

# Capítulo 11

## TROCADORES DE CALOR

PME2360 - TRANSFERÊNCIA DE CALOR

PROF. DR. GUENTHER CARLOS KRIEGER FILHO

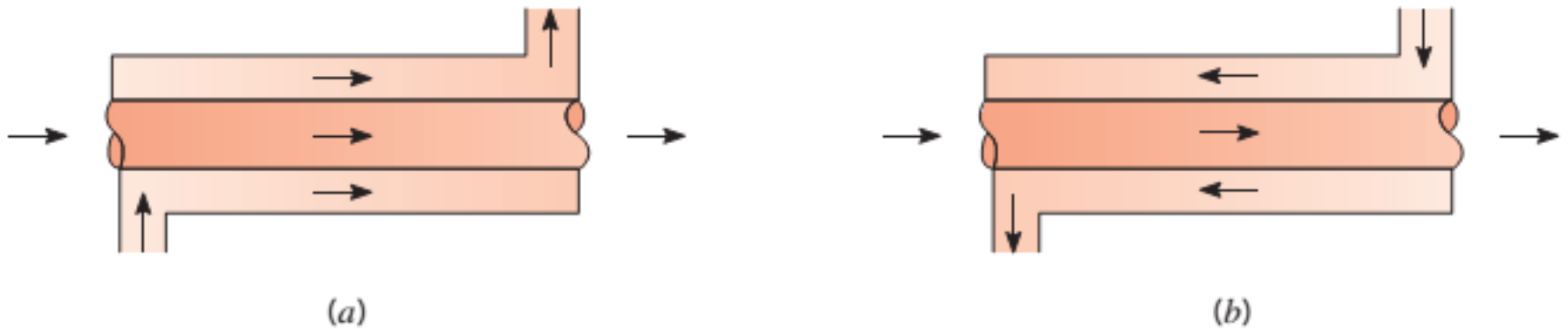
[guenther@usp.br](mailto:guenther@usp.br)

**Site LETE**

<http://www.lete.poli.usp.br/PME2360.html>

# 11.1 Tipos

- Tubos Concêntricos - Escoamento Paralelo ou Contracorrente

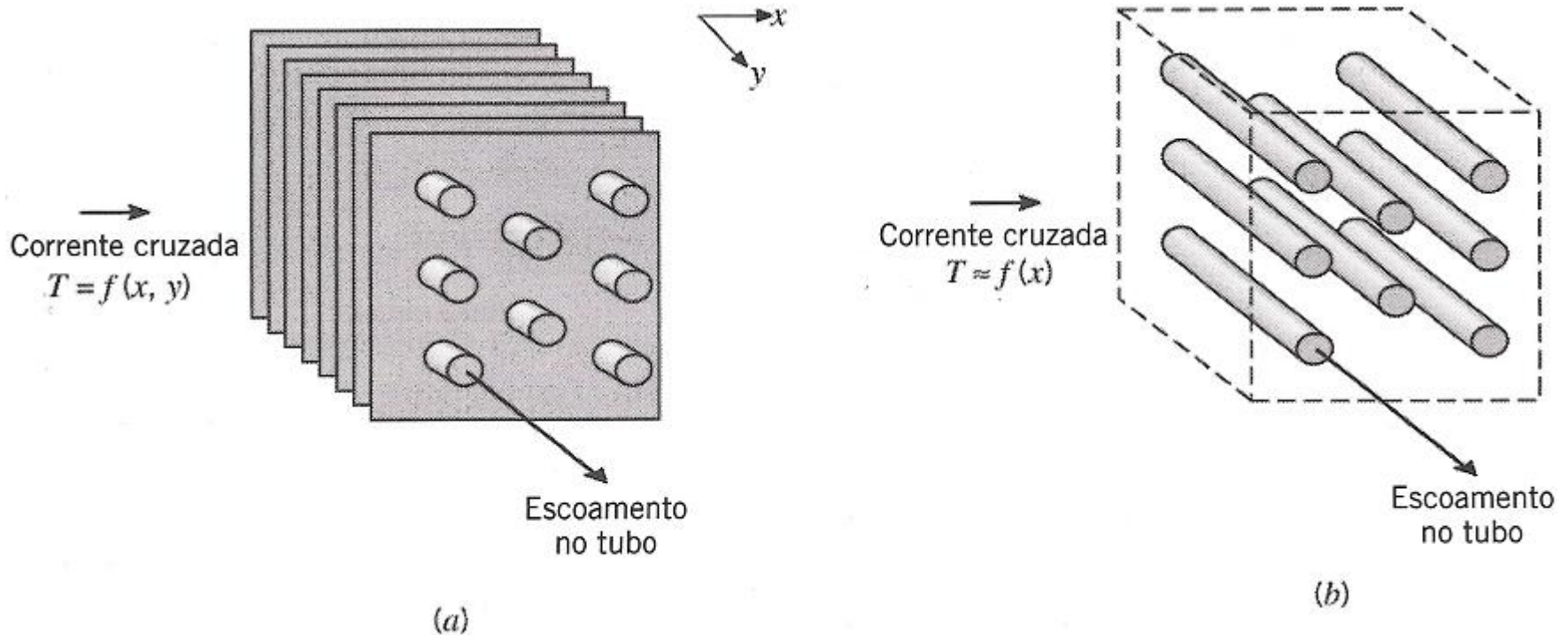


**Figura 11.1:** Trocador de Calor de tubos concêntricos:  
(a) correntes paralelas e (b) correntes contrárias

## ***11.1 Tipos***

- Escoamento cruzado - um fluido escoia perpendicular ao outro
- Misturado x Não Misturado
- Casco e Tubo
- Trocadores de Calor Compactos -
  - altas áreas de troca de calor por volume ( $\geq 700m^2/m^3$ )
  - um dos fluidos é gás - baixo  $h$
  - seções pequenas  $D_h < 5mm$
  - escoamento laminar

