

ISA

INSTITUTO SUPERIOR
DE
AGRONOMIA

OPERAÇÕES UNITÁRIAS I

Jorge Gominho



UNIVERSIDADE
DE LISBOA

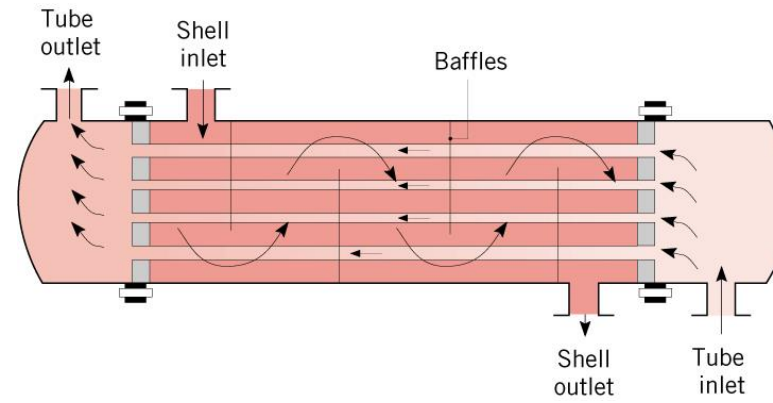


INSTITUTO
SUPERIOR DE
AGRONOMIA

2023

Operações Unitárias I

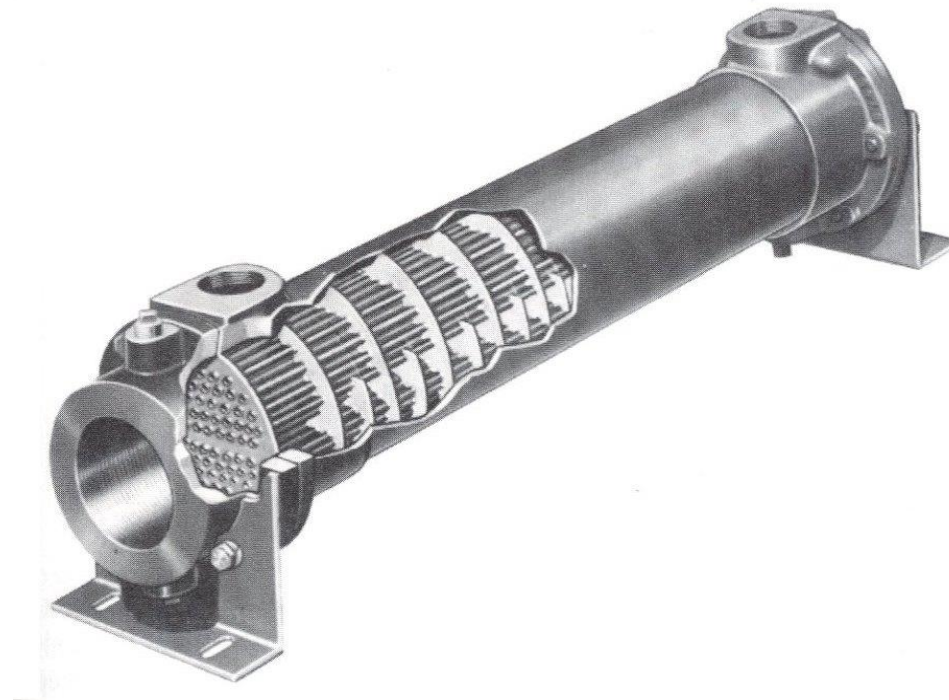
PERMUTADORES TÉRMICOS



PERMUTADORES DE CALOR

A **troca térmica** entre **dois fluidos** de diferentes temperaturas separados por um meio sólido possui diversas aplicações na indústria química e de processos em geral é realizada com o uso de equipamentos de troca térmica, ou trocadores de calor.

A análise do desempenho de trocadores de calor que operam sob condições prescritas, assim como seu projeto e a avaliação de sua eficácia são tarefas que o engenheiro responsável deve ser capaz de resolver



PERMUTADORES DE CALOR

Os permutadores de calor são equipamentos térmicos que têm como objectivo promover a transferência de calor entre duas ou mais correntes de fluidos em geral por:

condução e convecção



Regime turbulento (fundamental na eficiência do permutador)

Exs: aquecedores, arrefecedores, condensadores , evaporadores, geradores de vapor.

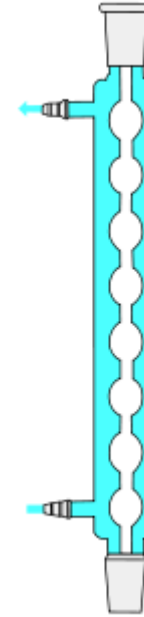
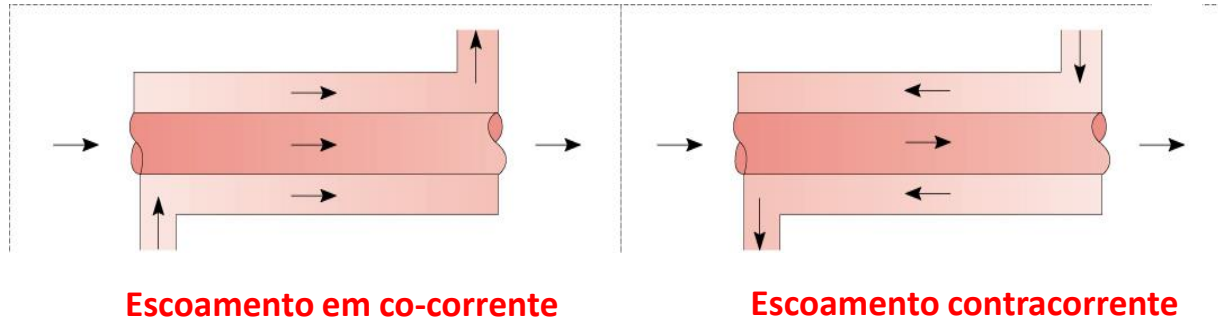
Classificação dos permutadores

- a) **Um fluido confinado** (ex: radiador do automóvel, aquecedor doméstico a óleo)
- b) **Ambos os fluidos confinados** (ex: os permutadores das IAA)

PERMUTADORES DE CALOR

O mais simples permutador de calor consiste simplesmente em dois tubos concêntricos de diferentes diâmetros, onde um dos fluidos circula no tubo interior e outro no espaço anular adjacente ao tubo interior.

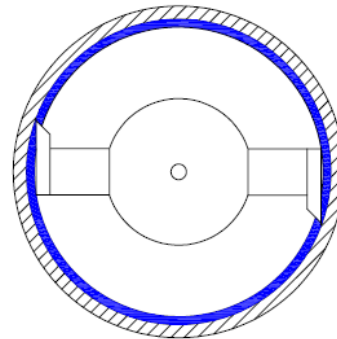
Permutador de tubos coaxiais (tubular), passe simples



Ex. condensador laboratorial de Liebig

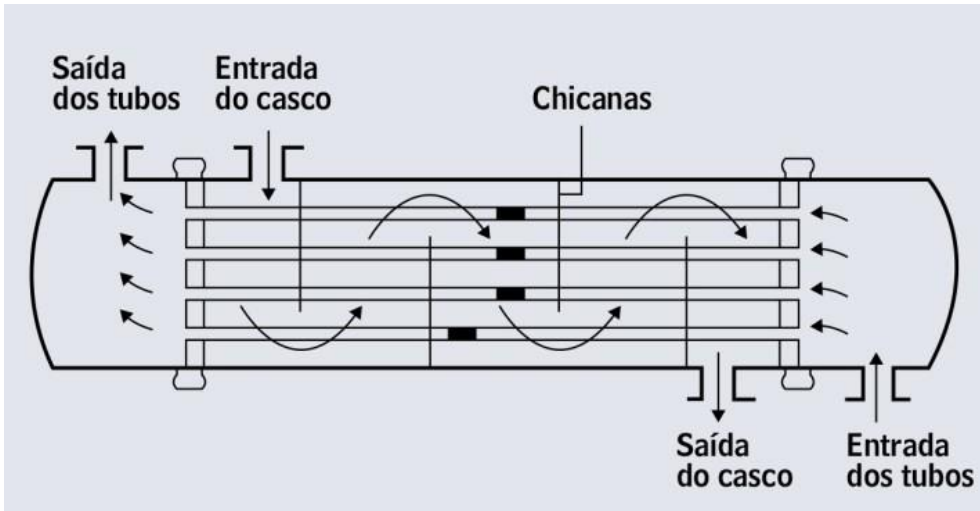
Permutador de superfície raspada (fluidos viscosos)

Lâmina roda e retira o produto das paredes do permutador de calor, são adequados para **aquecer e arrefecer produtos alimentares sensíveis**, vel. rotação: 200 – 450 rpm



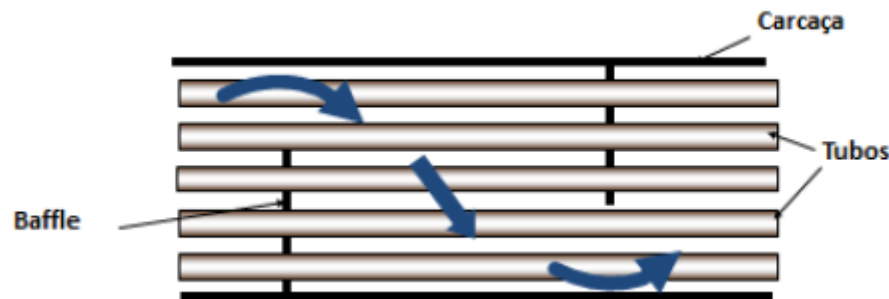
PERMUTADORES DE CALOR

- Permutadores de tubos e carcaça

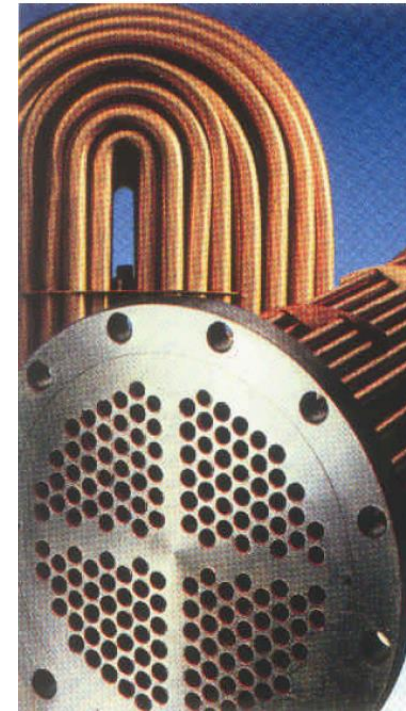
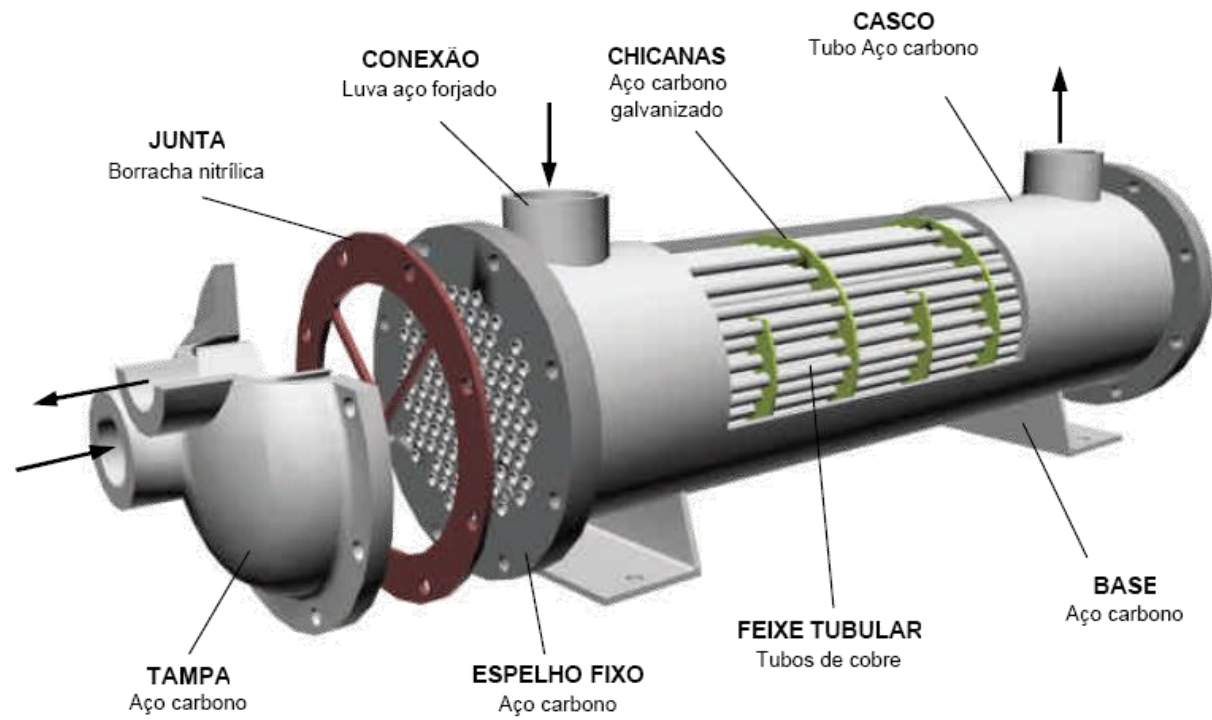


Permutador multitubular

Este tipo de permutadores é constituído por um grande número de tubos acomodados no interior de uma casca que os envolve (*shell*; carcaça). A transferência de calor ocorre, quando dois fluidos a diferentes temperaturas passam pelo permutador, um **pelo interior dos tubos** e o outro na zona delimitada pelas **paredes exteriores** dos tubos e pela carcaça (*shell*).



