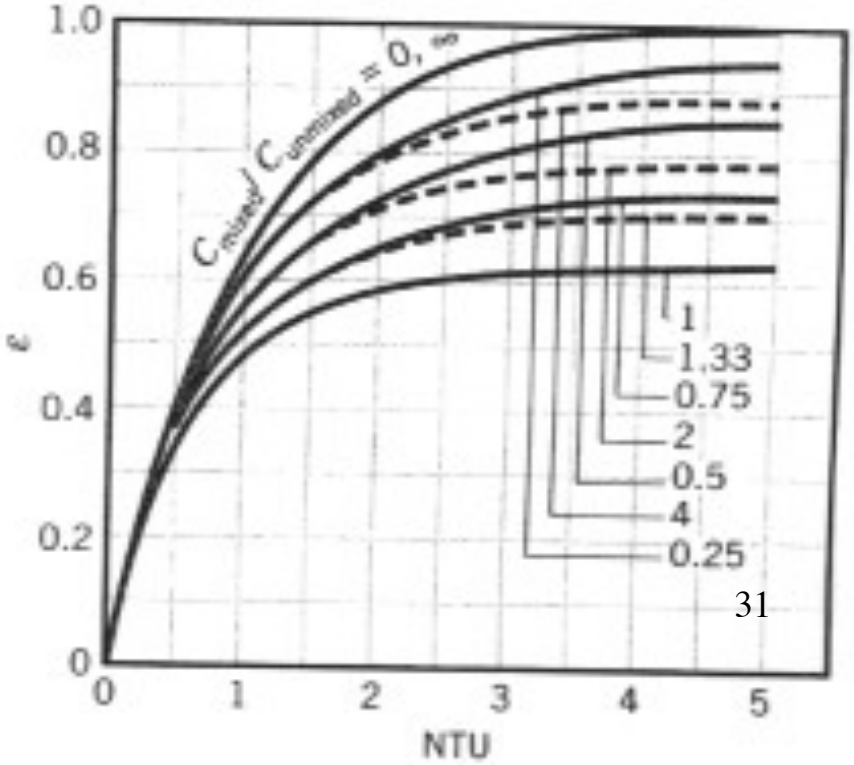
TC tubo e carcaça
2 passes carcaça e
2,4,… passes no tubo