# 11.1 Tipos

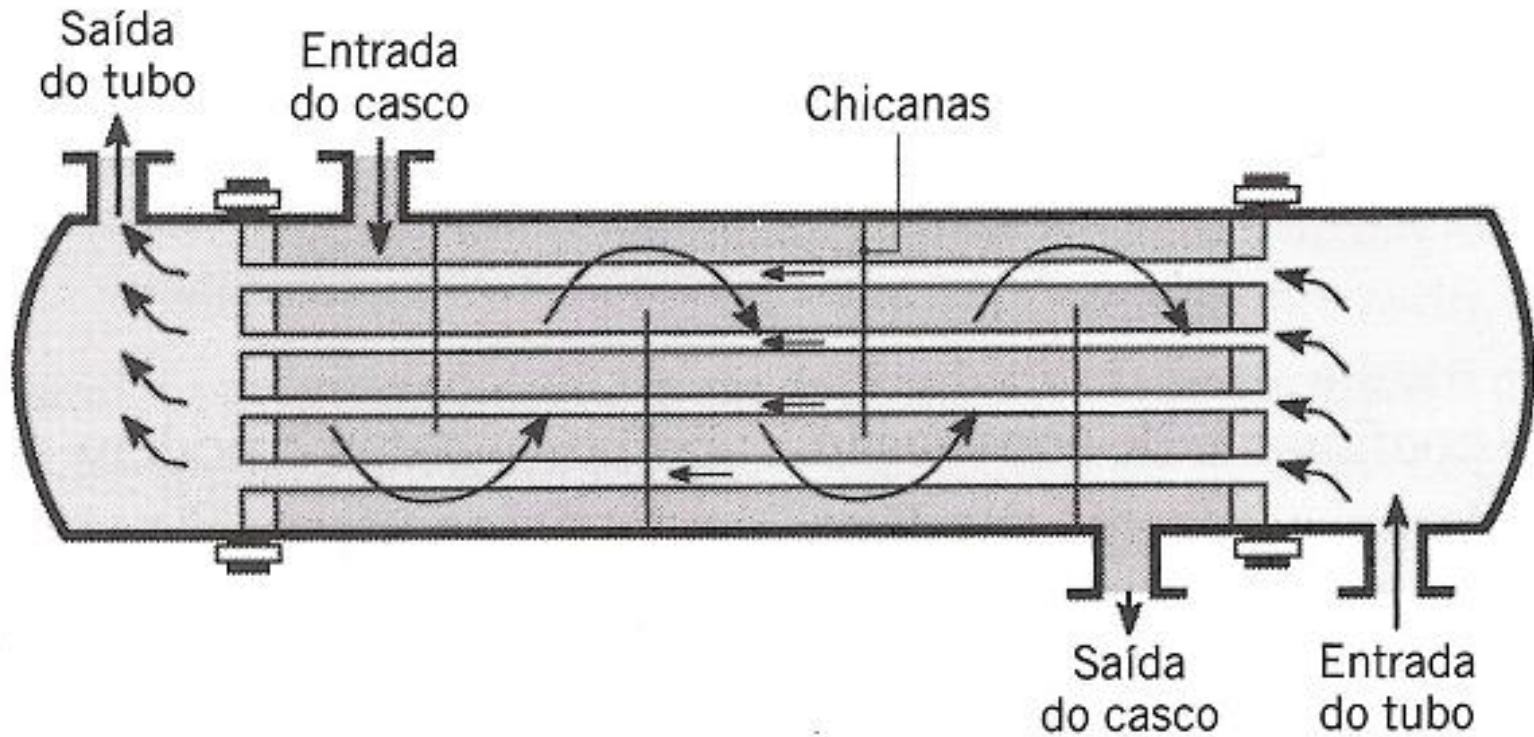


**Figura 11.2:** Trocadores de calor com escoamentos cruzados.

(a) Aletado com ambos os fluidos não-misturados

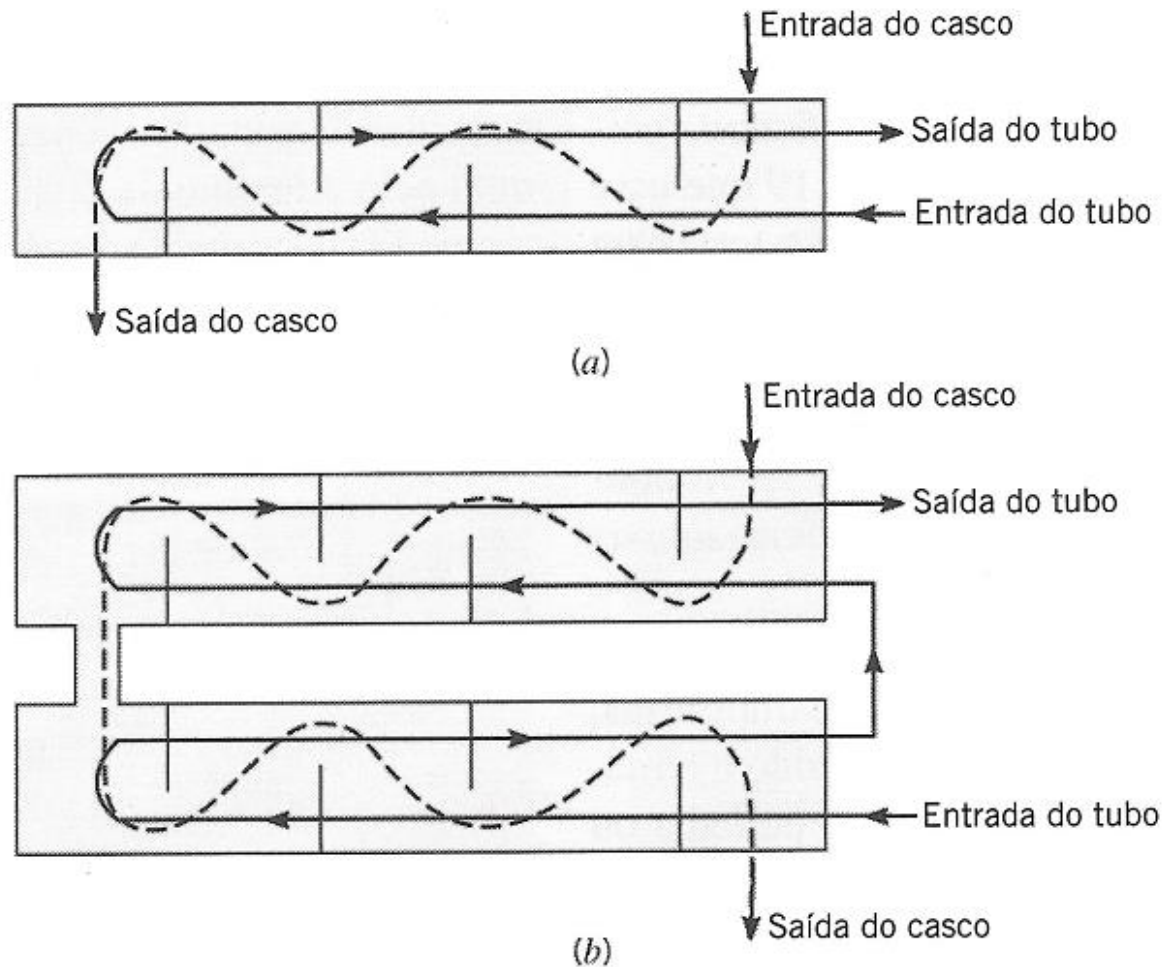
(b) Não-aletado com um fluido misturado e o outro não-misturados.

## 11.1 Tipos

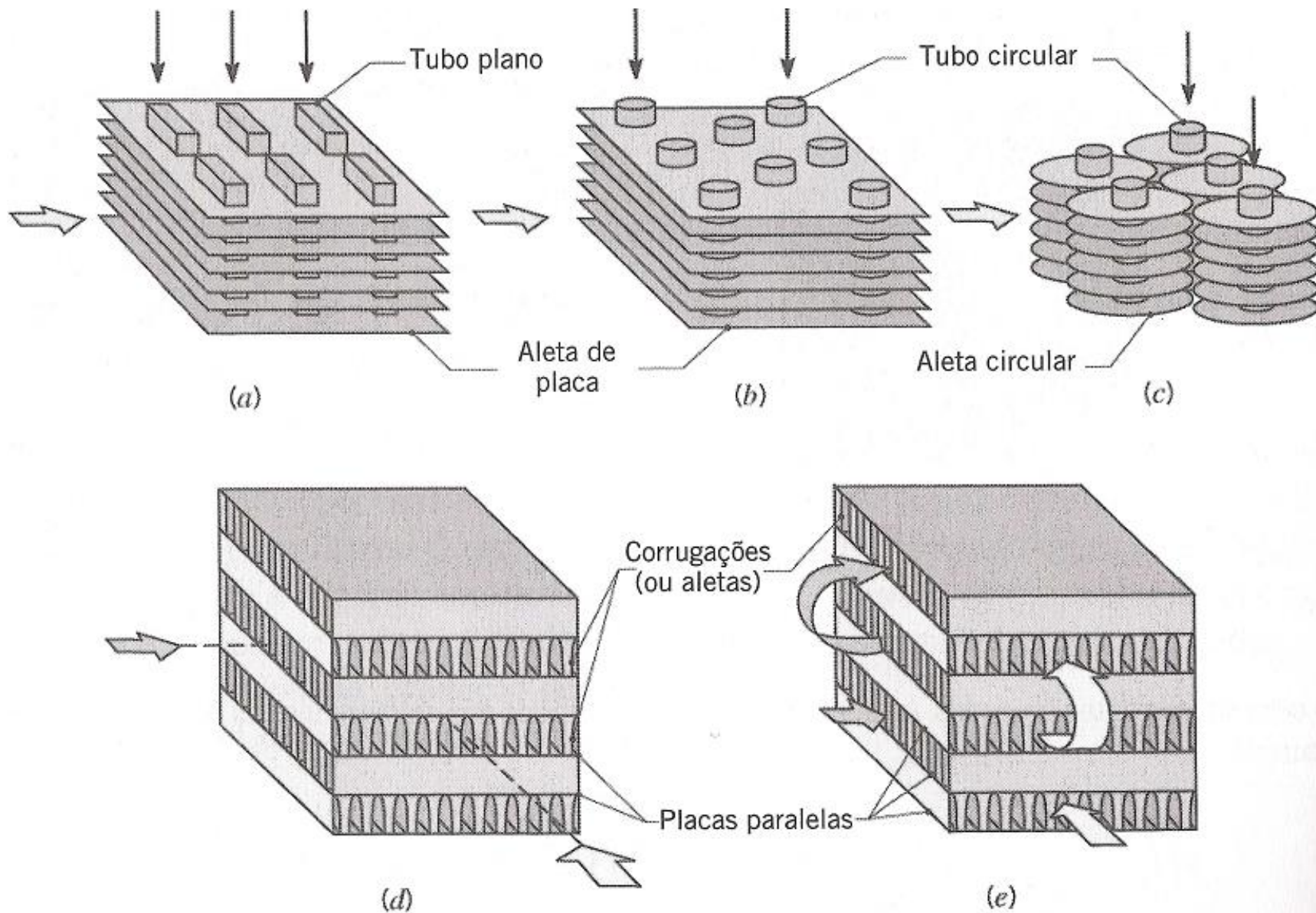


**Figura 11.3:** Trocador de calor - Casco e tubos com um passe no casco e um passe nos tubos (contracorrente)

# 11.1 Tipos



**Figura 11.4:** Trocadores de calor-Casco e tubos.  
(a) Um passe no casco e dois passes nos tubos.  
(b) Dois passes no casco e quatro passes nos tubos.



**Figura 11.4:** Trocador de calor Compactos

## ***11.2 COEFICIENTE GLOBAL DE T.C.***

- Coeficientes Interno e Externo
  - Aletas ?
  - Superfícies limpas ou com incrustação ?
  - Fator de Incrustação  $R_f$  - Tabela 11.1
- Cálculo do Coeficiente Global de T.C. ( $U$ )



**Tabela 11.1:** Fatores de Incrustação

---

<b>FLUIDO</b>	<b><math>R''</math> (<math>m^2 \cdot K/W</math>)</b>
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

---

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{U_f A_f} = \frac{1}{U_q A_q} \quad (11.1)$$

$$= \frac{1}{(\eta_o h A)_f} + \frac{R''_{i,f}}{(\eta_o A)_f} + R_p + \frac{R''_{i,q}}{(\eta_o A)_q} + \frac{1}{(\eta_o h A)_q}$$

- $U_f$  - Coeficiente Global referido à área da superfície do fluido frio ( $A_f$ ).
- Observe que  $U_f \neq U_q$ , mas  $U_f A_f = U_q A_q = UA$ .
- $R_p$  - Resistência de T.C. na parede plana ou cilíndrica.
- $\eta_o$  - Eficiência global da superfície aletada - Veja Tabela 3.5

## Tabela 3.5: Eficiência de perfis de aletas comuns

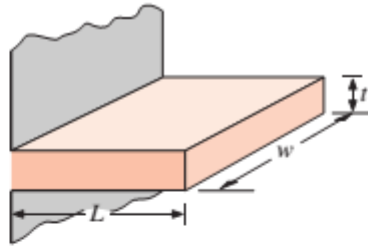
### Aletas Planas

*Rectangular<sup>a</sup>*

$$A_f = 2wL_c$$

$$L_c = L + (t/2)$$

$$A_p = tL$$

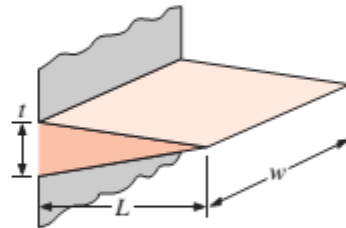


$$\eta_f = \frac{\tanh mL_c}{mL_c}$$

*Triangular<sup>a</sup>*

$$A_f = 2w[L^2 + (t/2)^2]^{1/2}$$

$$A_p = (t/2)L$$



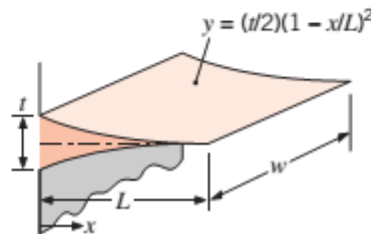
$$\eta_f = \frac{1}{mL} \frac{I_1(2mL)}{I_0(2mL)}$$