Para aumentar a turbulência e conseqüentemente a transferência de calor, são introduzidas no interior da carcaça chicanas ou placas deflectoras (*baffles*)



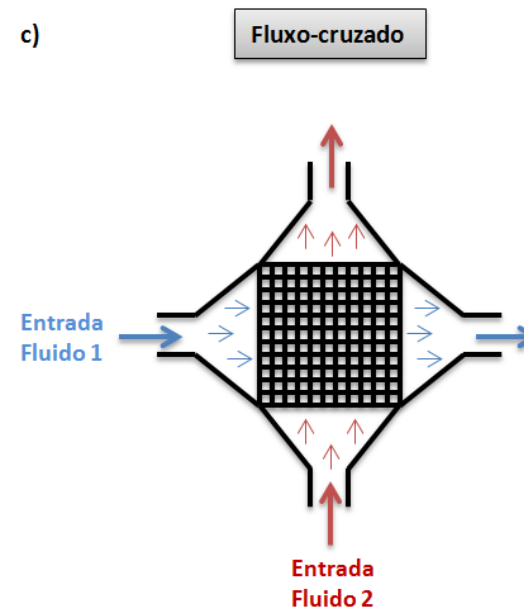
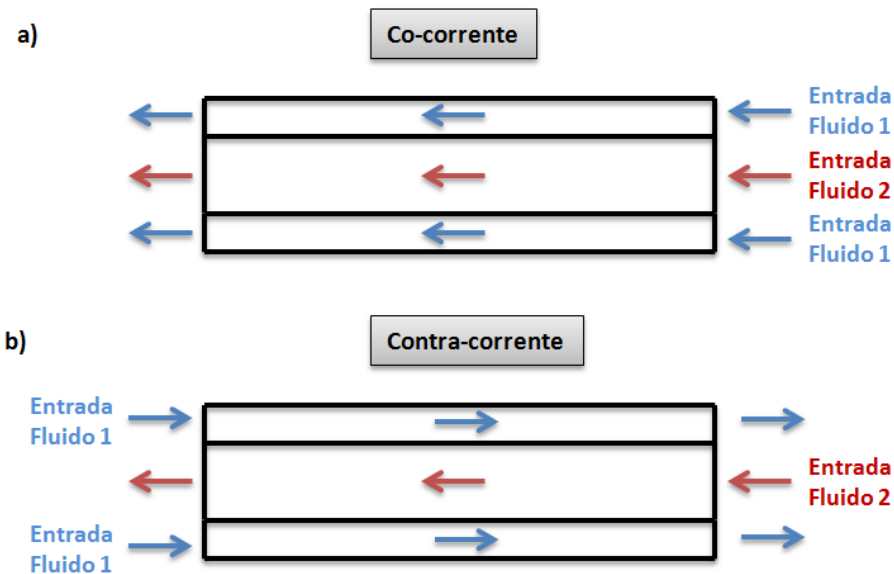
PERMUTADORES DE CALOR

Configuração de fluxo em permutadores de calor :

Co-corrente - os fluidos movem-se no mesmo sentido, ou seja ambos os fluidos entram e saem pelo mesmo lado do permutador.

Contra-corrente - os fluidos movem-se em sentidos opostos e entram por extremidades opostas do permutador.

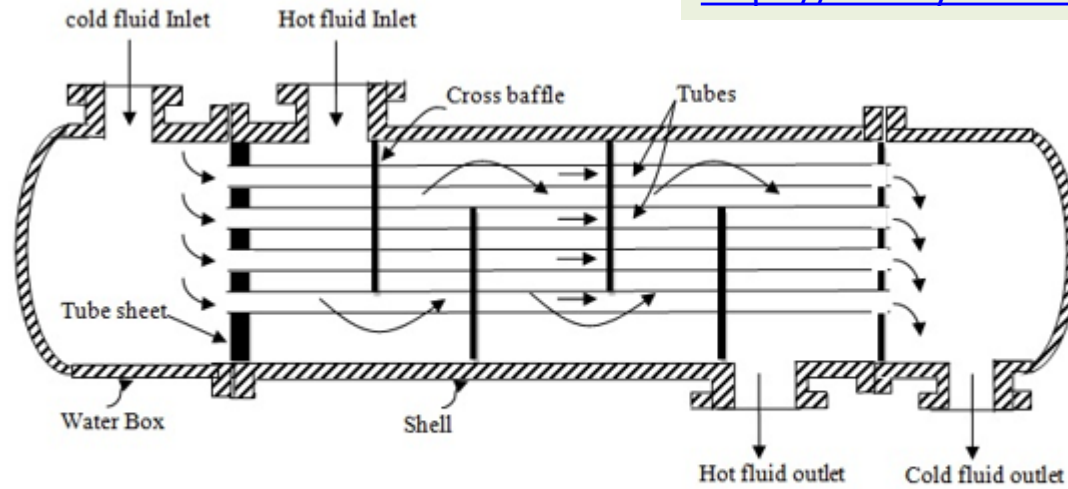
Fluxo cruzado - os fluidos movem-se perpendicularmente um ao outro e entram por extremidades perpendiculares do permutador



PERMUTADORES DE CALOR

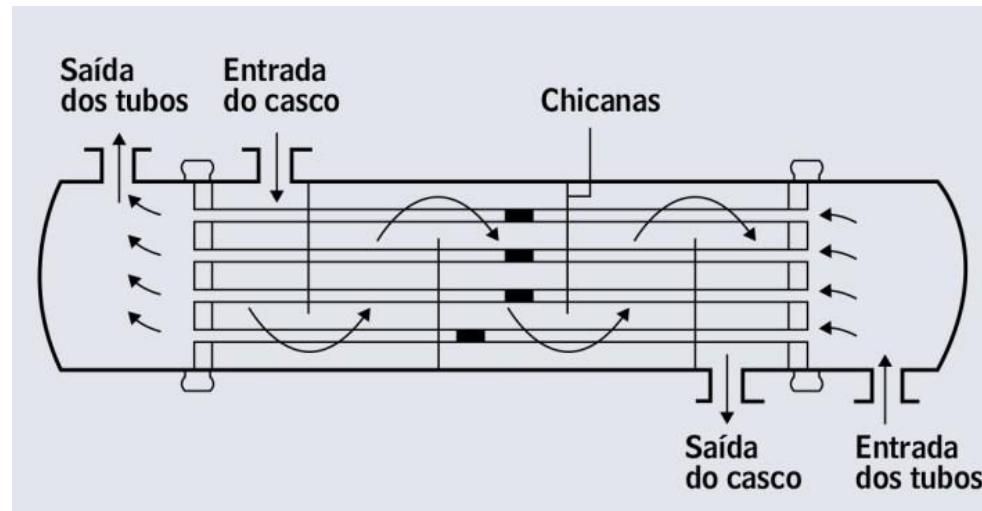
Permutador com uma passagem na carcaça e uma nos tubos

<https://www.youtube.com/watch?v=OyQ3SaU4KKU>



(a)

One Shell Pass,
One Tube Pass



PERMUTADORES DE CALOR

Permutadores de feixe tubular e passes múltiplos

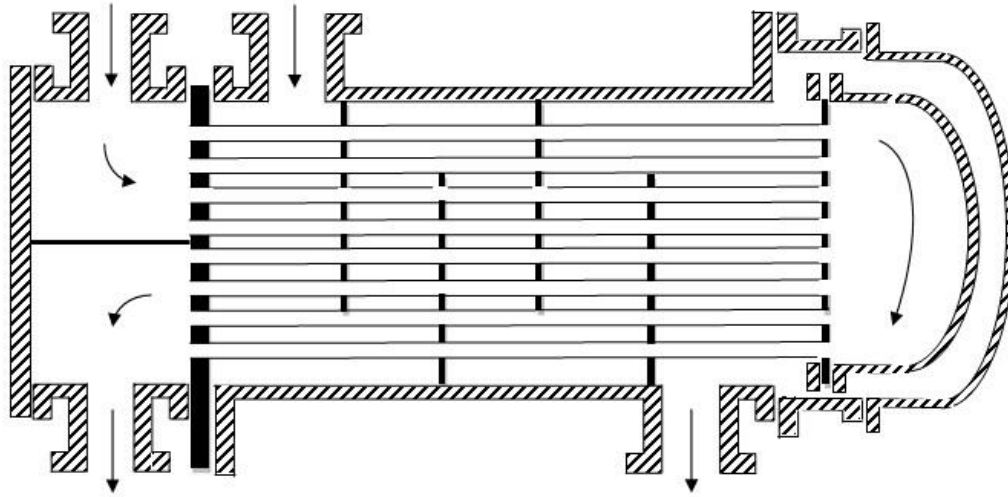
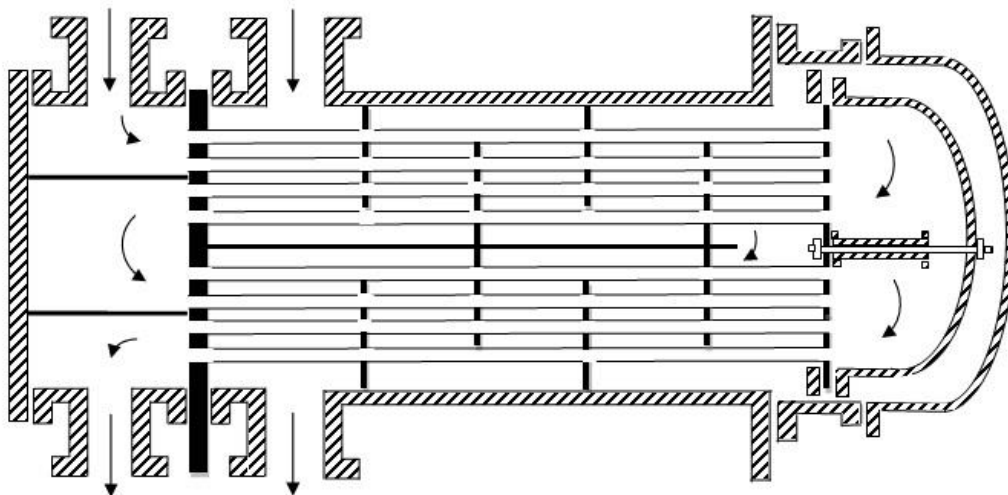
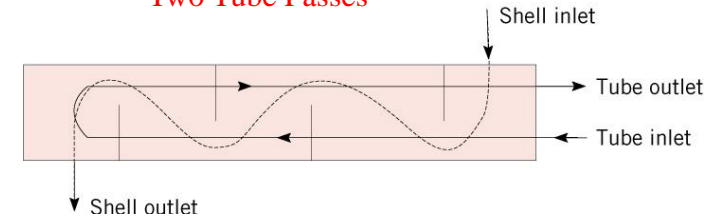
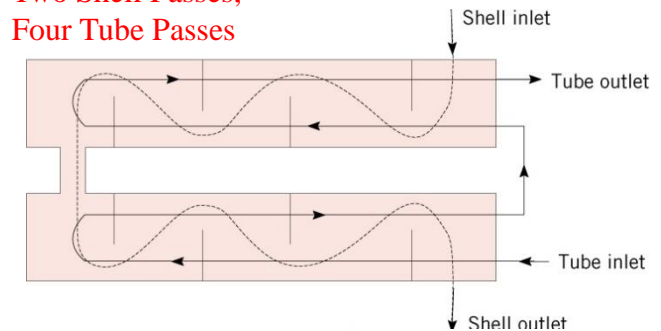


Fig. 8.5: 1-2 exchanger showing pass partition plate

One Shell Pass,
Two Tube Passes

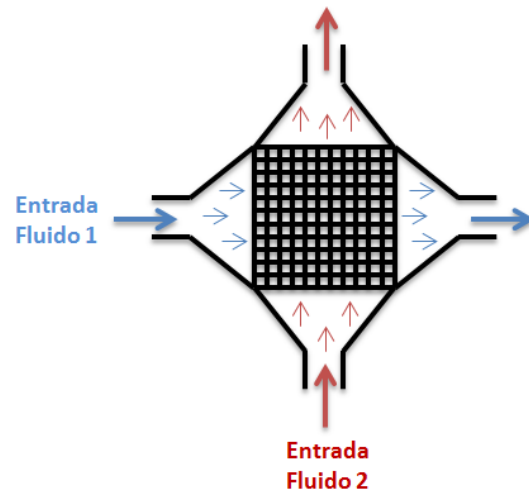
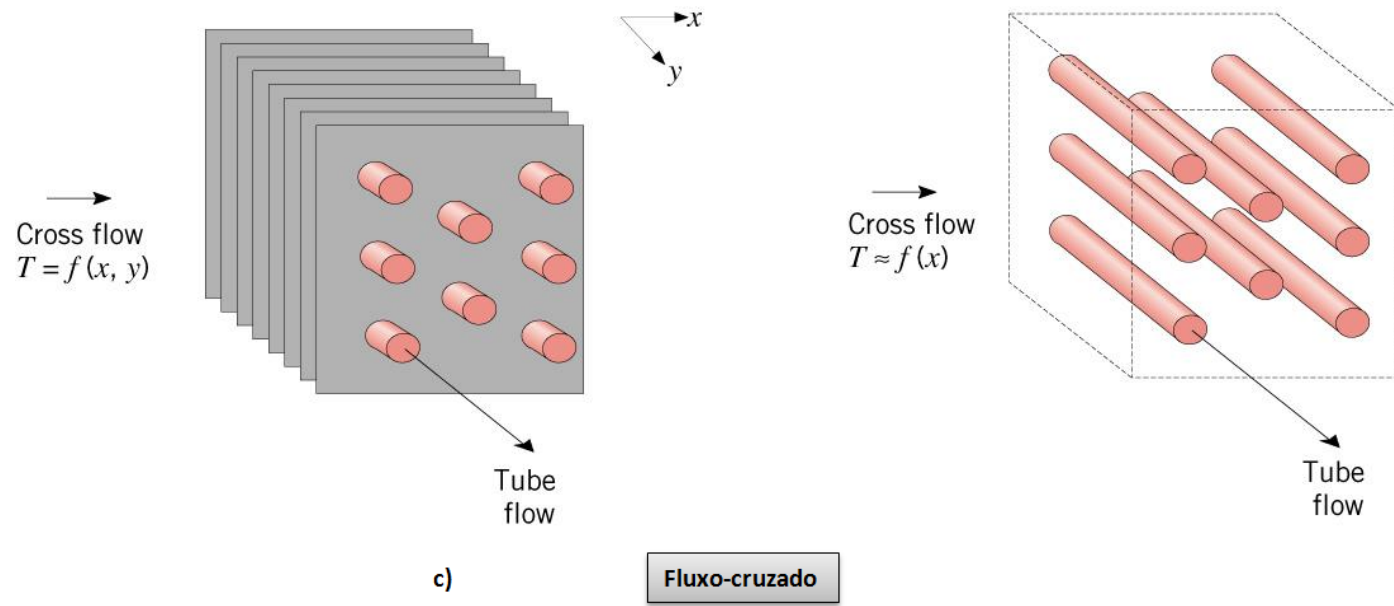