TC correntes
cruzadas, 2
Fluidos não misturados



TC correntes
cruzadas, 1
fluido não misturado



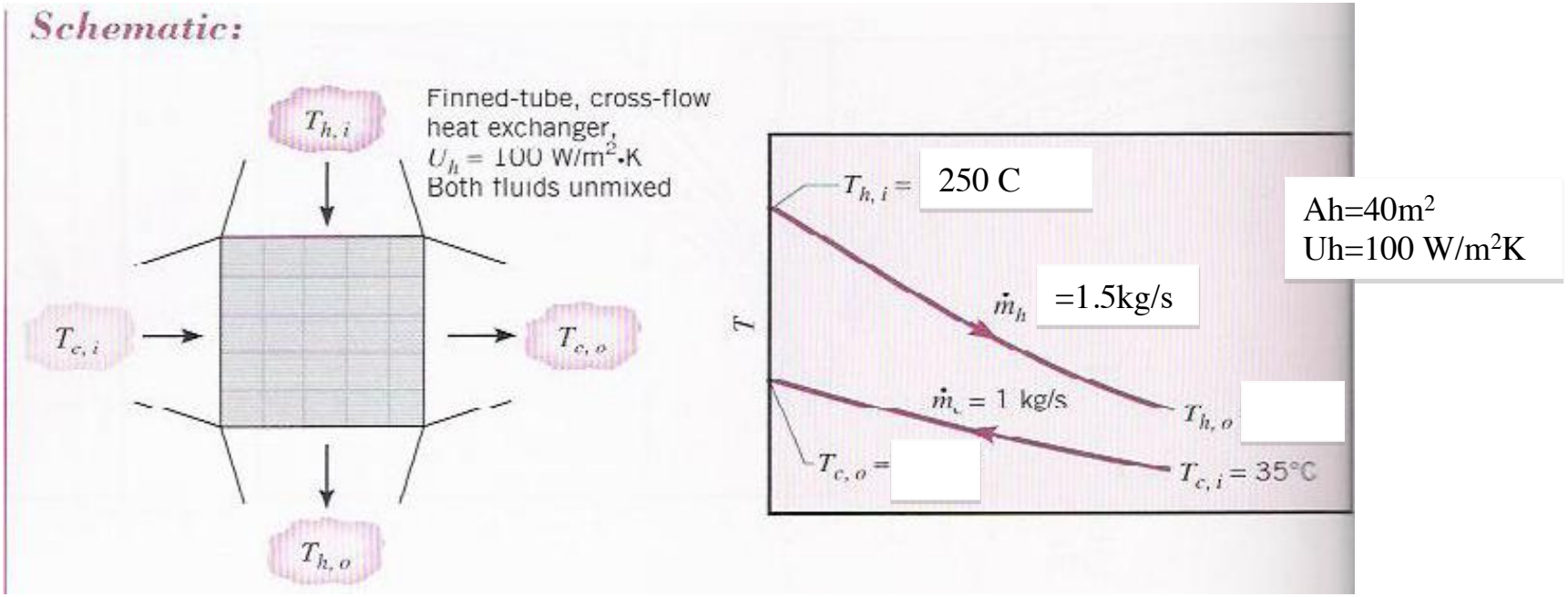
- Metodologia para o cálculo de Trocadores de Calor

-Projeto de trocadores de calor: em geral as temperaturas são conhecidas e deseja-se determinar a configuração, área de troca que fornecem a temperatura desejada na saída $\Rightarrow$ calcula-se q e uma das temperaturas de saída pelo balanço de energia e pode-se utilizar o método da LMTD para determinar o tipo e tamanho do TC

-Quando conhecemos o tipo e o tamanho do TC, e desejamos determinar as temperaturas na saída pode-se utilizar o método da LMTD, através de um processo iterativo, ou o método NTU (menos caro)

Exemplo

Exemplo: Trocador de calor de correntes cruzadas, ambos os fluidos não misturados. Coeficiente global de troca de calor 100 W/m^{2}K e área de troca 40 m^2. 1kg/s de água entra a 35 ^{0}C. O fluxo de massa de gás vale 1,5 kg/s e a temperatura na entrada é de 250 ^{0}C. Quais são as temperaturas de saída do gás e da água?



- Trocadores de calor compactos

- Usados quando se deseja uma grande área de troca de calor e quando pelo menos um dos fluidos é um gás
- Resultados são expressos em termos do fator j de Colburn

  $j_H = St Pr^{2/3}$; $St = h / G\, c_p$ e

  $G = \rho V_{max} = \rho\, V\, A_{fr}/A_{ff} = \rho\, V / \sigma$ $\qquad \sigma = A_{ff}/A_{fr}$
- onde A_{ff} é a área mínima de passagem (onde V é max) e A_{fr} é a área frontal do TC
- No cálculo de TC compactos, deve-se determinar h pelas correlações empíricas, e depois utilizar o método LMTD ou NTU

- Trocadores de calor compactos

- A queda de pressão no escoamento através de conjunto de tubos aletados pode ser estimado por:

$$\Delta p = \frac{G^2 v_i}{2}\left[\underbrace{\left(1+\sigma^2\right)\left(\frac{v_o}{v_i}-1\right)}_{\text{perdas na aceleração e desaceleração na entrada e saída do TC}} + \underbrace{f\,\frac{A}{A_{ff}}\,\frac{v_m}{v_i}}_{\text{perdas por atrito no núcleo do TC}}\right]$$

v – volume específico $\qquad v_m = 1/2(v_i + v_o)$

$v = 1/\rho$