*Parabolic<sup>a</sup>*

$$A_f = w[C_1L + (L^2t)\ln(t/L + C_1)]$$

$$C_1 = [1 + (t/L)^2]^{1/2}$$

$$A_p = (t/3)L$$



$$\eta_f = \frac{2}{[4(mL)^2 + 1]^{1/2} + 1}$$

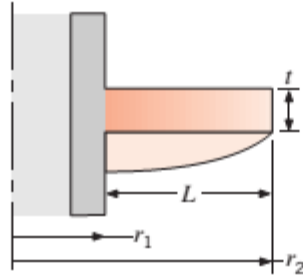
## Aletas Circulares

Rectangular<sup>a</sup>

$$A_f = 2\pi (r_{2c}^2 - r_1^2)$$

$$r_{2c} = r_2 + (t/2)$$

$$V = \pi (r_2^2 - r_1^2)t$$



$$\eta_f = C_2 \frac{K_1(mr_1)I_1(mr_{2c}) - I_1(mr_1)K_1(mr_{2c})}{I_0(mr_1)K_1(mr_{2c}) + K_0(mr_1)I_1(mr_{2c})}$$

$$C_2 = \frac{(2r_1/m)}{(r_{2c}^2 - r_1^2)}$$

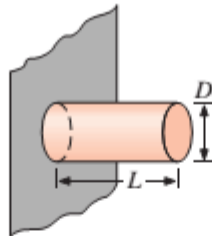
## Aletas Piniformes

Rectangular<sup>b</sup>

$$A_f = \pi D L_c$$

$$L_c = L + (D/4)$$

$$V = (\pi D^2/4)L$$

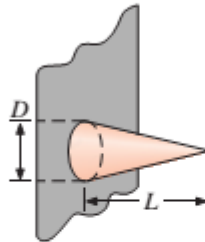


$$\eta_f = \frac{\tanh mL_c}{mL_c}$$

Triangular<sup>b</sup>

$$A_f = \frac{\pi D}{2} [L^2 + (D/2)^2]^{1/2}$$

$$V = (\pi/12)D^2 L$$



$$\eta_f = \frac{2}{mL} \frac{I_2(2mL)}{I_1(2mL)}$$

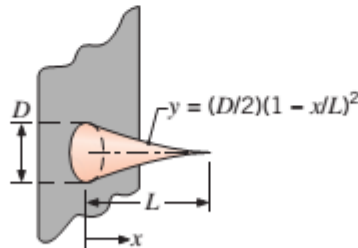
Parabolic<sup>b</sup>

$$A_f = \frac{\pi L^3}{8D} \{ C_3 C_4 - \frac{L}{2D} \ln [(2DC_4/L) + C_3] \}$$

$$C_3 = 1 + 2(D/L)^2$$

$$C_4 = [1 + (D/L)^2]^{1/2}$$

$$V = (\pi/20)D^2 L$$



$$\eta_f = \frac{2}{[4/9(mL)^2 + 1]^{1/2} + 1}$$

<sup>a</sup> $m = (2h/kt)^{1/2}$ .

<sup>b</sup> $m = (4h/kD)^{1/2}$ .

$$q = \eta_o h A (T_b - T_\infty) \quad (11.2)$$

$$\eta_o = 1 - \frac{A_a}{A} (1 - \eta_a) \quad (11.3)$$

- Para Trocadores tubulares não aletados, a eq.(11.1) torna-se:

$$\begin{aligned} \frac{1}{UA} &= \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_e A_e} \\ &= \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R''_{i,i}}{A_i} + \frac{\ln(D_e/D_i)}{2\pi k L} + \frac{R''_{i,e}}{A_e} + \frac{1}{h_e A_e} \end{aligned} \quad (11.4)$$

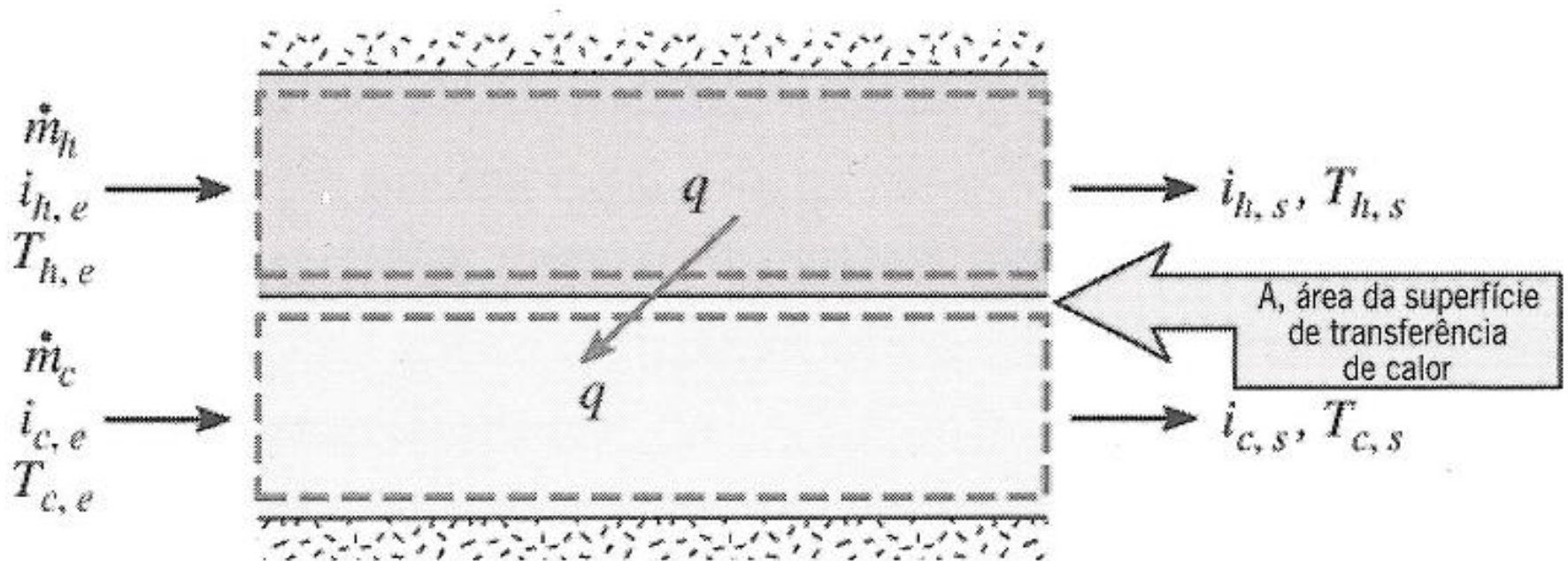
onde  $A_i = \pi D_i L$  e  $A_e = \pi D_e L$ . Valores típicos de  $U$  são mostrados na tabela 11.2

**Tabela 11.2:** Valores típicos de U

<b>COMBINAÇÃO DE FLUIDO</b>	<b><math>U</math> (W/m<sup>2</sup> · K)</b>
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

## 11.3 ANÁLISE DE T.C. - MÉDIA LOGARÍTMICA DA DIFERENÇA DE TEMPERATURA

-Projeto de Trocadores de Calor:  $U$ ,  $T_e$ ,  $T_s$ , área de troca,  $\dot{m}_h$  e  $\dot{m}_c$



**Figura 11.7:** Distribuição de temperaturas em T.C. de correntes paralelas

### **11.3 ANÁLISE DE T.C. - MÉDIA LOGARITMICA DA DIFERENÇA DE TEMPERATURA**

-Desprezando-se: troca de calor com o meio, variações de energia cinética e potencial, tem-se para o fluido quente:

$$q = \dot{m}_h(i_{h,e} - i_{h,s}) \quad (11.5)$$

e para o fluido frio

$$q = \dot{m}_c(i_{c,s} - i_{c,e}), \quad (11.6)$$

onde  $i$  é a entalpia do fluido e os índices  $h$  e  $c$  referem-se aos fluidos quente e frio respectivamente.