Two Shell Passes,
Four Tube Passes



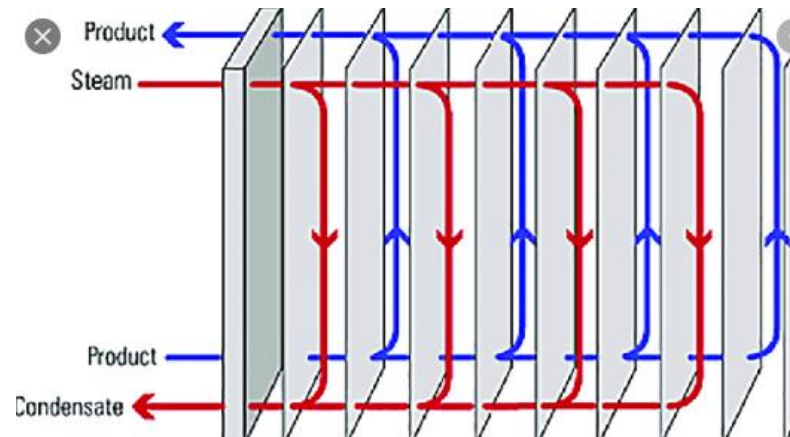
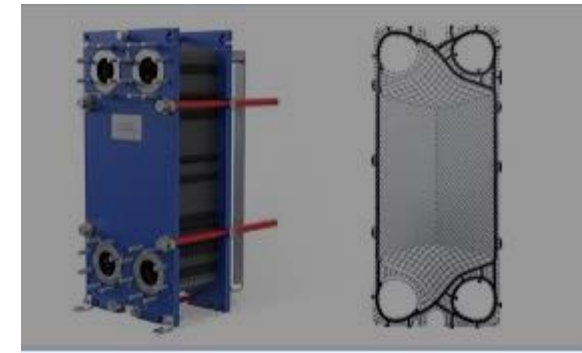
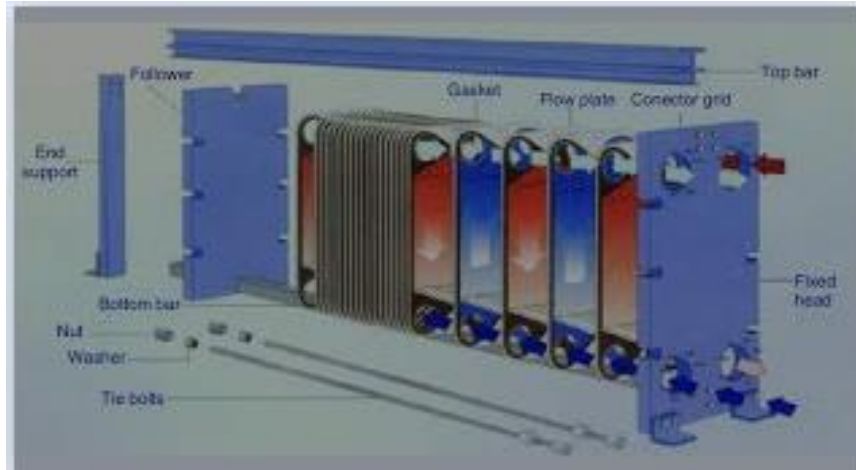
PERMUTADORES DE CALOR

Permutadores de calor com fluxos cruzados



PERMUTADORES DE CALOR

Permutadores de Placas



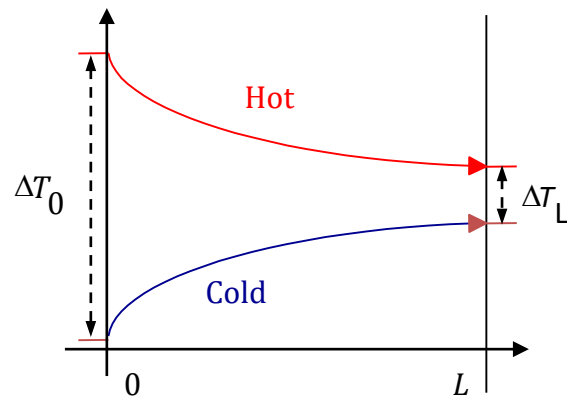
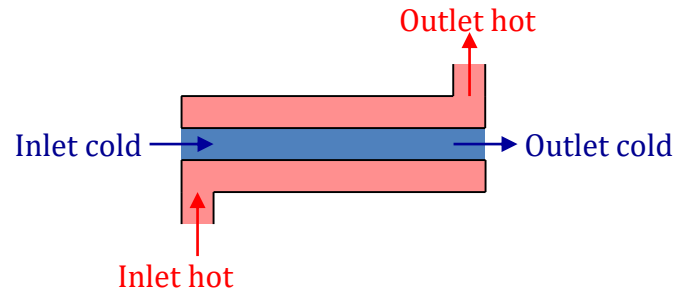
Utilizados na pasteurização de leite (HTST: 72 °C/15 s Leite Pasteurizado para consumo diário até 5 dias; UHT: 136-140 °C/2-10 s; até ~5 meses)

<https://www.youtube.com/watch?v=br3gkrXTmdY>

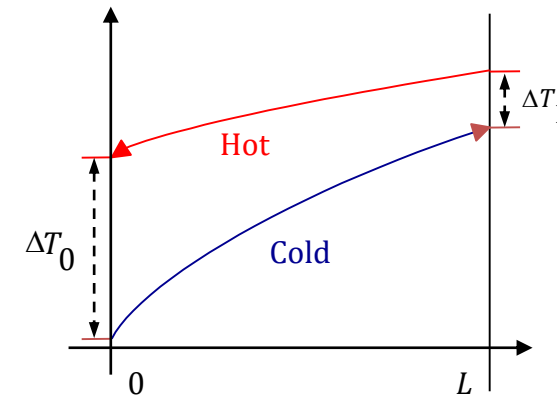
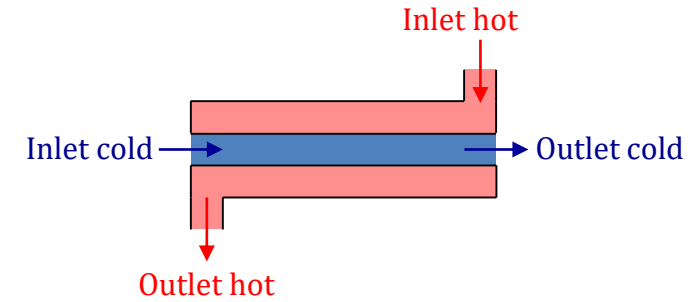
PERMUTADORES DE CALOR

Configurações – tipo e variação da temperatura num permutador

FLUXO PARALELO (CO-CORRENTE)

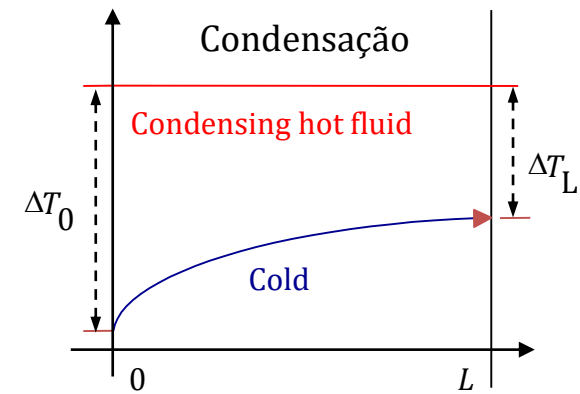
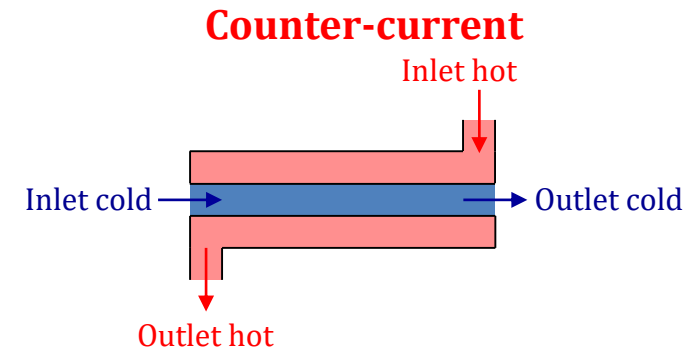
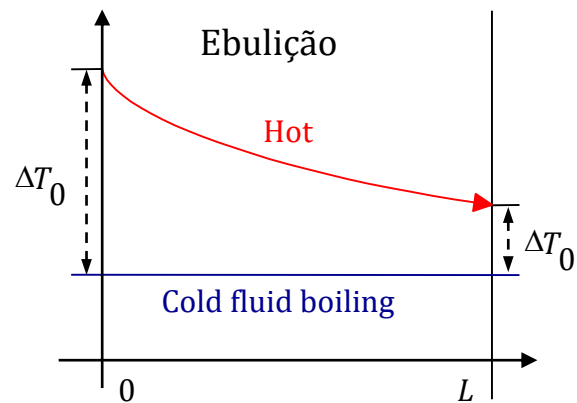
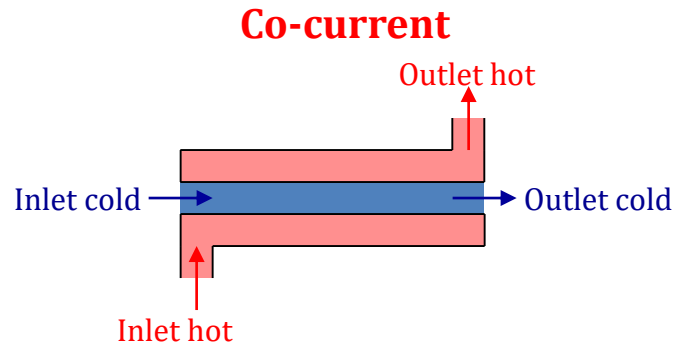


FLUXO OPOSTO (CONTRA-CORRENTE)

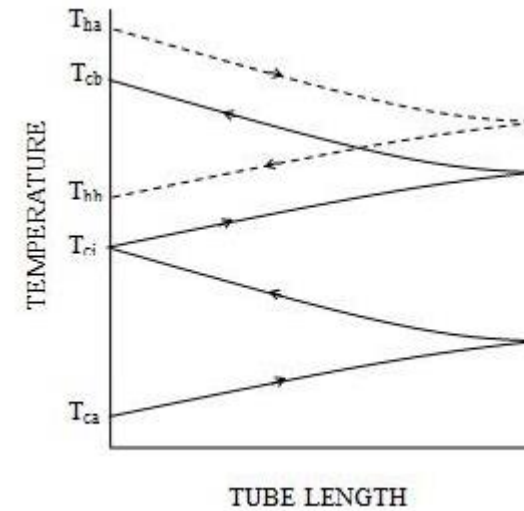
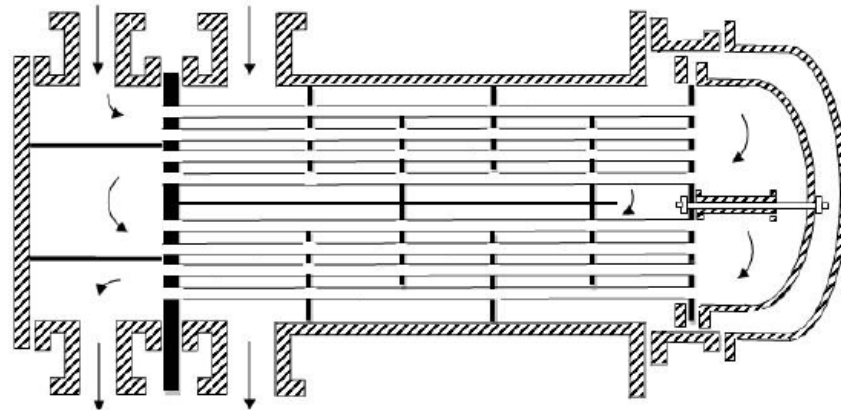
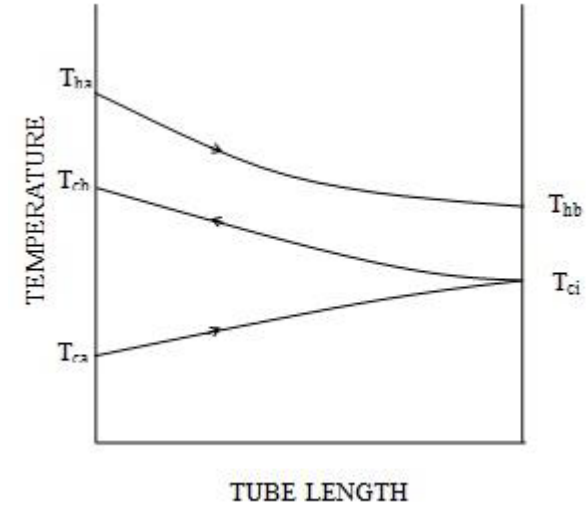
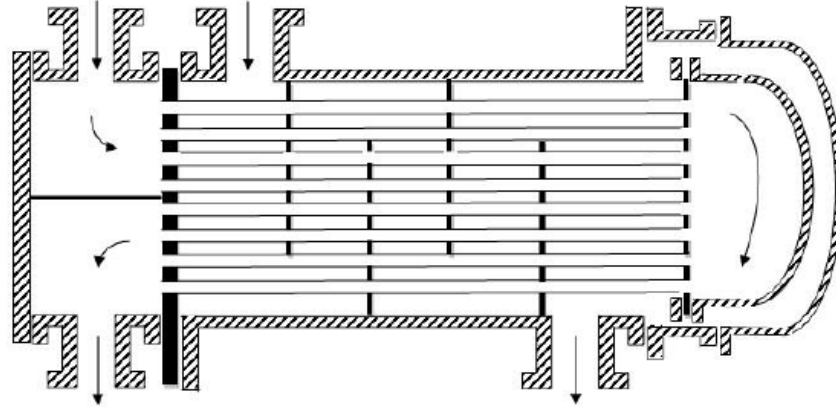


PERMUTADORES DE CALOR

Variação da temperatura em permutadores onde ocorre a mudança de fase



PERMUTADORES DE CALOR



Temperature-length curve corresponding to
(a) 1-2 exchanger ; (b) 2-4 exchanger

Balanço de energia:

O calor perdido pelo **fluido** quente é ganho pelo fluido frio

$$\Rightarrow Q_q = (m_q c_p)_q (T_{qe} - T_{qs}) = Q_f = (m_f c_p)_f (T_{fs} - T_{fe})$$

q = quente
 f = frio
 e = entrada
 s = saída

Q = fluxo de calor (W ou J/s); m = caudal mássico do fluido (kg/s);
 c_p = calor específico do fluido (J/kg.K); T = temperatura do fluido (K)

Permutadores

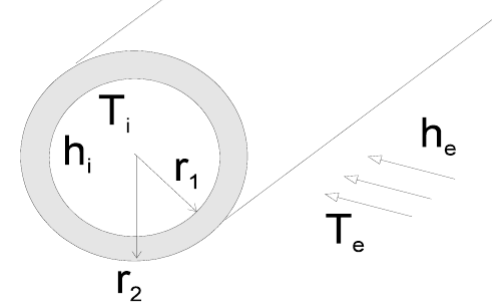
- Nos permutadores de calor os fluidos que permutam energia encontram-se separados por uma superfície de transferência de calor.
- A transferência de calor num permutador é caracterizada por um coeficiente global de permuta de calor U [W/m²K]
- A taxa de transferência de calor pode então ser definida pelo produto da capacidade de transferência de calor ($A U$) pela diferença média de temperatura entre os fluidos.

$$Q = A_t U_m \Delta T_{In}$$

COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Resistências térmicas a considerar:

1. Resistências de parede associadas aos fluidos
2. Resistências das incrustações nas paredes
3. Resistência do(s) material(s) que constituem a parede do tubo



RESISTÊNCIA TOTAL (R) ⇒ COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR (U_m)

$R =$ (Resistência do fluxo interno) + (Resistência do material do tubo) + (Resistência do fluxo externo)

$$R = \frac{1}{A_i h_i} + \frac{x}{k A_m} + \frac{1}{A_o h_o}$$

Convecção
Condução
Convecção
Fluido_{int}
(parede do tubo)
Fluido_{ext}

$$Q = \frac{T_A - T_B}{\frac{1}{h_i A} + \frac{\Delta x}{k A} + \frac{1}{h_e A}}$$

x = espessura do tubo

A_i e A_o = áreas das superfícies interna e externa do tubo, respectivamente (m^2)

$$A_m = \frac{A_o - A_i}{\ln\left(\frac{A_o}{A_i}\right)} = \text{área média logarítmica (m}^2\text{)}$$

k = condutividade térmica do material ($W/m \cdot ^\circ C$)

h_i e h_o = Coef. Transf. calor para fluxos interno e externos ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

Coeficiente global de transferência de calor

$$U_0 = \frac{1}{A_0 R} = \text{(baseado na área externa do tubo)}$$

$$\frac{1}{\left(\frac{A_0}{A_i}\right)\left(\frac{1}{h_i}\right) + \left(\frac{A_0}{A_m}\right)\left(\frac{x}{k}\right) + \frac{1}{h_0}} =$$

$$R = \frac{1}{A_i h_i} + \frac{x}{k A_m} + \frac{1}{A_0 h_0}$$

Considerando que:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{A_0}{A_m} = \frac{D_0}{2x} \ln\left(\frac{D_0}{D_i}\right) \\ D_0 - D_i = 2x \end{array} \right.$$

D_i e D_0 = diâmetros interno e externo do tubo

$$\frac{1}{\left(\frac{D_0}{D_i}\right)\left(\frac{1}{h_i}\right) + \left(\frac{1}{2k}\right)D_0 \ln\left(\frac{D_0}{D_i}\right) + \frac{1}{h_0}} =$$

De modo análogo, U_i , baseado na área interna do tubo, será:

$$U_i = \frac{1}{A_{i0}R} = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \left(\frac{A_i}{A_m}\right)\left(\frac{x}{k}\right) + \left(\frac{A_i}{A_0}\right)\left(\frac{1}{h_0}\right)} =$$

$$\frac{1}{\frac{1}{h_i} + \left(\frac{1}{2k}\right)D_i \ln\left(\frac{D_0}{D_i}\right) + \left(\frac{D_i}{D_0}\right)\left(\frac{1}{h_0}\right)} =$$

Quando a espessura da parede é pequena e k elevado a resistência do tubo pode ser desprezada e

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_0}}$$

k = condutividade térmica do material (W/m.°C)

h_i e h_0 = coef. Transf. calor para fluxos interno e externos (W/m².°C)

Área de permuta a considerar no cálculo do U :

Área a que corresponde a maior resistência térmica:

Quando os fluidos interno e externo apresentam as mesmas características termodinâmicas e estejam em condições \approx , $U_1 \sim U_2 \sim U_m$

Condições muito diferenciadas \Rightarrow considerar a face em que a permuta é mais difícil

Exemplos:

a) Água circula no interior de um tubo aquecido por gases de combustão \Rightarrow permuta mais difícil através dos gases \Rightarrow considerar A_o

b) Óleo quente circula num tubo imerso em água fria \Rightarrow μ do óleo dificulta a permuta \Rightarrow considerar A_i

c) Água fria circula num tubo imerso em óleo quente \Rightarrow considerar A_o

ACUMULAÇÃO DE DEPÓSITOS (INCRUSTAÇÕES) NA TUBAGEM

⇒ Resistência térmica adicional ⇒ introduzir um factor F de incrustação [(m². °C)/W]
(valores tabelados (“Fouling factors”))

$$R = \frac{1}{A_i h_i} + \frac{F_i}{A_i} + \frac{x}{k A_m} + \frac{F_0}{A_0} + \frac{1}{A_0 h_0}$$

F_i e F_0 = factores de incrustação interna e externa

$$U_0 = \frac{1}{\left(\frac{D_0}{D_i}\right)\left(\frac{1}{h_i}\right) + \left(\frac{D_0}{D_i}\right)F_i + \left(\frac{D_0}{2k}\right)\ln\left(\frac{D_0}{D_i}\right) + F_0 + \frac{1}{h_0}} =$$

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

Fluido	F [(m². °C)/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



Valores típicos de U_o em diferentes aplicações

Permutador	U_o (W/m ² °C)
Água - óleo	60 - 350
Gás - gás	60 - 600
Condensadores ar	350 - 800
Condensadores NH ₃	800 - 1400
Condensadores vapor de H ₂ O	1500 - 5000

U_o é baixo para fluidos com baixo k → gases e óleos

Exercício 1.

Determine o coeficiente global de transferência de calor baseado na área externa do tubo de aço com $D_i = 2,5$ cm e $D_o = 3,34$ cm e $k = 110$ W/(m. °C). Para as seguintes condições, os coeficientes de transferência de calor por convecção são, respectivamente, $h_i = 1200$ W/(m² °C) e $h_o = 2000$ W/(m² °C), os factores de incrustação das superfícies interior e exterior são $F_i = F_o = 0,00018$ (m². °C)/W.

$$U_0 = \frac{1}{\left(\frac{D_o}{D_i}\right)\left(\frac{1}{h_i}\right) + \left(\frac{D_o}{D_i}\right)F_i + \left(\frac{D_o}{2k}\right)\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right) + F_o + \frac{1}{h_o}} =$$

Exercício 1.

Determine o coeficiente global de transferência de calor baseado na área externa do tubo de aço com $D_i = 2,5$ cm e $D_o = 3,34$ cm e $k = 110$ W/(m. °C). Para as seguintes condições, os coeficientes de transferência de calor por convecção são, respectivamente, $h_i = 1200$ W/(m² °C) e $h_o = 2000$ W/(m² °C), os factores de incrustação das superfícies interior e exterior são $F_i = F_o = 0,00018$ (m². °C)/W.

$$U_0 = \frac{1}{\left(\frac{D_o}{D_i}\right)\left(\frac{1}{h_i}\right) + \left(\frac{D_o}{D_i}\right)F_i + \left(\frac{D_o}{2k}\right)\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right) + F_o + \frac{1}{h_o}} =$$

$$U_0 = \frac{1}{\left(\frac{3,34}{2,5}\right)\left(\frac{1}{1200}\right) + \left(\frac{3,34}{2,5}\right)0,00018 + \left(\frac{0,0334}{2 \times 110}\right)\ln\left(\frac{3,34}{2,5}\right) + 0,00018 + \frac{1}{2000}} =$$

$$0,0016 + 3,456 \times 10^{-4} + 1,42 \times 10^{-4} + 0,00018 + (1/2000) = 0,00277$$

$$U = 1/0,00277 = \underline{481,3 \text{ W/ m}^2 \cdot \text{°C}}$$

Exercício 2.

Óleo à temperatura de $T = 100\text{ °C}$ circula dentro de tubos de cobre de parede muito fina com $D_i = 3,0\text{ cm}$ e $h_i = 20\text{ W/(m}^2\text{ °C)}$. No lado exterior do tubo o calor dissipa-se para o ar que está à temperatura de $T = 20\text{ °C}$ por convecção natural com $h_0 = 8\text{ W/(m}^2\text{ °C)}$.

Calcule o U e a perda de calor por metro de tubo Q .

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_0}}$$

$$Q = A_t U_m \Delta T_{ln}$$

h_i e h_0 = coef. Transf. calor para fluxos interno e externos ($\text{W/m}^2\text{.°C}$)

Exercício 2.

Óleo à temperatura de $T = 100\text{ °C}$ circula dentro de tubos de cobre de parede muito fina com $D_i = 3,0\text{ cm}$ e $h_i = 20\text{ W/(m}^2\text{ °C)}$. No lado exterior do tubo o calor dissipa-se para o ar que está à temperatura de $T = 20\text{ °C}$ por convecção natural com $h_0 = 8\text{ W/(m}^2\text{ °C)}$.

Calcule o U e a perda de calor por metro de tubo Q .

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_0}}$$

$$Q = A_t U_m \Delta T_{ln}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{20} + \frac{1}{8}} = 5,71\text{ W/(m}^2\text{ °C)}$$

$$A = \pi D L$$

$$Q = AU(T_i - T_\infty) = \pi \times 0,03 \times 1 \times 5,71 (100 - 20) = 43,1\text{ W/m}$$

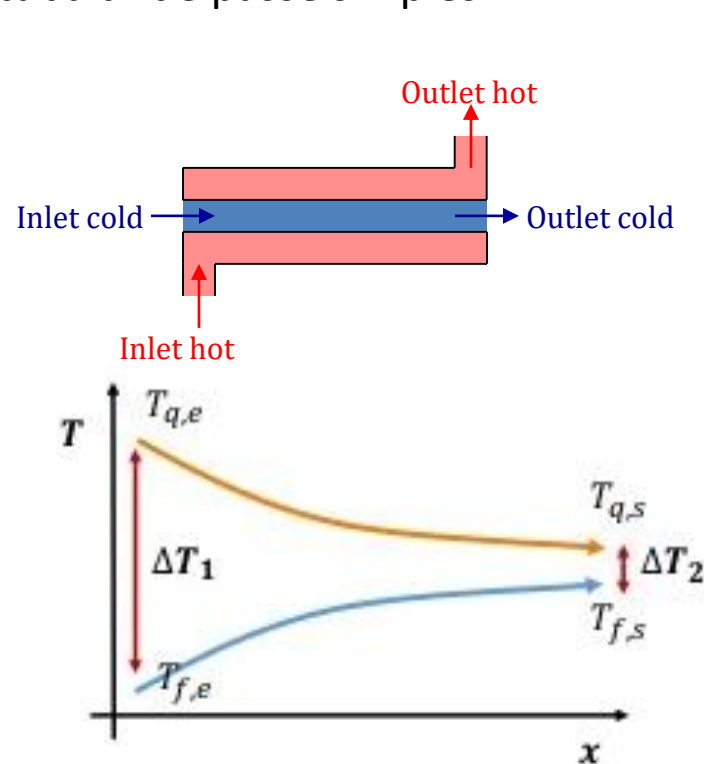
h_i e h_0 = coef. Transf. calor para fluxos interno e externos ($\text{W/m}^2\text{.°C}$)

MÉTODO DA MÉDIA LOGARÍTMICA DA DIFERENÇA DE TEMPERATURA (LMTD - "Logarithmic mean temperature difference")

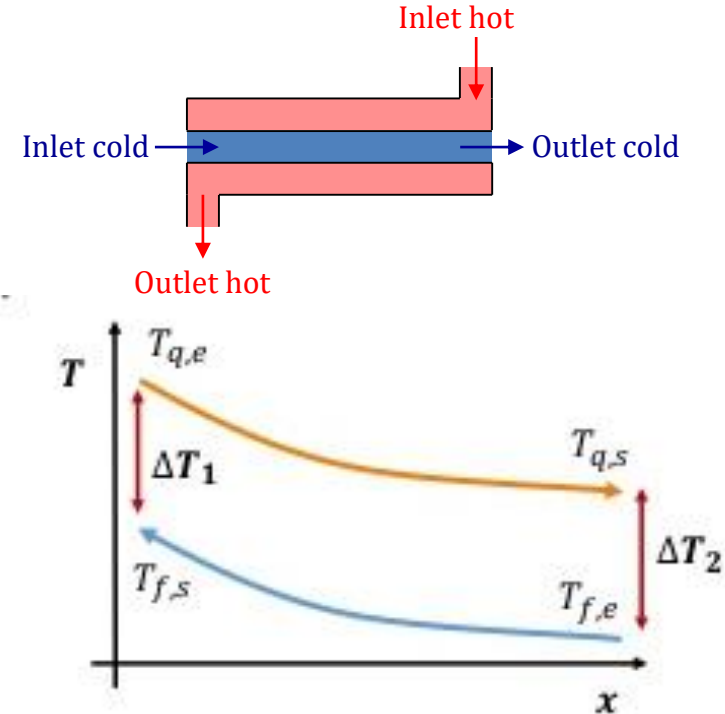
Ao longo de um permutador a temperatura dos fluidos variam surgindo assim a necessidade de analisar os perfis de temperatura em configurações típicas e definir a diferença média de temperatura entre os fluidos.

$$\Delta T = T_{fl. quente} - T_{fl. frio} \rightarrow \text{Varia em geral ao longo do permutador}$$

Permutador tubular de passe simples



Fluxo paralelo em co-corrente



Fluxo em contra-corrente

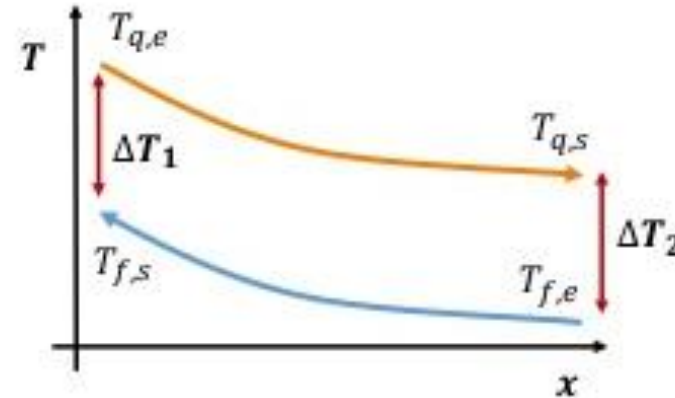
PERMUTADOR TUBULAR DE PASSE SIMPLES

$$\Delta T = T_{fl. quente} - T_{fl. frio}$$

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (13)$$

ΔT_{ln} = média logarítmica da diferença de temperatura

$\Delta T_1, \Delta T_2$ = diferença de temperaturas entre o fluido quente e o fluido frio nas 2 extremidades do permutador, $x = 1$; $x = 2$



Taxa de transferência de calor:

$$Q = A_t U_m \Delta T_{ln} \quad (14)$$

↓

Área total de permuta

$$Q_q = (mc_p)_q (T_{qe} - T_{qs}) = Q_f = (mc_p)_f (T_{fs} - T_{fe}) = Q = A_t U_m \Delta T_{ln}$$

<https://www.youtube.com/watch?v=1xXIE7qpRtY>

Exercício 3.

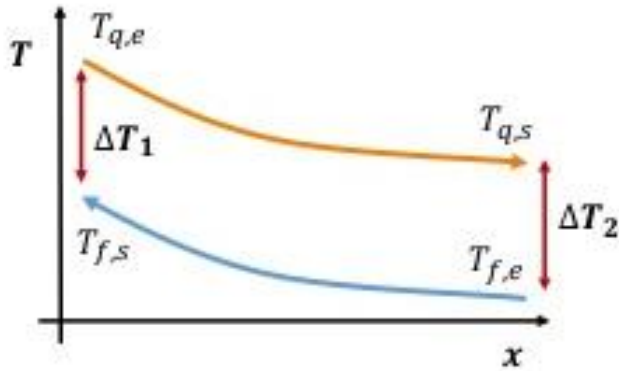
Um permutador tubular de fluxo oposto, é utilizado para arrefecer água dos 22 °C até 6 °C utilizando água salgada que circula na parte exterior do tubo e que entra à (-2) °C e sai a 3 °C. O coeficiente global de transferência de calor estimado é de $U_m = 500 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ °C})$. Calcule a área de transferência necessária para uma troca de calor de $Q = 10 \text{ kW}$.