### **11.3 ANÁLISE DE T.C. - MÉDIA LOGARITMICA DA DIFERENÇA DE TEMPERATURA**

-Se não houver mudança de fase e expressando-se as entalpias com as temperaturas médias tem-se:

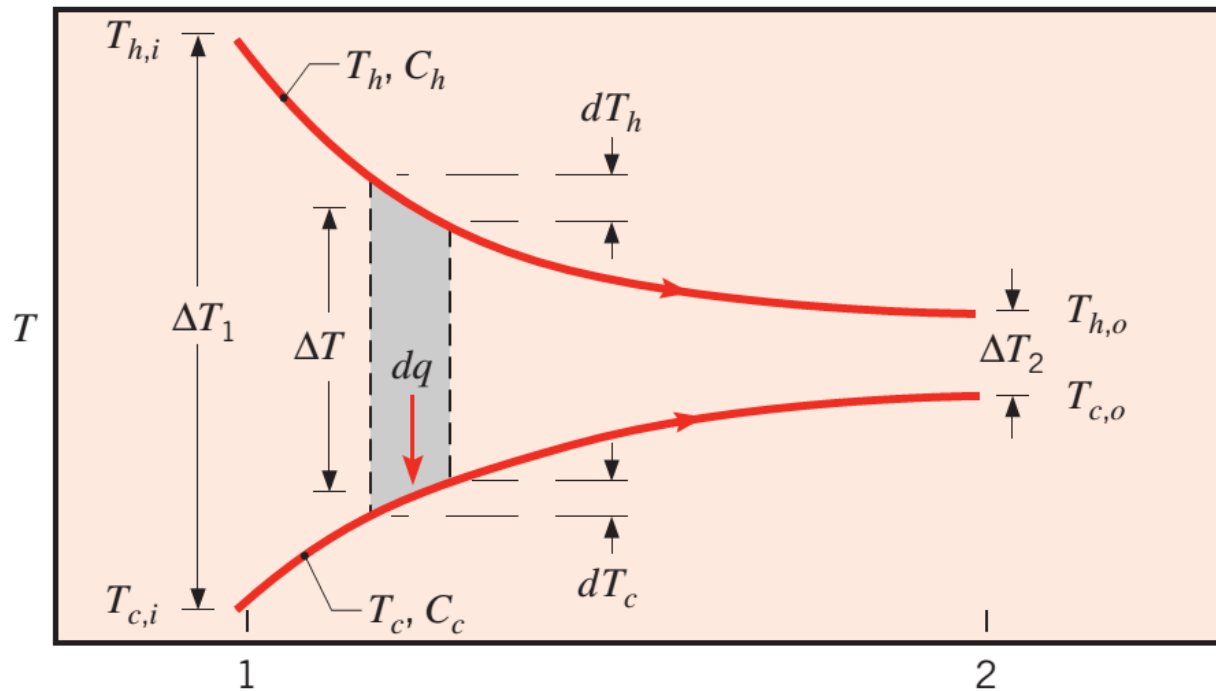
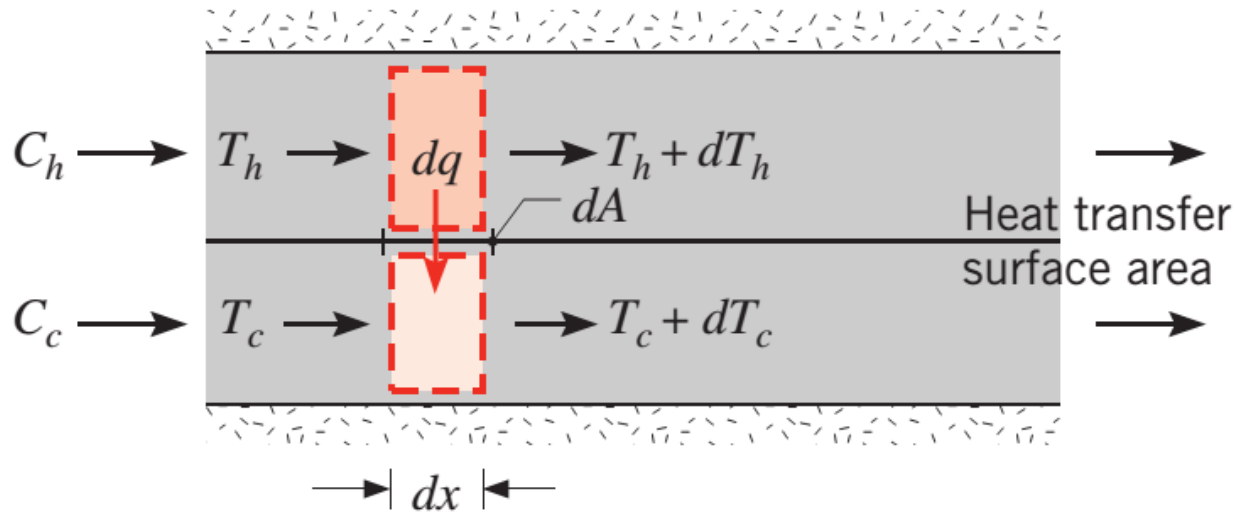
$$q = \dot{m}_h c_{p,h} (T_{h,e} - T_{h,s}) \quad (11.7)$$

e para o fluido frio

$$q = \dot{m}_c c_{p,c} (T_{c,s} - T_{c,e}) \quad (11.8)$$

observe que estas equações de balanço independem do tipo ou arranjo do trocador.

## 11.3.1 TROCADOR DE CALOR COM CORRENTES PARALELAS



**Figura 11.6:** Distribuição de temperaturas em T.C. de correntes paralelas

- Hipóteses simplificadoras:
- T.C. isolado termicamente do ambiente,
- Condução na direção axial dos tubos desprezível,
- Variações de energia cinética e potencial desprezíveis,
- $c_p$  e  $U$  constantes

Para um elemento diferencial do fluido quente pode-se escrever:

$$dq = -\dot{m}_h c_{p,h} dT_h \equiv -C_h dT_h \quad (11.9)$$

e para o fluido frio

$$dq = \dot{m}_c c_{p,c} dT_c \equiv C_c dT_c, \quad (11.10)$$

onde  $C_h$  e  $C_c$  são as *Taxas de Capacidade Térmica* dos fluidos quente e frio respectivamente. Utilizando-se o Coeficiente Global de T.C., pode-se também escrever:

$$dq = U \Delta T dA, \quad (11.11)$$

onde  $\Delta T \equiv T_h - T_c$  é a diferença *local* de temperatura entre os fluidos. Diferenciando-se  $\Delta T$  tem-se:

$$d\Delta T = dT_h - dT_c \quad (11.12)$$

Substituindo-se para  $dT_h$  e  $dT_c$  as eqs. (11.9) e (11.10) tem-se:

$$d(\Delta T) = -dq \left( \frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c} \right) \quad (11.13)$$

Substituindo-se para  $dq$  a eq.(11.11) e integrando-se ao longo do trocador:

$$\int_1^2 \frac{(d\Delta T)}{\Delta T} = -U \left( \frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c} \right) \int_1^2 dA \quad (11.14)$$

e então

$$\ln \left( \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right) = -UA \left( \frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c} \right) \quad (11.15)$$

Substituindo-se para  $C_h$  e  $C_c$  as eqs. (11.9) e (11.10) tem-se:

$$\ln \left( \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right) = -UA \left( \frac{T_{h,e} - T_{h,s}}{q} + \frac{T_{c,s} - T_{c,e}}{q} \right) \quad (11.16)$$

ou ainda

$$\ln \left( \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right) = -\frac{UA}{q} \left( \underbrace{(T_{h,e} - T_{c,e})}_{\Delta T_1 - \text{entrada}} - \underbrace{(T_{h,s} - T_{c,s})}_{\Delta T_2 - \text{saida}} \right) \quad (11.17)$$

Assim,

$$q = UA \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \left( \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right)} \equiv UA \Delta T_{m,l} \quad (11.18)$$

veja que  $\Delta T_1$  e  $\Delta T_2$  dependem das temperatura médias na entrada e saída do trocador.

## **11.3.2 TROCADOR DE CALOR COM CORRENTES CONTRÁRIAS**

- Para o arranjo em correntes contrárias as diferenças locais de temperatura são:

$$\Delta T_1 \equiv T_{h,1} - T_{c,1} = T_{h,e} - T_{c,s} \quad (11.19)$$

e na secção 2

$$\Delta T_2 \equiv T_{h,2} - T_{c,2} = T_{h,s} - T_{c,e} \quad (11.20)$$

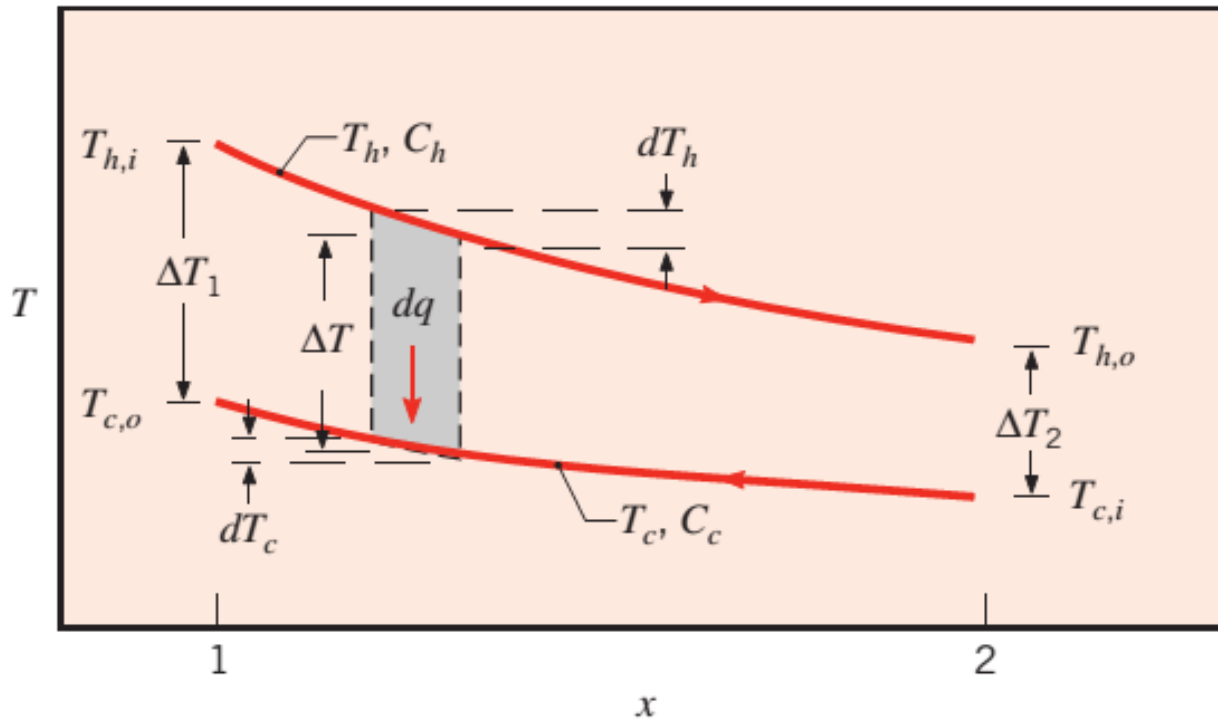
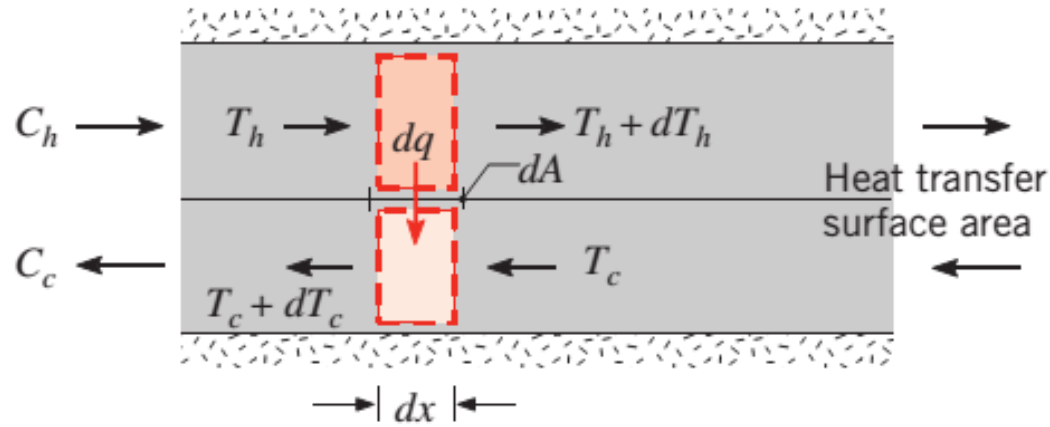
observe que:



## **11.3.2 TROCADOR DE CALOR COM CORRENTES CONTRÁRIAS**

- A análise é análoga a T.C. correntes paralelas;
- Para mesmas temperaturas de entrada e saída  
 $\Delta T_{ml,cc} > \Delta T_{ml,cp}$
- Trocador com menor área que correntes paralelas  
( $q = UA\Delta T_{ml}$ );
- A temperatura de saída do fluido frio ( $T_{c,s}$ ) pode ser maior que a de saída do fluido quente ( $T_{h,s}$ )

## 11.3.2 TROCADOR DE CALOR COM CORRENTES CONTRÁRIAS



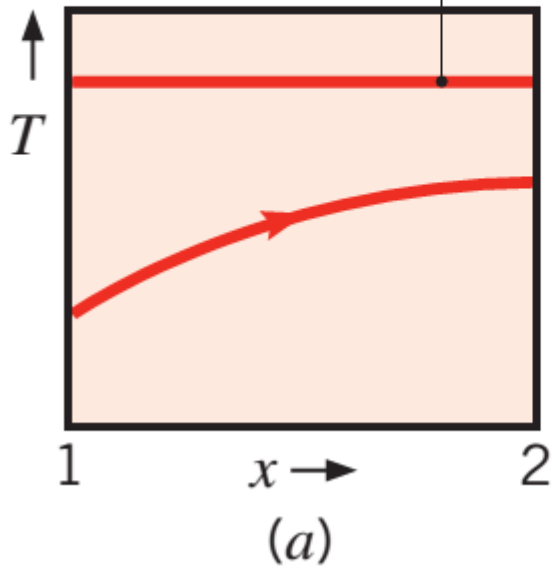
**Figura 11.7:** Distribuição de temperaturas em T.C. de correntes contrárias

### **11.3.3 CONDIÇÕES ESPECIAIS DE OPERAÇÃO**

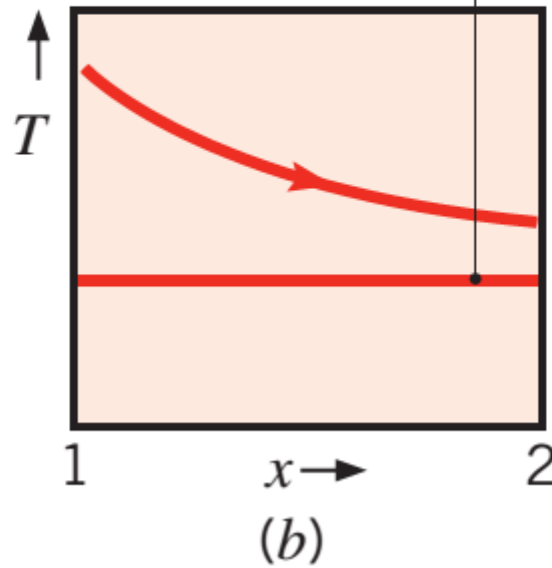
Algumas simplificações podem ser feitas observando-se a relação entre  $C_h$  e  $C_c$ .

- $C_h \gg C_c$  ou vapor condensando;
- $C_h \ll C_c$  ou líquido evaporando;
- $C_h = C_c$  implica em  $\Delta T_1 = \Delta T_2$
- Com mudança de fase, impõe-se  $C \rightarrow \infty$ , caso contrário a transferência de calor seria nula ( $q = C(T_e - T_s)$ )

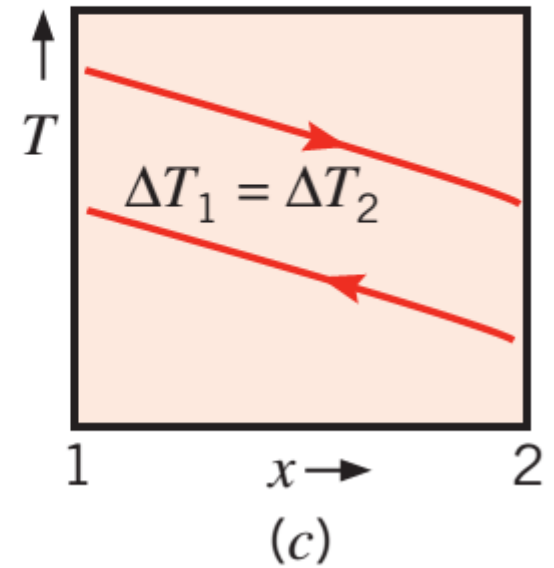
$C_h \gg C_c$   
or a condensing  
vapor ( $C_h \rightarrow \infty$ )



$C_h \ll C_c$  or  
an evaporating  
liquid ( $C_c \rightarrow \infty$ )



$C_c = C_h$



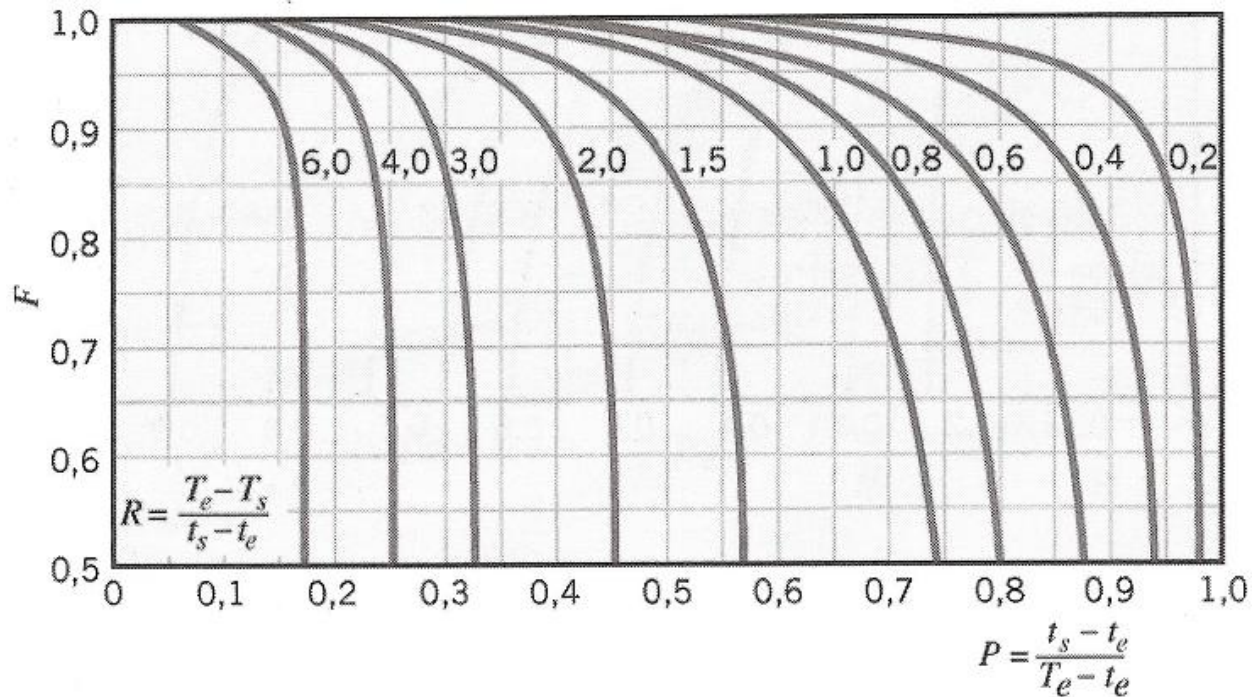
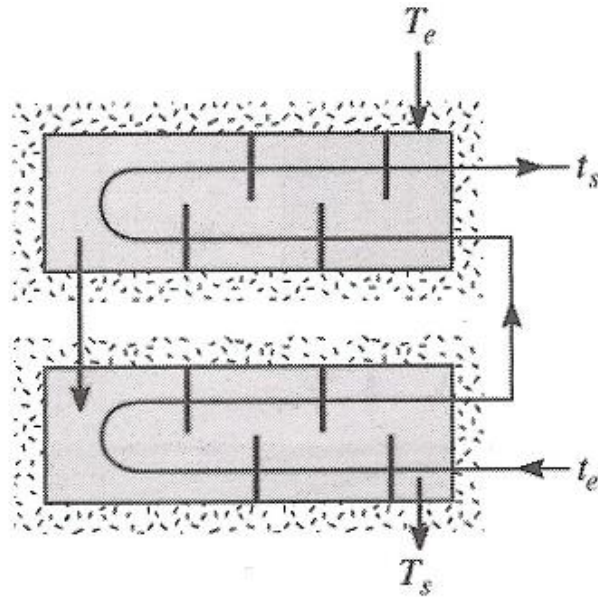
**Figura 11.8:** Condições Especiais de Operação

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

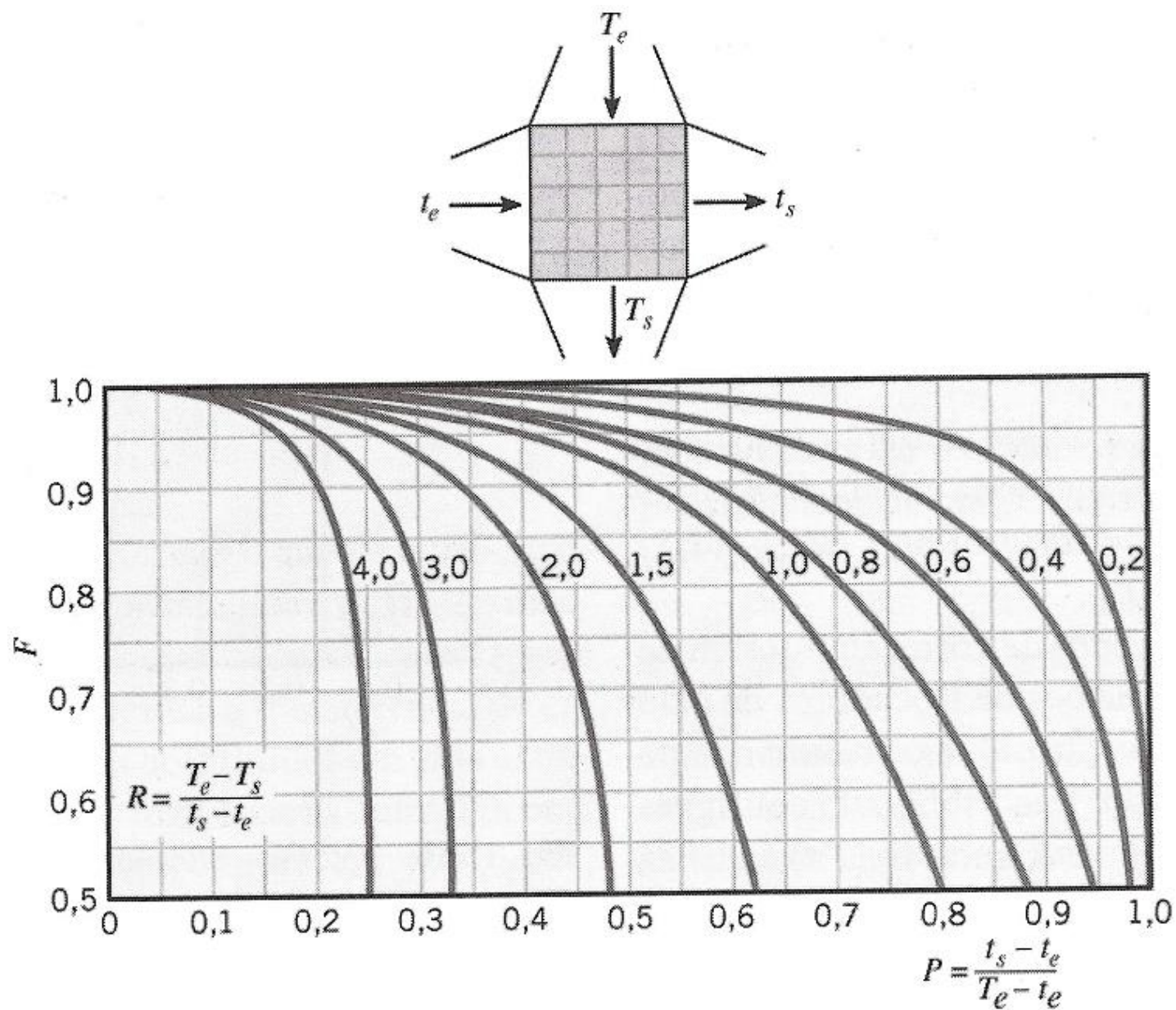
Equações de balanço podem ser utilizadas com fator de correção ( $F$ ) da  $\Delta T_{ml}$  na forma:

$$\Delta T_{ml} = F \Delta T_{ml,cc}, \quad (11.21)$$

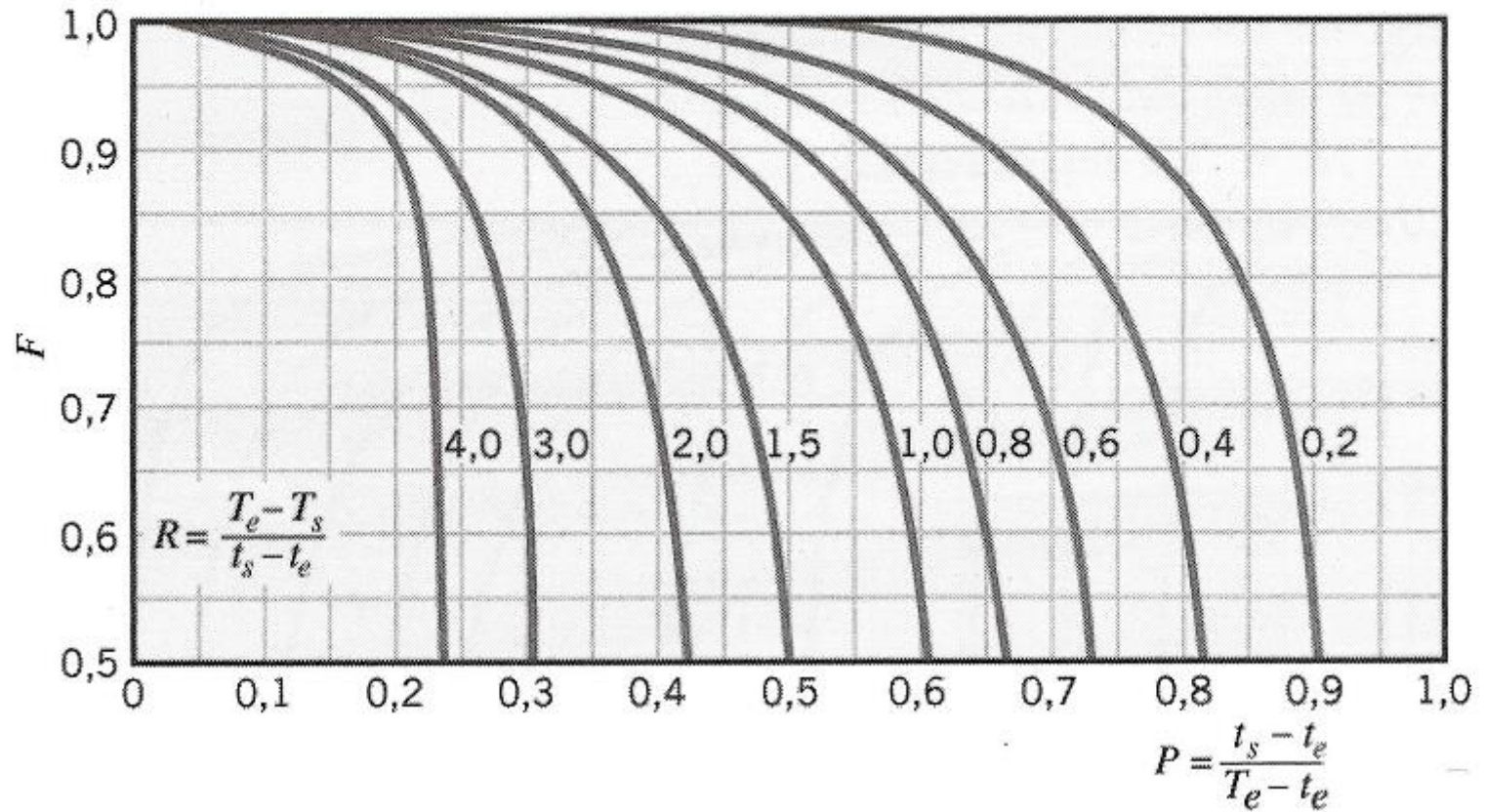
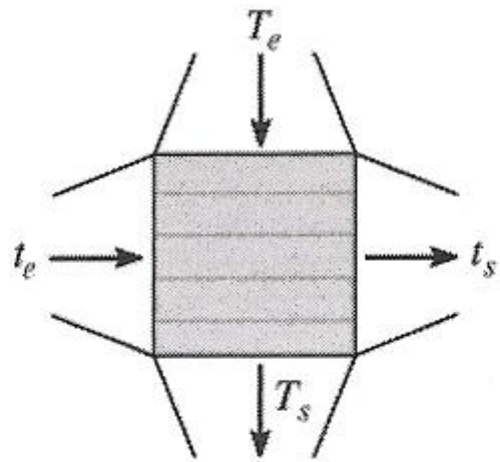
onde  $\Delta T_{ml,cc}$  é a média logarítmica das diferenças de temperaturas no caso de um T.C. em correntes contrárias. O Fator  $F$  depende da geometria e é obtido das figuras correspondentes ao trocador de calor. Para um dos fluidos com  $T \approx cte$ ,  $F=1$  e independe do arranjo.