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

$$Q = A_t U_m \Delta T_{ln}$$

Exercício 3.

Um permutador tubular de fluxo oposto, é utilizado para arrefecer água dos 22 °C até 6 °C utilizando água salgada que circula na parte exterior do tubo e que entra à (-2) °C e sai a 3 °C. O coeficiente global de transferência de calor estimado é de $U_m = 500 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ °C})$. Calcule a área de transferência necessária para uma troca de calor de $Q = 10 \text{ kW}$.



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

$$\Delta T_1 = 22 - 3 = 19$$

$$\Delta T_2 = 6 - (-2) = 8$$

$$\Delta T_m = \frac{19 - 8}{\ln(19/8)} = 12,7^\circ\text{C}$$

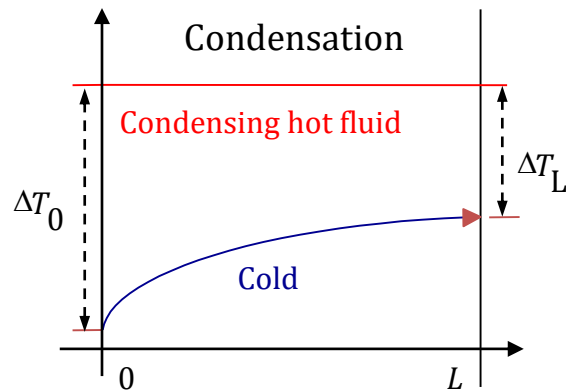
$$Q = A_t U_m \Delta T_{ln}$$

$$10000 = A \times 500 \times 12,7$$

$$A = 1,57 \text{ m}^2$$

Exercício 4.

Pretende-se condensar vapor a $T = 100\text{ °C}$ na parede exterior do tubo com $D_i = 2,5\text{ cm}$ de um condensador, no interior do qual circula óleo com uma taxa de $m = 0,05\text{ kg/s}$ e com temperatura de entrada de $T = 40\text{ °C}$. Calcule o comprimento de tubo requerido para que a temperatura de saída do óleo seja de $T = 80\text{ °C}$. $h_i = 20.5\text{ W/m}^2\text{ °C}$. Assuma que a resistência do tubo é desprezável.



óleo $c_p = 2047\text{ J/kg °C}$

$$Q = A_t U_m \Delta T_{ln} = m c_p \Delta T_{\text{óleo}}$$

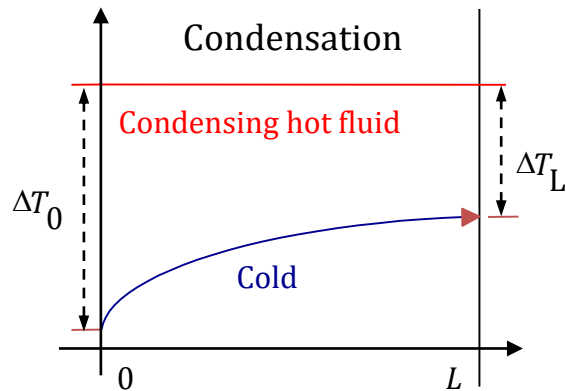
$$\Delta T_m = \Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_0 - \Delta T_L}{\ln\left(\frac{\Delta T_0}{\Delta T_L}\right)}$$

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

Exercício 4.

Pretende-se condensar vapor a $T = 100\text{ °C}$ na parede exterior do tubo com $D_i = 2,5\text{ cm}$ de um condensador, no interior do qual circula óleo com uma taxa de $m = 0,05\text{ kg/s}$ e com temperatura de entrada de $T = 40\text{ °C}$. Calcule o comprimento de tubo requerido para que a temperatura de saída do óleo seja de $T = 80\text{ °C}$. $h_i = 20.5\text{ W/m}^2\text{ °C}$. Assuma que a resistência do tubo é desprezável.

A resistência do tubo e a resistência do lado do vapor são desprezáveis



$$U = \frac{1}{1/h_i} \Rightarrow U = h_i$$

$$\Delta T_m = \Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_0 - \Delta T_L}{\ln\left(\frac{\Delta T_0}{\Delta T_L}\right)}$$

$$\begin{aligned} \Delta T_0 &= 100 - 40 \\ \Delta T_L &= 100 - 80 \end{aligned}$$

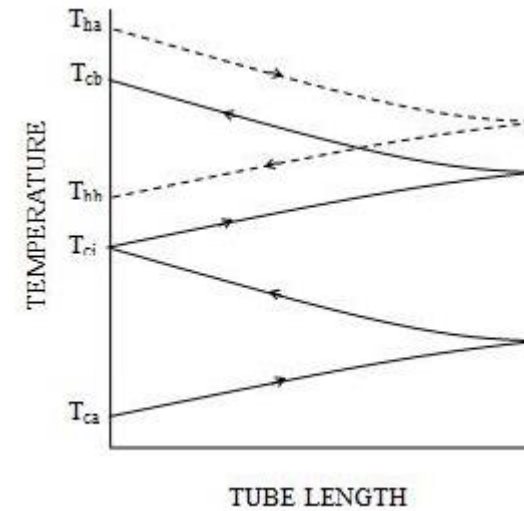
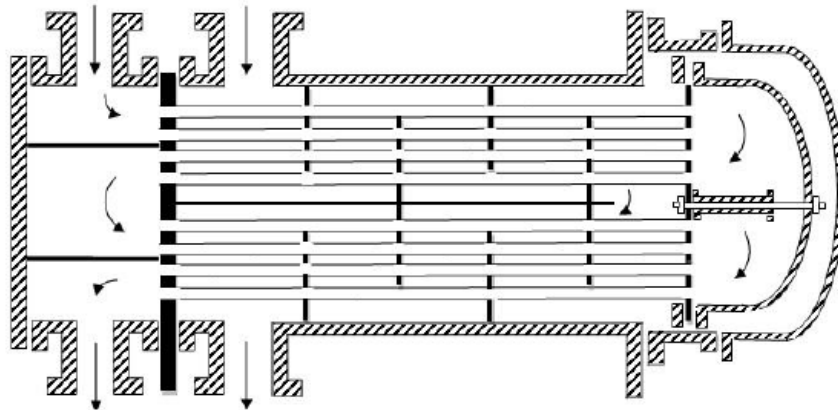
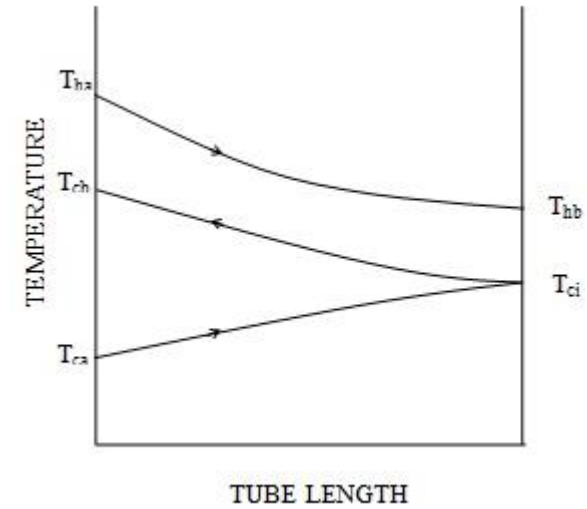
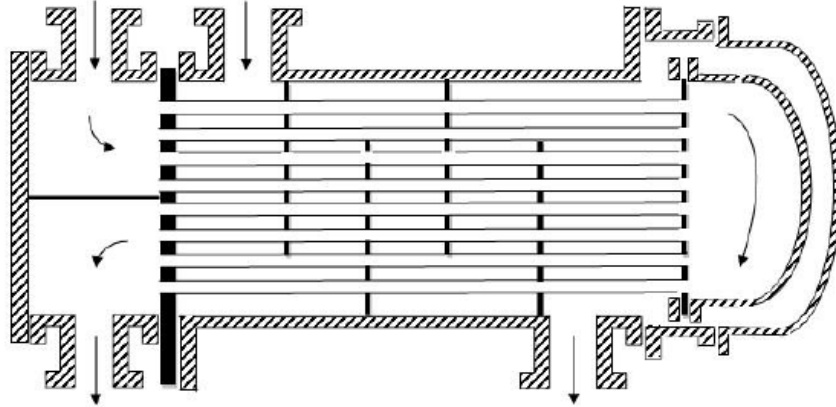
$$\Delta T_m = \frac{60 - 20}{\ln(60/20)} = 36,4\text{ °C}$$

Óleo $c_p = 2047\text{ J/kg °C}$

$$Q = A_t U_m \Delta T_{ln} = m c_p \Delta T_{\text{óleo}}$$

$$(\pi \times 0,025 \times L) (20,5) (36,4) = (0,05) (2047) (80 - 40)$$

$$L = 69,8\text{ m}$$

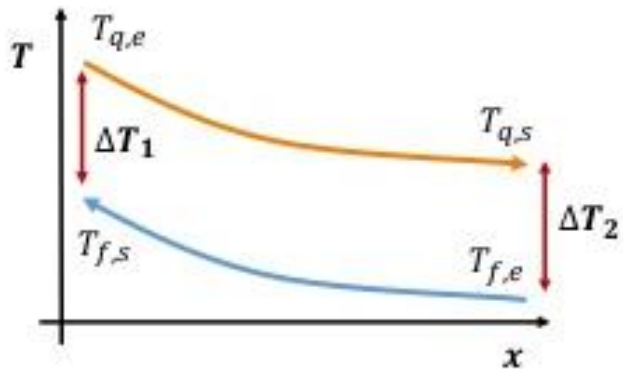


Temperature-length curve corresponding to
 (a) 1-2 exchanger ; (b) 2-4 exchanger

CORRECÇÃO DA MÉDIA LOGARÍTMICA DA DIFERENÇA DE TEMPERATURA (LMTD)

LMTD → Aplicável a permutadores de passe simples, fluxo não cruzado

Para permutadores de passe múltiplo e fluxo cruzado, as expressões desenvolvidas para cálculo da ΔT efectiva entre o fluido quente e o frio são muito complexas para aplicação prática ⇒ factor de correcção F do LMTD



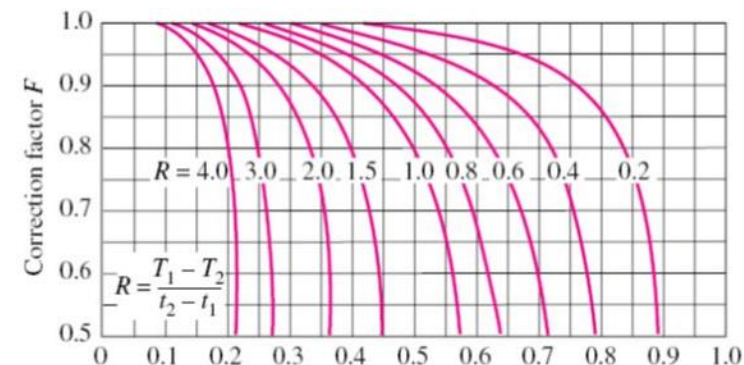
F → valor retirado de ábacos

$$\Delta T_{corr} = F(\Delta T_{ln}, \text{contra-corrente})$$

$$\Delta T_1 = T_{i,fl. quente} - T_{o,fl. frio}$$

$$\Delta T_2 = T_{o,fl. quente} - T_{i,fl. frio}$$

o = "out"
 i = "in"



(a) One-shell pass and 2, 4, 6, etc. (any multiple of 2), tube passes

Factor de correcção F do LMTD

Abcissas:

P = Eficiência térmica do fluido que circula nos tubos

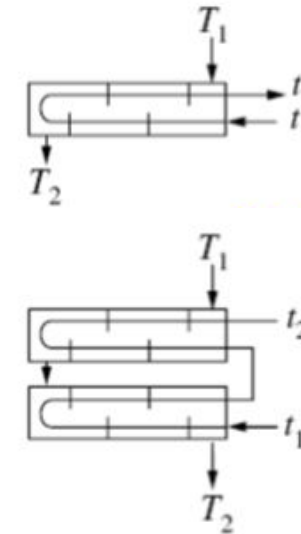
$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$$

T_1 = temperatura de entrada carcaça

T_2 = temperatura de saída carcaça

t_1 = temperatura de entrada tubo

t_2 = temperatura de saída tubo



Ordenadas: Factor de correcção F

$F < 1$ → correntes cruzadas passes múltiplos

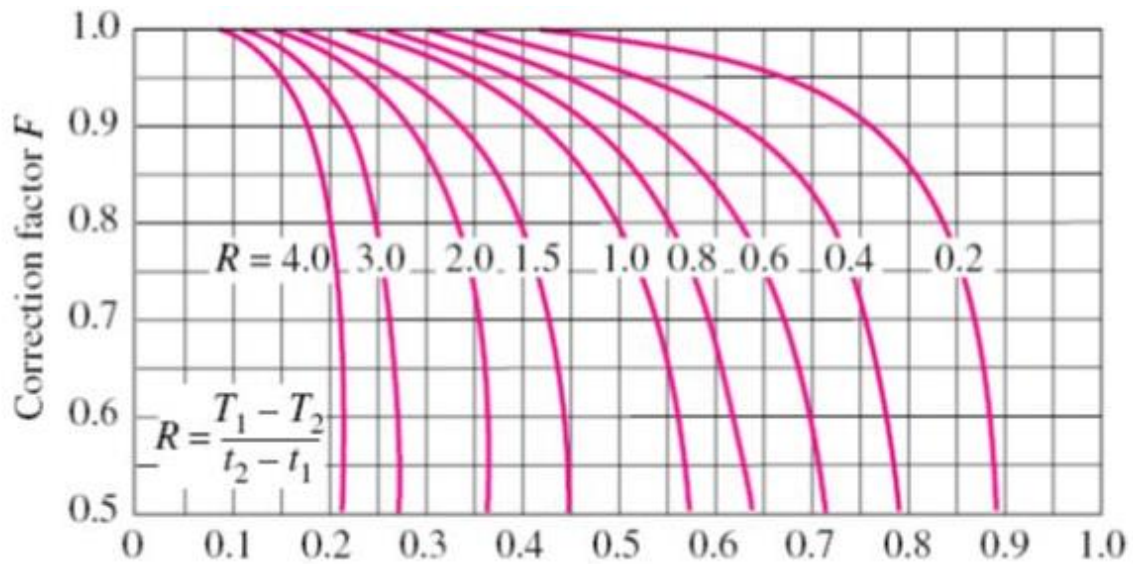
$F = 1$ → passe simples em contra-corrente

Curvas:
$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = \frac{(mc_p)_{\text{lado do tubo}}}{(mc_p)_{\text{lado da carcaça}}}$$