**Figura 11.9:** Fator de correção - casco e tubo - 1 passe no casco e múltiplos de 2 nos tubos



**Figura 11.10:** Fator de correção - casco e tubo - 2 passes no casco e múltiplos de 4 nos tubos



**Figura 11.11:** Fator de correção para T.C. de passe único, correntes cruzadas



# 11.4 MÉTODO DA EFETIVIDADE - NUT

## 11.4.1 Definições

- Taxa máxima de troca de calor possível  $q_{max}$ .
- $q_{max}$  ocorreria para TC em Correntes Contrárias e de comprimento infinito.  $\Delta T_{ml,cc} > \Delta T_{ml,ep}$ .
- Nesse trocador, um dos fluidos vai variar sua temperatura de  $|T_{h,e} - T_{c,e}|$ . Não pode haver diferença de temperaturas maior que esta.
- O fluido de menor Taxa de Capacidade Térmica  $C$  sofrerá a variação de temperatura máxima.
- Se  $C_{min}$  for do fluido frio, então num TC de correntes contrárias e com  $L \rightarrow \infty$ ,  $q_{max}$  será:

## 11.4 MÉTODO DA EFETIVIDADE - NUT

$$q_{max} = C_c(T_{h,e} - T_{c,e}) \quad C_c < C_h \quad (11.22)$$

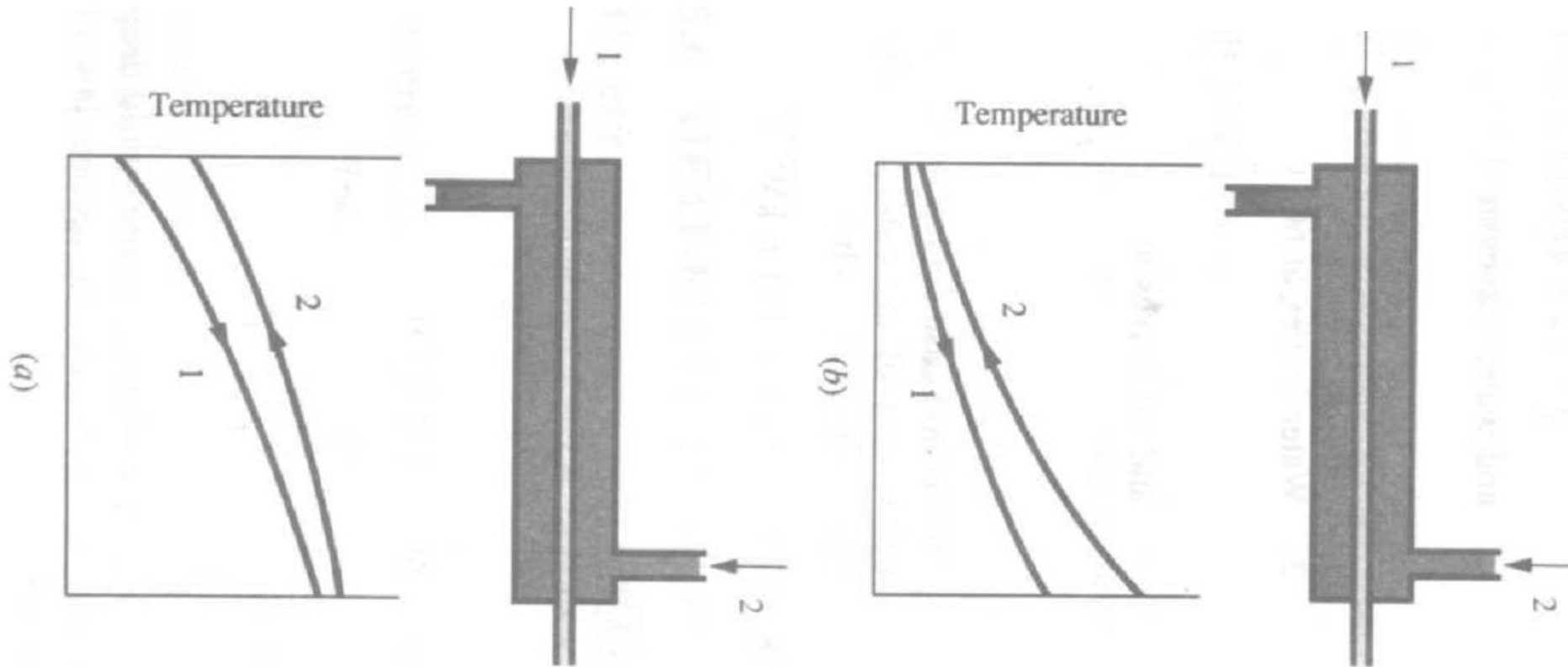
- Similarmente, se  $C_{min}$  for do fluido quente,  $q_{max}$  será:

$$q_{max} = C_h(T_{h,e} - T_{c,e}) \quad C_h < C_c \quad (11.23)$$

então pode-se escrever generalizando

$$q_{max} = C_{min}(T_{h,e} - T_{c,e}). \quad (11.24)$$

# 11.4 MÉTODO DA EFETIVIDADE - NUT



**Figura 11.12:** Distribuição de temperaturas em função de  $C_{min}$ : (a)  $C_{min} = C_c$ ; (b)  $C_{min} = C_h$

## **11.4 MÉTODO DA EFETIVIDADE - NUT**

Veja que o calor trocado (a energia em módulo) entre os dois fluidos tem que ser o mesmo:

$$q_h = q_c = C_c \Delta T_c = C_h \Delta T_h. \quad (11.25)$$

Suponha que o fluido de maior  $C$  seja o fluido quente e que ele sofra a variação de temperatura  $|T_{h,e} - T_{c,e}|$ , então

$$q_h^* = C_h \Delta T_h = C_h (T_{h,e} - T_{c,e}). \quad (11.26)$$

Entretanto, pela conservação da energia para o TC isolado, vale também para o fluido frio ( $C_{min}$ )

$$q_h^* = q_c^* = C_{min} \Delta T_{max}^*, \quad (11.27)$$

tal que  $\Delta T_{max}^* > (T_{h,e} - T_{c,e})$ , o que obviamente não é possível. Resumindo:

- O fluido que sofre  $|T_{h,e} - T_{c,e}|$  é o de  $C_{min}$

Define-se a *Efetividade* de um TC por

$$\varepsilon \equiv \frac{q}{q_{max}}, \quad (11.28)$$

onde  $q$  é a taxa de TC real do trocador e  $q_{max}$  seria o máximo valor possível.

Substituindo as eqs. de balanço de energia (11.7 e 11.8 ) e a (11.24) tem-se:

$$\varepsilon = \frac{C_h(T_{h,e} - T_{h,s})}{C_{min}(T_{h,e} - T_{c,e})}, \quad (11.29)$$

ou também

$$\varepsilon = \frac{C_c(T_{c,s} - T_{c,e})}{C_{min}(T_{h,e} - T_{c,e})}, \quad (11.30)$$

Observe que:

- $\varepsilon$  é um adimensional;
- $0 \leq \varepsilon \leq 1$ .
- Conhecidos  $\varepsilon, T_{h,e}, T_{c,e}, C_{min}$  pode-se calcular a taxa real de T.C. de um trocador por

$$q = \varepsilon C_{min}(T_{h,e} - T_{c,e}) \quad (11.31)$$

## 11.4.2 Relações de Efetividade NUT

Considere um TC em correntes paralelas e para o qual  $C_{min} = C_h$ . Da eq.(11.29) resulta:

$$\varepsilon = \frac{(T_{h,e} - T_{h,s})}{(T_{h,e} - T_{c,e})}. \quad (11.32)$$

Novamente com as eqs. de balanço de energia (11.7) e (11.8) pode-se escrever:

$$\frac{C_{min}}{C_{max}} = \frac{\dot{m}_h c_{p,h}}{\dot{m}_c c_{p,c}} = \frac{T_{c,s} - T_{c,e}}{T_{h,e} - T_{h,s}} \quad (11.33)$$

## 11.4.2 Relações de Efetividade NUT

Retomando a eq. (11.15)

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

e re-escrevendo na forma:

$$\ln \left( \frac{T_{h,s} - T_{c,s}}{T_{h,e} - T_{c,e}} \right) = -\frac{UA}{C_{min}} \left( 1 + \frac{C_{min}}{C_{max}} \right). \quad (11.34)$$

Define-se o *Número de Unidades de Transferência* (*NUT*) como:

$$NUT \equiv \frac{UA}{C_{min}} \quad (11.35)$$

e então a eq.(11.34) torna-se



## 11.4.2 Relações de Efetividade NUT

$$\frac{T_{h,s} - T_{c,s}}{T_{h,e} - T_{c,e}} = \exp \left[ -NUT \left( 1 + \frac{C_{min}}{C_{max}} \right) \right]. \quad (11.36)$$

O LHS desta expressão, após somar e subtrair  $T_{h,e}$  no numerador, substituir a eq.(11.33) para  $T_{c,s}$  e rearranjar os termos torna-se

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

## 11.4.2 Relações de Efetividade NUT

Utilizando ainda a eq. (11.32) tem-se

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

Substituindo-se esta expressão em (11.36) tem-se

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

## 11.4.2 Relações de Efetividade NUT

ou ainda

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp \left[ -NUT \left( 1 + \frac{C_{min}}{C_{max}} \right) \right]}{\left( 1 + \frac{C_{min}}{C_{max}} \right)}, \quad (11.37)$$

que é a expressão da efetividade  $\varepsilon$  para um TC em Correntes Paralelas. Uma expressão igual seria obtida se deduzida para  $C_{min} = C_c$ .

Observe que:

- A eq. (11.37) se aplica a qualquer TC em CP, independente de qual fluido tem  $C_{min}$ ;
- A efetividade  $\varepsilon$  do TC depende de  $\dot{m}_h, \dot{m}_c, c_{p,h}, c_{p,c}, U$  e  $A$ , mas não depende das temperaturas;

## 11.4.2 Relações de Efetividade NUT

- Fixada a efetividade desejada para o TC e as temperaturas de entrada, pode-se calcular  $q_{max}$  e  $q$  e conseqüentemente as temperaturas de saída também.

Para outros tipos de trocadores e arranjos de escoamento pode-se também obter expressões da efetividade, como na Tabela 11.3

**Tabela 11.3:** Relações de efetividade de TC's

*Configuração de escoamento*

*Relação*

**Tubos Concêntricos**

Escoamento em paralelo

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NUT(1 + C_r)]}{1 + C_r}$$

Escoamento em contracorrente

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NUT(1 - C_r)]}{1 - C_r \exp[-NUT(1 - C_r)]} \quad (C_r < 1)$$

$$\varepsilon = \frac{NUT}{1 + NUT} \quad (C_r = 1)$$

**Casco e tubos**

Um passe no casco

(2, 4, ... passes nos tubos)

$$\varepsilon_1 = 2 \left\{ 1 + C_r + (1 + C_r^2)^{1/2} \right. \\ \left. \times \frac{1 + \exp[-NUT(1 + C_r^2)^{1/2}]}{1 - \exp[-NUT(1 + C_r^2)^{1/2}]} \right\}^{-1}$$

n passes no casco

(2n, 4n, ... passes nos tubos)

$$\varepsilon = \left[ \left( \frac{1 - \varepsilon_1 C_r}{1 - \varepsilon_1} \right)^n - 1 \right] \left[ \left( \frac{1 - \varepsilon_1 C_r}{1 - \varepsilon_1} \right)^n - C_r \right]^{-1}$$

**Escoamento cruzado (único passe)**

Ambos os fluidos não-misturados

$$\varepsilon = 1 - \exp \left[ \left( \frac{1}{C_r} \right) (NUT)^{0,22} \{ \exp[-C_r(NUT)^{0,78}] - 1 \} \right]$$

$C_{m\acute{a}x}$  (misturado),  $C_{m\acute{i}n}$  (não-misturado)

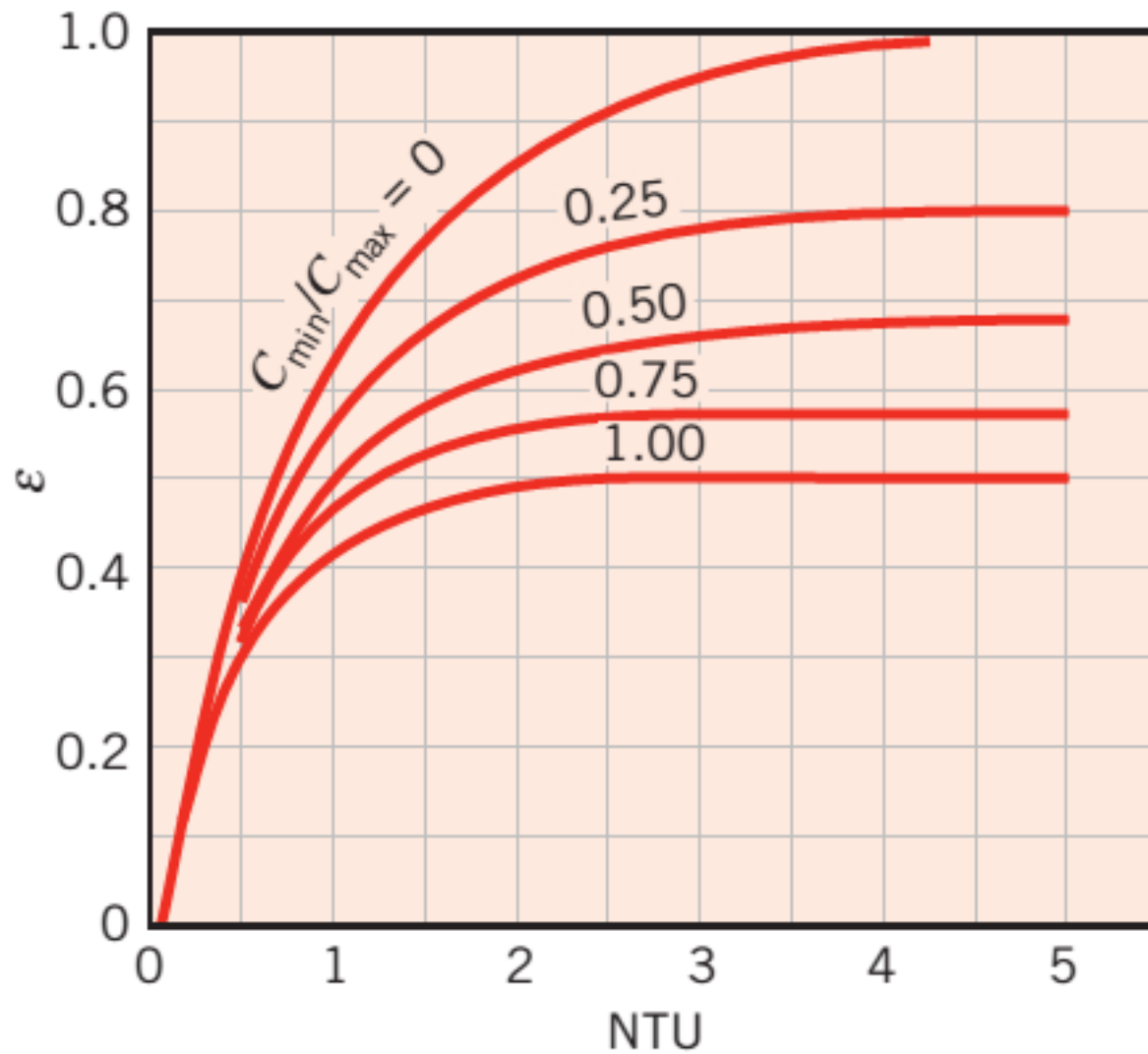
$$\varepsilon = \left( \frac{1}{C_r} \right) (1 - \exp \{-C_r[1 - \exp(-NUT)]\})$$

$C_{m\acute{i}n}$  (misturado),  $C_{m\acute{a}x}$  (não-misturado)

$$\varepsilon = 1 - \exp(-C_r^{-1} \{1 - \exp[-C_r(NUT)]\})$$

**Todos os trocadores ( $C_r = 0$ )**

$$\varepsilon = 1 - \exp(-NUT)$$



**Figura 11.13:** Efetividade de TC com Correntes Paralelas

## Observações sobre efetividades tabeladas

- $C_r \equiv C_{min}/C_{max}$ .
- Mudança de fase equivale a  $C_{max} \rightarrow \infty$  e então  $C_r = 0$  e para todos os arranjos vale:

$$\varepsilon = 1 - \exp(-NUT) \quad (11.38)$$

- Para TC de múltiplos passes ( $n$ ) na carcaça vale  $NUT = n(NUT)_1$  em combinação nas eqs. 11.31a e 11.32a.

- Para o projeto de um TC, pode ser mais interessante trabalhar com expressões tipo

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

que podem ser obtidas a partir das relações de  $\varepsilon$ .  
Veja tabela 11.4.

- Pelos gráficos de efetividade, vê-se que para  $NUT \leq 0,25$ , todos TC's têm a mesma efetividade, independente de  $C_r$  e pode-se usar eq. (11.38).
- Para  $C_r > 0$  e  $NUT \geq 0,25$  o TC de Correntes Contrárias tem a maior efetividade.



---

## RESUMO dos métodos MLDT e $\varepsilon - NUT$ :

---

1- Veja que em ambos os métodos a eq. (11.17) é deduzida a partir das eqs. de balanço (11.9) e (11.10) e de troca de calor (11.11). Nestas três eqs. aparecem três incógnitas  $dq$ ,  $dT_h$  e  $dT_c$ . Assim, considerando-se  $U$  e  $dA$  como dados de projeto, o sistema é determinado independente do método MLDT ou  $\varepsilon - NUT$ .

2- No método MLDT, conhecidas as quatro temperaturas ( $T_{h,e}, T_{h,s}, T_{c,e}, T_{c,s}$ ), fluxos mássicos e  $U$ , pode-se calcular a área de troca de calor (tamanho do TC). Este método é útil em PROJETO DE TROCADORES.

3- O fator  $F$  de correção para tipos/arranjos diferentes do TC de Correntes Contrárias no MLDT, é uma forma de corrigir as distribuições de temperatura ao longo da integração da área de troca de calor.

4-  $\varepsilon - NUT$  também usa a eq.(11.17) o que exigiria o conhecimento das quatro temperaturas (entrada e saída). Entretanto, pelo fato de que duas novas equações são introduzidas no modelo:  $q_{max}$  (eq. 11.24) e  $\varepsilon$  (eq. 11.28), somente  $T_{h,e}$  e  $T_{c,e}$  são necessárias.  $q_{max}$  só depende das temperaturas de entrada e  $C_{min}$ , o que elimina uma temperatura de saída. A outra temperatura é indiretamente fixada através da efetividade via  $q$  (veja eq.(11.28)).

5- Como no MLDT, a influência de  $\Delta T$  ao longo da integração da área deve ser computada. Devido a isto surgem as diferentes expressões de efetividade para os vários tipos de TC's.

6- O método  $\varepsilon - NUT$  é de utilização direta em análise de DESEMPENHO DE TROCADORES, onde os fluxos mássicos, área de troca e  $U$  são dados de projeto e as temperaturas de saída devem ser calculadas. Por exemplo, mudança nos fluidos de um trocador já existente.

7- Um problema de TC pode ser resolvido por ambos os métodos. Entretanto, dependendo dos dados disponíveis, será necessário um processo iterativo.