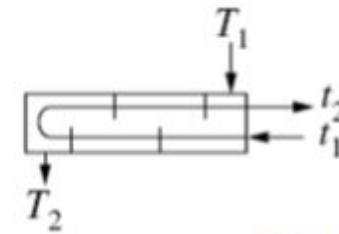
$R \in [0, +\infty [$

$R = 0 \Rightarrow$ condensação de vapor puro no lado da carcaça

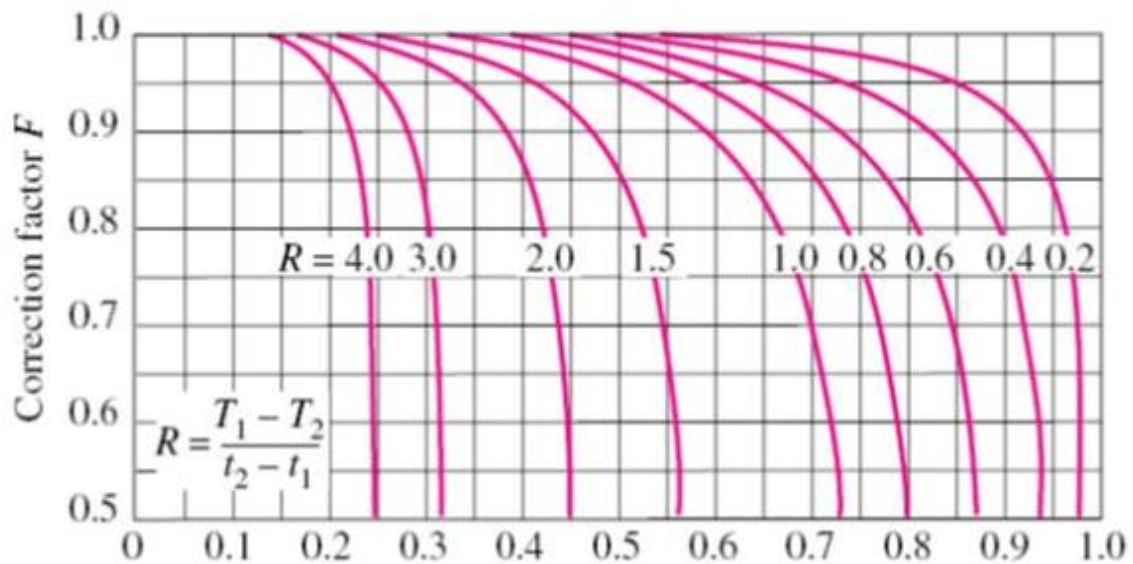
$R = \infty \Rightarrow$ evaporação no lado do tubo



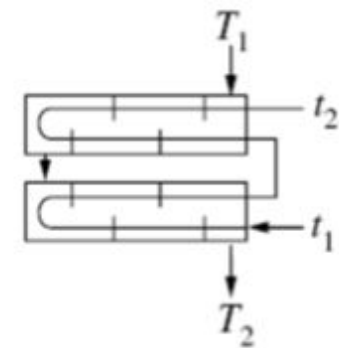
(a) One-shell pass and 2, 4, 6, etc. (any multiple of 2), tube passes



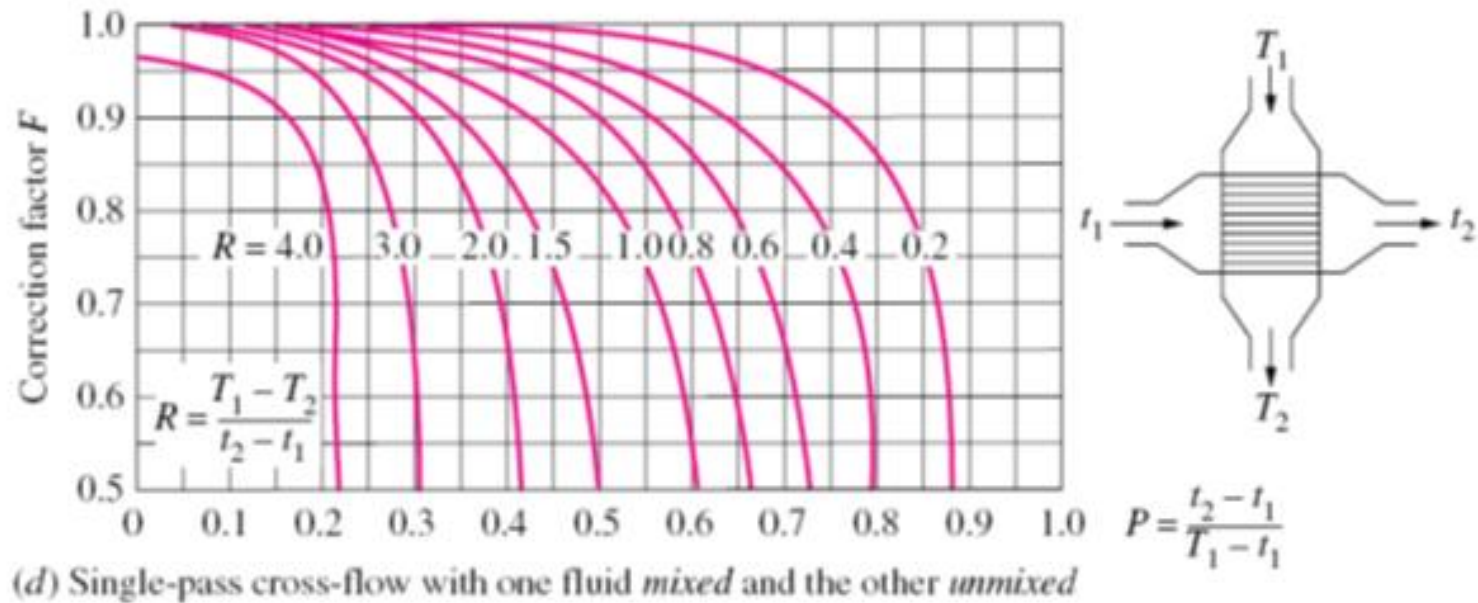
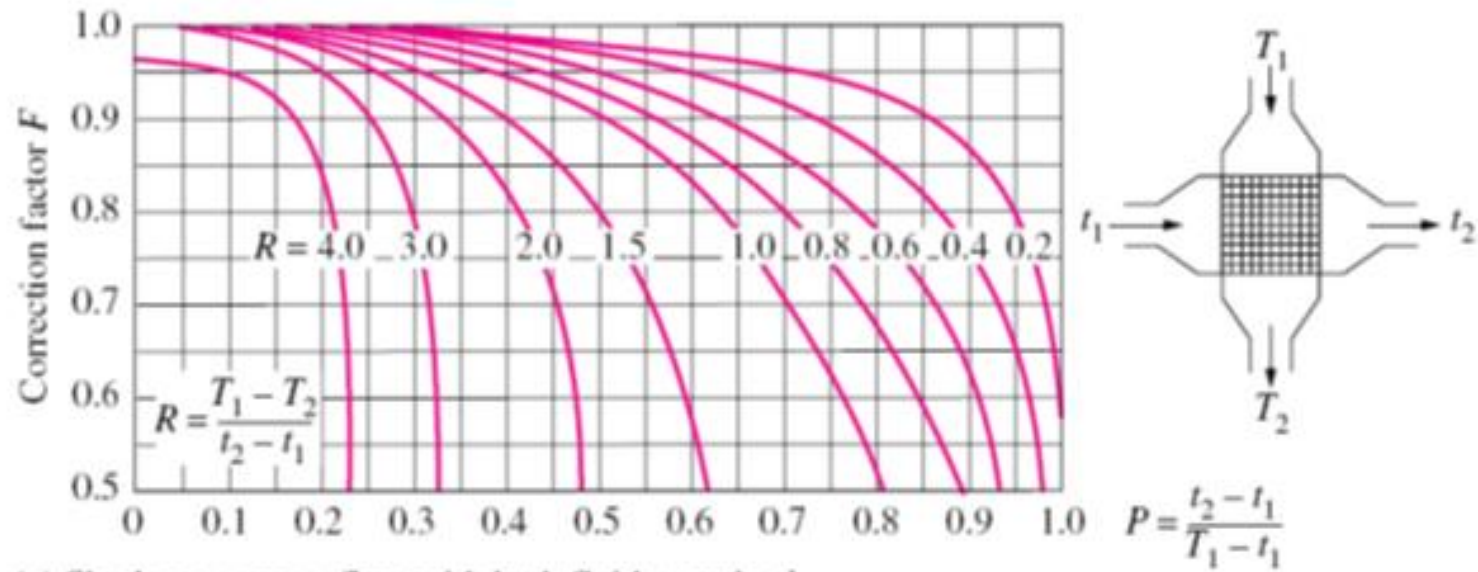
$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$$



(b) Two-shell passes and 4, 8, 12, etc. (any multiple of 4), tube passes



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



Exercício 5.

Um permutador de invólucro e tubos 1:2 (2 passagens nos tubos e uma passagem na carcaça) é utilizado para aquecer água ($c_p = 4186 \text{ J/kg.K}$) dos 25 °C até aos 80 °C , que circula com um caudal de $\dot{m} = 1,5 \text{ kg/s}$. No interior dos tubos circula água sob pressão que entra a 200 °C e sai a 100 °C . O coeficiente global de transferência de calor $U = 1250 \text{ W/(m}^2\text{°C)}$. Calcular a área de transferência necessária.

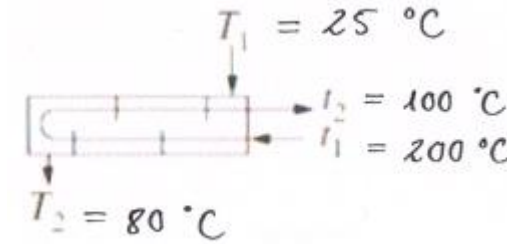
Exercício 5.

Um permutador de invólucro e tubos 1:2 (2 passagens nos tubos e uma passagem na carcaça) é utilizado para aquecer água ($c_p = 4186 \text{ J/kg.K}$) dos 25 °C até aos 80 °C , que circula com um caudal de $m = 1,5 \text{ kg/s}$. No interior dos tubos circula água sob pressão que entra a 200 °C e sai a 100 °C . O coeficiente global de transferência de calor $U = 1250 \text{ W/(m}^2\text{°C)}$. Calcular a área de transferência necessária.

Cálculo do calor necessário para aquecer a água que circula na carcaça

$$Q = mc_p \Delta T$$

$$Q = 1,5 \times 4186 \times (80 - 25) = 345345 \text{ J/s (W)}$$



Dimensionamento do permutador

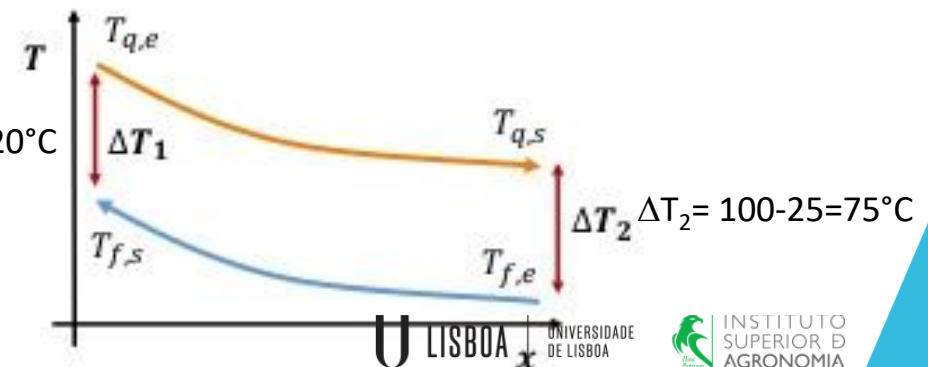
$$Q = A_t U_m \Delta T_{ln} F$$

Cálculo do ΔT_{ln}

$$\Delta T_m = \Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_0 - \Delta T_L}{\ln\left(\frac{\Delta T_0}{\Delta T_L}\right)}$$

$$\Delta T_{ln} = \frac{120 - 75}{\ln\frac{120}{75}} = 95,7 \text{ °C}$$

Considerar um permutador simples em contracorrente



Exercício 5.

Um permutador de invólucro e tubos 1:2 (2 passagens nos tubos e uma passagem na carcaça) é utilizado para aquecer água ($c_p = 4186 \text{ J/kg.K}$) dos 25 °C até aos 80 °C , que circula com um caudal de $m = 1,5 \text{ kg/s}$. No interior dos tubos circula água sob pressão que entra a 200 °C e sai a 100 °C . O coeficiente global de transferência de calor $U = 1250 \text{ W/(m}^2\text{°C)}$. Calcular a área de transferência necessária.

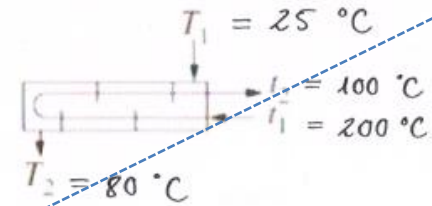
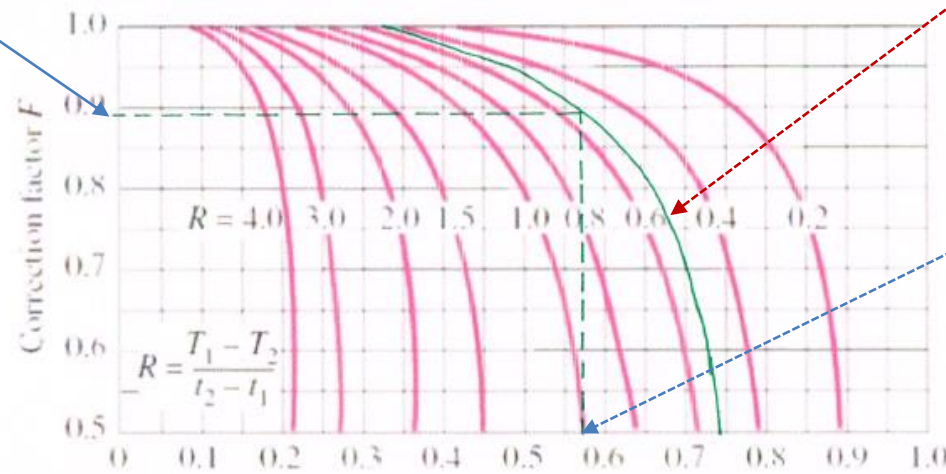
Cálculo do Factor de Correção F

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = \frac{25 - 80}{100 - 200} = 0,55$$

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} = \frac{100 - 200}{25 - 200} = 0,57$$

$$Q = A_t U_m \Delta T_{ln} F$$

$F = 0,89$



$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \Leftrightarrow \left. \begin{array}{l} P = 0,57 \\ R = 0,55 \end{array} \right\} F = 0,89$$

$$Q = 345345 = A \times 1250 \times 95,7 \times 0,89$$



$$A = 3,24 \text{ m}^2$$

Exercício 6.

Um permutador de tubular 2:4 (4 passagens nos tubos e 2 passagens na carcaça) é utilizado para aquecer água com óleo. A água entra nos tubos com um caudal $\dot{m} = 2 \text{ kg/s}$ à temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ e sai a $T = 80 \text{ }^\circ\text{C}$.

O c_p da água é 4186 J/kg.K . O óleo entra no lado da carcaça à temperatura de $140 \text{ }^\circ\text{C}$ e sai à temperatura de $T = 90 \text{ }^\circ\text{C}$. Calcular a área de transferência necessária, considerando um coeficiente global de transferência de calor $U = 300 \text{ W/(m}^2\text{ }^\circ\text{C)}$:

Exercício 6.

Um permutador de tubular 2:4 (4 passagens nos tubos e 2 passagens na carcaça) é utilizado para aquecer água com óleo. A água entra nos tubos com um caudal $m = 2 \text{ kg/s}$ à temperatura de 20°C e sai a $T = 80^\circ\text{C}$.

O c_p da água é 4186 J/kg.K . O óleo entra no lado da carcaça à temperatura de 140°C e sai à temperatura de $T = 90^\circ\text{C}$. Calcular a área de transferência necessária, considerando um coeficiente global de transferência de calor $U = 300 \text{ W/(m}^2\text{C)}$:

Cálculo do calor necessário para aquecer a água que circula nos tubos

$$Q = mc_p\Delta T = 2 \times 4186 \times (80 - 20) = 5020320 \text{ W}$$

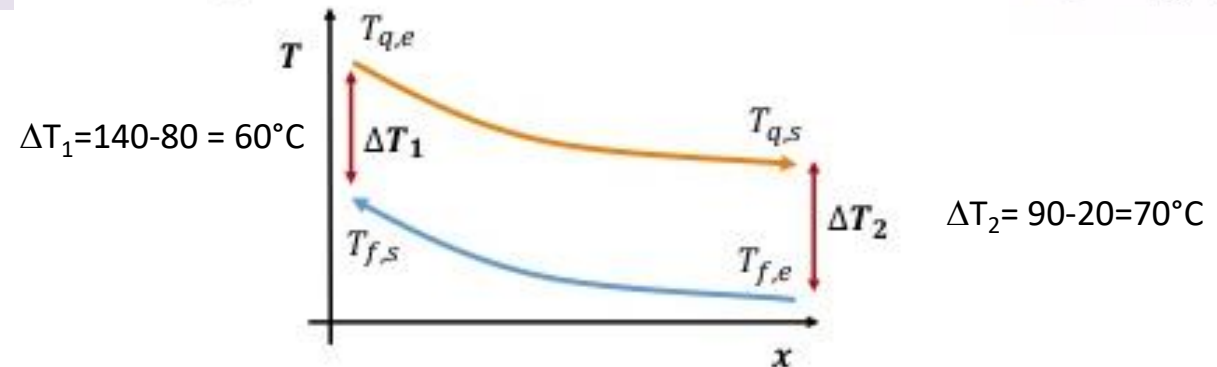
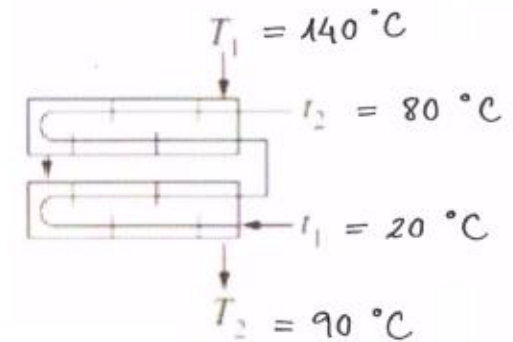
Dimensionamento do permutador

$$Q = A_t U_m \Delta T_{ln} F$$

Cálculo do ΔT_{ln}

$$\Delta T_m = \Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_0 - \Delta T_L}{\ln\left(\frac{\Delta T_0}{\Delta T_L}\right)}$$

$$\Delta T_{ln} = \frac{70 - 60}{\ln\frac{70}{60}} = 64,9^\circ\text{C}$$



Exercício 6.

Um permutador de tubular 2:4 (4 passagens nos tubos e 2 passagens na carcaça) é utilizado para aquecer água com óleo. A água entra nos tubos com um caudal $\dot{m} = 2 \text{ kg/s}$ à temperatura de 20 °C e sai a $T = 80 \text{ °C}$.

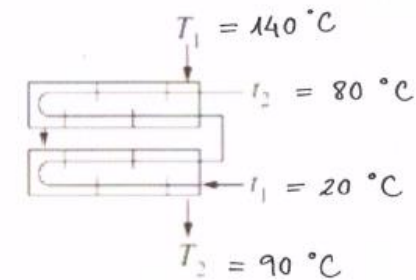
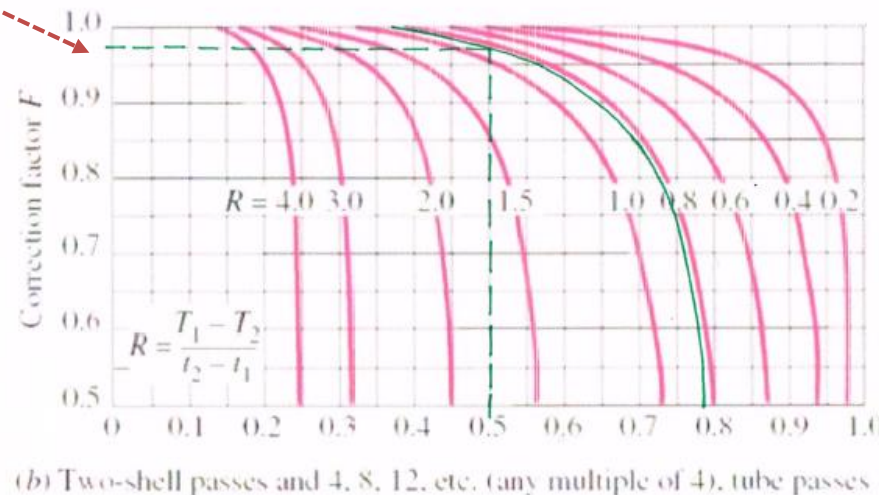
O c_p da água é 4186 J/kg.K . O óleo entra no lado da carcaça à temperatura de 140 °C e sai à temperatura de $T = 90 \text{ °C}$. Calcular a área de transferência necessária, considerando um coeficiente global de transferência de calor $U = 300 \text{ W/(m}^2\text{°C)}$:

Cálculo do Factor de Correção F

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = \frac{140 - 90}{80 - 20} = 0,83$$

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} = \frac{80 - 20}{140 - 20} = 0,5$$

$F = 0,97$



$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \Leftrightarrow P = 0,50 \quad \left. \begin{array}{l} \\ R = 0,83 \end{array} \right\} F = 0,97$$

$$Q = A_t U_m \Delta T_{ln} F$$

$$Q = 502\,320 = 300 \times A \times 64,9 \times 0,97$$

$$A = 26,6 \text{ m}^2$$

Exercício 7.

Resolva o problema anterior mas considerando um permutador 1:2 (2 passagens nos tubos e uma passagem na carcaça).

R: todos os parâmetros calculados no problema anterior são iguais, excepto o valor de F que tem que ser calculado com o ábaco 1:2 e não 2:4.

$$Q = 5020320 \text{ W}$$

$$\Delta T_{ln} = \frac{70-60}{\ln \frac{70}{60}} = 64,9^\circ\text{C}$$

$$Q = A_t U_m \Delta T_{ln} F$$

Exercício 7.

Resolva o problema anterior mas considerando um permutador 1:2 (2 passagens nos tubos e uma passagem na carcaça).

R: todos os parâmetros calculados no problema anterior são iguais, excepto o valor de F que tem que ser calculado com o ábaco 1:2 e não 2:4.

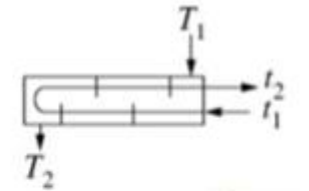
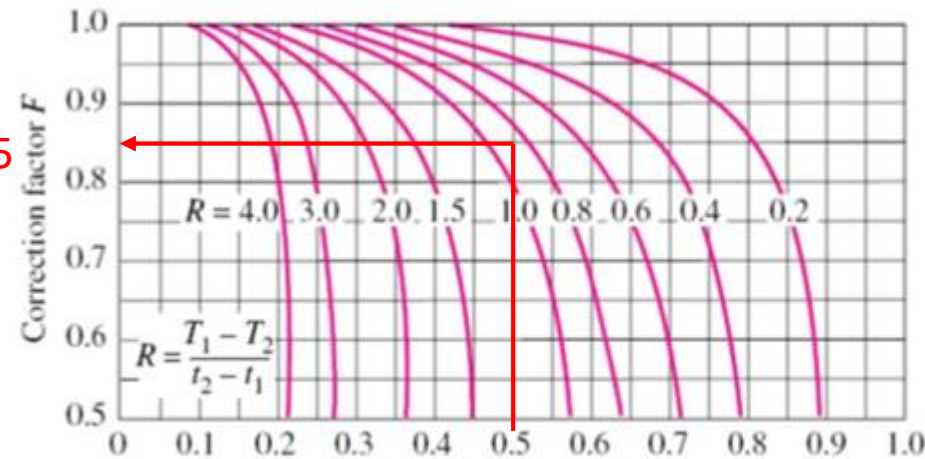
$$Q = 5020320 \text{ W} \quad \Delta T_{ln} = \frac{70-60}{\ln \frac{70}{60}} = 64,9^\circ\text{C}$$

Cálculo do Factor de Correção F

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = \frac{140 - 90}{80 - 20} = 0,83$$

$$P = \frac{80 - 20}{140 - 20} = 0,5$$

F=0,85



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

(a) One-shell pass and 2, 4, 6, etc. (any multiple of 2), tube passes

$$Q = A_t U_m \Delta T_{ln} F$$

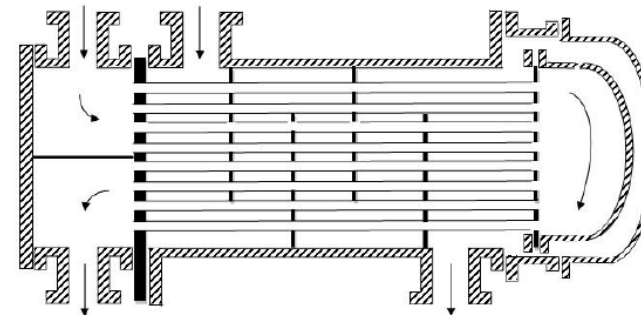
$$Q = 502\,320 = 300 \times A \times 64,9 \times 0,85$$

$$A = 30,3 \text{ m}^2$$

Exercício 8.

Pretende-se aquecer um óleo de calor específico $c_p=2,0$ kJ/kg.K de 300 K a 325 K, fazendo-o passar por um permutador de calor tubular, com tubos metálicos de diâmetro interior de 10 mm. Pelo exterior dos tubos circula água quente, sendo as temperaturas de entrada e de saída respectivamente 372 K e 361 K. O coeficiente global de transferência de calor da água para o óleo baseado na área exterior dos tubos, pode supor-se constante e igual a 230 W/m² K, e a quantidade de óleo que passa por cada tubo é 75 g/s. O óleo faz duas passagens através dos tubos, enquanto a água só faz uma passagem ao longo do exterior dos tubos. Calcule o comprimento dos tubos necessário.

$n =$ nº total de tubos

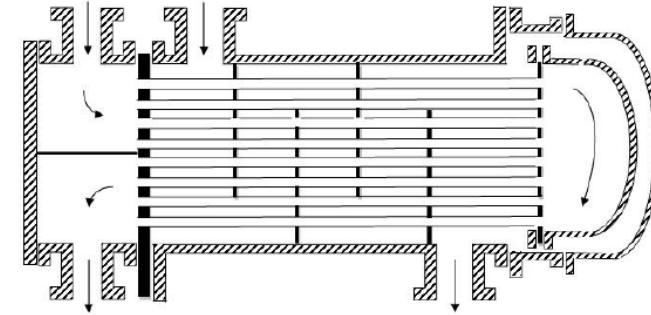


Exercício 8.

Pretende-se aquecer um óleo de calor específico $c_p=2,0$ kJ/kg.K de 300 K a 325 K, fazendo-o passar por um permutador de calor tubular, com tubos metálicos de diâmetro interior de 10 mm. Pelo exterior dos tubos circula água quente, sendo as temperaturas de entrada e de saída respectivamente 372 K e 361 K. O coeficiente global de transferência de calor da água para o óleo baseado na área exterior dos tubos, pode supor-se constante e igual a 230 W/m² K, e a quantidade de óleo que passa por cada tubo é 75 g/s. O óleo faz duas passagens através dos tubos, enquanto a água só faz uma passagem ao longo do exterior dos tubos. Calcule o comprimento dos tubos necessário.

Sendo n o nº total de tubos

Caudal mássico do óleo = 0,075 n kg/s



$$\Delta T_m = \Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_0 - \Delta T_L}{\ln\left(\frac{\Delta T_0}{\Delta T_L}\right)}$$

$$\Delta T_0 = 361 - 300 = 61$$

$$\Delta T_L = 372 - 325 = 47$$

$$\Delta T_m = \frac{61 - 47}{\ln(61/47)} = 53,7 \text{ K}$$

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} & P &= \frac{325 - 300}{372 - 300} = 0,347 \\ R &= \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} & R &= \frac{372 - 361}{325 - 300} = 0,44 \end{aligned} \right\} F = 0,98$$

Exercício 8.

Pretende-se aquecer um óleo de calor específico $c_p=2,0$ kJ/kg.K de 300 K a 325 K, fazendo-o passar por um permutador de calor tubular, com tubos metálicos de diâmetro interior de 10 mm. Pelo exterior dos tubos circula água quente, sendo as temperaturas de entrada e de saída respectivamente 372 K e 361 K. O coeficiente global de transferência de calor da água para o óleo baseado na área exterior dos tubos, pode supor-se constante e igual a 230 W/m² K, e a quantidade de óleo que passa por cada tubo é 75 g/s. O óleo faz duas passagens através dos tubos, enquanto a água só faz uma passagem ao longo do exterior dos tubos. Calcule o comprimento dos tubos necessário.

$$Q = A_t U_m \Delta T_{ln} F = m c_p \Delta T_{\text{óleo}}$$

$$Q = 0,075n \times 2000 (325-300) = 3750n \text{ W}$$

$$3750n = A_t \times 230 \times 53,7 \times 0,98 \Rightarrow A_t = 0,31n \text{ m}^2$$

A área por unidade de comprimento de um tubo de diâmetro interior de 10mm

$$A = (\pi \times 0,010 \times 1) = 0,0314 \text{ m}^2/\text{m} \text{ área para 1m de tubo}$$

$$\text{Comprimento total de tubos} = \frac{0,31n}{0,0314} = 9,87n \text{ m}$$

$$\text{Comprimento de cada tubo} = \frac{9,87n}{n} = 9,87\text{m} \text{ dividindo por 2 (duas passagens)} = 4,94 \text{ m}$$

Exercício 9.

Pretende-se construir um permutador de calor para condensar 7,5 kg/s de n-hexano à pressão de 150 kN/m², o que implica uma carga de calor $Q = 4,5$ MW. O hexano entra no condensador do lado do invólucro, à sua temperatura de condensação de 356 K, proveniente do topo de uma coluna de destilação.

Por experiência, prevê-se que o coeficiente global de transferência de calor seja $U = 450$ W/m² K. Dispõe-se de água de arrefecimento que entra a 289 K e sai a 310 K. com uma velocidade de 1,25 m/s. Calcular o caudal de água necessária, área de permuta, o nº total dos tubos ($D_i = 21,2$ mm e $D_e = 25,4$ mm) e o nº de tubos por passagem. Cada tubo deverá ter um comprimento de 4,88 m.

1º Estimar o caudal da água

Para uma carga de calor $Q = 4,5$ MW = $4,5 \times 10^3$ kW,

$$Q = mc_p \Delta T \quad c_p = 4,18 \text{ kJ/kg K}$$

$$4,5 \times 10^3 = m \times 4,18 (310 - 289) \Rightarrow 51,3 \text{ kg/s}$$

2º Estimar a área necessária para a transferência de calor

$$Q = A_t U_m \Delta T_m$$

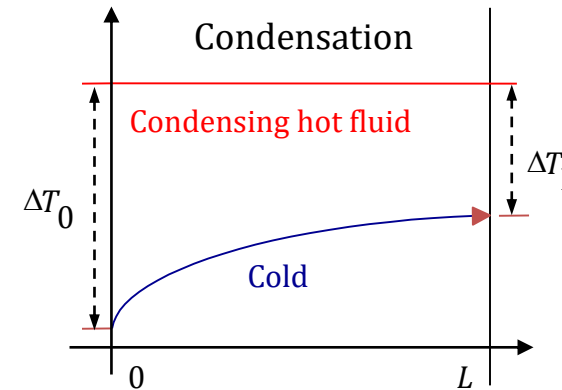
$$\Delta T_m = \frac{67 - 46}{\ln(67/46)} = 55,8 \text{ K}$$

$$\Delta T_0 = 356 - 289 = 67 \text{ K}$$

$$\Delta T_L = 356 - 310 = 46 \text{ K}$$

$$\Delta T_m = \Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_0 - \Delta T_L}{\ln\left(\frac{\Delta T_0}{\Delta T_L}\right)}$$

Não é necessário qualquer correcção pois a temperatura do fluido do lado do invólucro é constante



Exercício 9.

$$Q = 4,5 \times 10^3 \text{ kW}$$

$$U = 450 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$\Delta T_o = 55,8 \text{ K}$$

$$Q = A_t U_m \Delta T_m$$

$$Q = 4,5 \times 10^3 = A_t \times 450 \times 55,8 \Rightarrow A_t = 179,2 \text{ m}^2$$

3º estimar o nº total de tubos

Área exterior dos tubos por metro

$$A = \pi \times 0,0254 \times 1,0 = 0,0798 \text{ m}^2/\text{m}$$

Comprimento total dos tubos = $179,2 / 0,0798 = 2246 \text{ m}$

Nº de tubos = $2246 / 4,88\text{m} = 460 \text{ tubos}$

4º estimar o nº de tubos / passagem

deverá ser feito em função da velocidade da água = $1,25 \text{ m/s}$

$$\rho_{\text{agua}} = 1000 \text{ kg/ m}^3$$

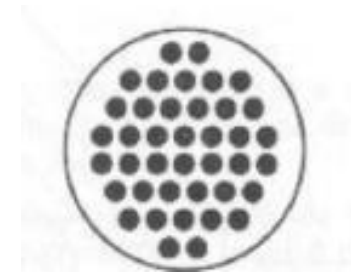
Caudal da água = $51,3 \text{ kg/s} \Rightarrow (51,3/1000) = 0,0513 \text{ m}^3/\text{s}$

A área necessária para dar uma velocidade de $1,25 \text{ m/s} = 0,0513\text{m}^3/1,25 \text{ m} = 0,0410 \text{ m}^2$

$D_i = 21,2 \text{ mm} \Rightarrow \text{área da secção recta para fluxo do tubo} = A = \pi \times (0,0212/2)^2 = 0,000353 \text{ m}^2$

Nº de tubos por passagem = $0,0410/0,000353 = 116$

Nº de passagens = $460/116 = 4$



Método ϵ NTU (“number of heat transfer units”)

Problemas a considerar na análise térmica dos permutadores:

1. Determinação da taxa de transferência de calor (“**Rating**”)
2. Dimensionamento (“**Sizing**”)

“**Rating**” → Determinação da taxa de transferência da temperatura de saída dos fluidos e das perdas de carga num dado permutador (existente ou dimensionado) \Rightarrow conhecer A e as dimensões dos fluidos.)

“**Sizing**” → Determinação da matriz de dimensões necessária para alcançar os requisitos em termos de (i) transferência de calor e de (ii) perdas de carga

Quando as perdas de carga são desprezáveis \Rightarrow

1. “**Rating**” \equiv determinar apenas a taxa de transferência total de calor no permutador
2. **Dimensionamento (“Sizing”)** \equiv determinar a A total necessária para conseguir a taxa de transferência de calor pretendida

Métodos Utilizáveis

- A) Quando se conhecem as temperaturas de entrada e de saída dos 2 fluidos e $U \Rightarrow$ utiliza-se o método $LMTD$ para a resolução dos problemas 1 e 2
- B) Quando se conhecem apenas as temperaturas de entrada dos 2 fluidos, caudais e $U \Rightarrow$ não se pode calcular a $LMTD \Rightarrow$ o método da $LMTD$ só é viável mediante cálculo iterativo que vise satisfazer o requisito:

$$\textit{calor transferido} = \textit{calor recebido}$$

Nestas situações \Rightarrow Método simplificado εNTU ou da eficiência desenvolvido por Kays e London

Método ε NTU (“number of heat transfer units”)

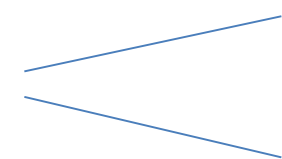
Este método baseia-se no nº adimensional $\varepsilon \Rightarrow$ Eficiência de um permutador

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{m\acute{a}x}} \quad 0 \leq \varepsilon \leq 1 \quad (1)$$

Q – taxa de transferência de calor real

$Q_{m\acute{a}x}$ – taxa de transferência de calor máxima possível de 1 corrente para outra

$Q_{m\acute{a}x}$ = obtido em contra corrente, se ΔT do fluido com o **valor mínimo da capacidade térmica $C = (m \cdot c_p)$** igualar a diferença das temperaturas de entrada dos fluidos quente e frio.

$(m \cdot c_p)_{\min}$ = menor dos 2 valores :  $C_q = (m \cdot c_p)$ (fluido quente)
 $C_f = (m \cdot c_p)$ (fluido frio)

$$Q_{m\acute{a}x} = (m c_p)_{\min} (T_{q,i} - T_{f,i}) \quad (2)$$

$$Q = \varepsilon Q_{m\acute{a}x} = \varepsilon (m c_p)_{\min} (T_{q,i} - T_{f,i}) \quad (3)$$

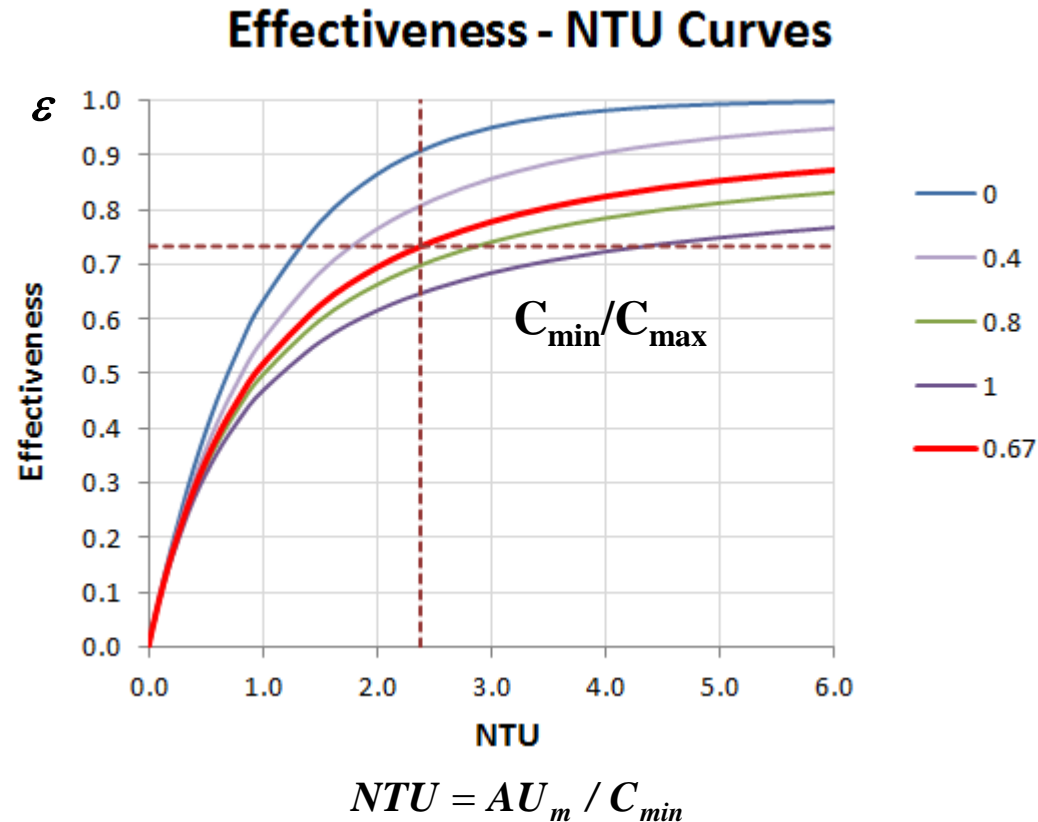
Depende só das temperatura de entrada

Cálculo de ε para os vários tipos de permutadores

Para qualquer permutador

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

$NTU = N^{\circ}$ Adimensional
“number of heat transfer”



$$NTU = AU_m / C_{\min} \quad (4)$$

onde $C_{\min} = (m c_p)_{\min}$

Significado Físico de NTU:

$$NTU = \frac{\text{Capacidade calorífica do permutador, (w/°C)}}{\text{Capacidade calorífica do fluido, (w/°C)}} \quad (5)$$

⇒ Para um dado valor de $U_m/C_{min} \rightarrow NTU = f(A)$ i.e., da dimensão do permutador

$$NTU \uparrow \Rightarrow A \uparrow$$

Significado razão das capacidades térmicas $(C_{min}/C_{máx}) \rightarrow 0$

$$Q = m_q c_{p_q} (T_{q,i} - T_{q,o}) = m_f c_{p_f} (T_{f,o} - T_{f,i}) \quad (6)$$

Das equações (3) e (6)

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}} = \frac{m_q c_{p_q} (T_{q,i} - T_{q,o})}{(m c_p)_{min} (T_{q,i} - T_{f,i})} \quad (7) \quad \text{ou} \quad \varepsilon = \frac{m_f c_{p_f} (T_{f,o} - T_{f,i})}{(m c_p)_{min} (T_{q,i} - T_{f,i})} \quad (8)$$

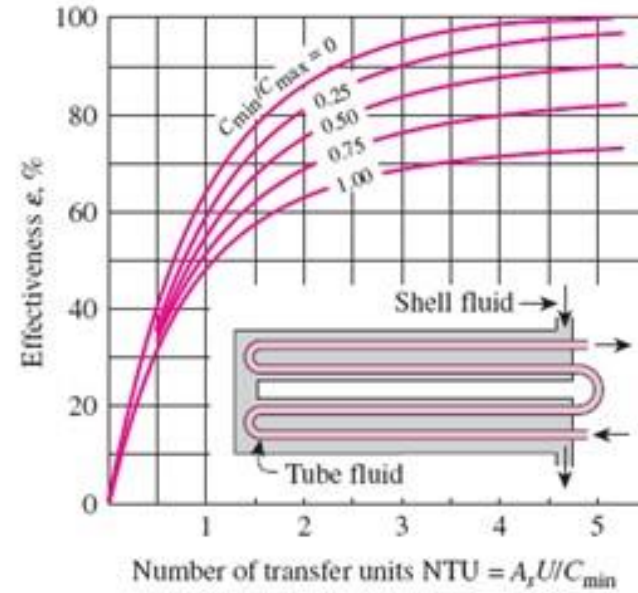
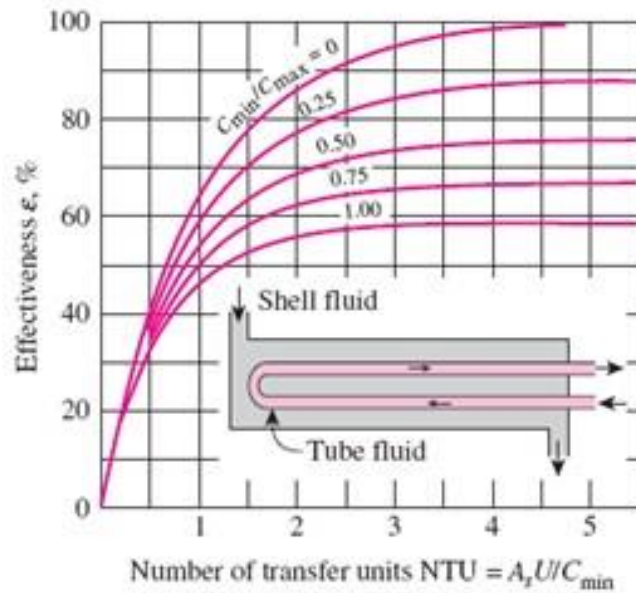
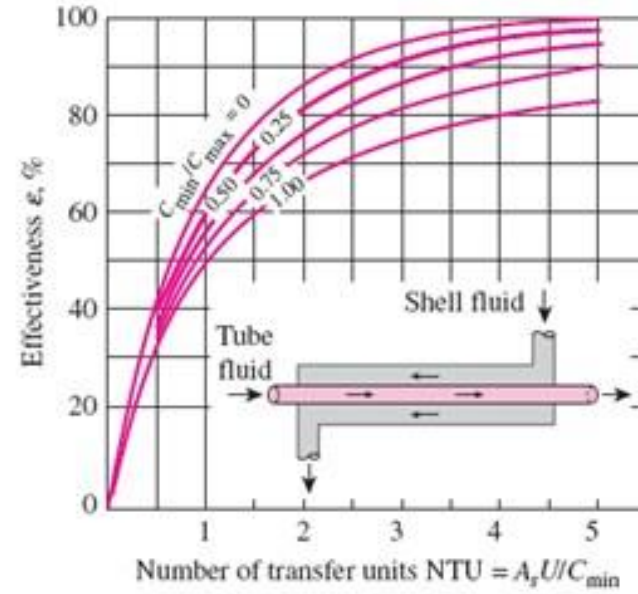
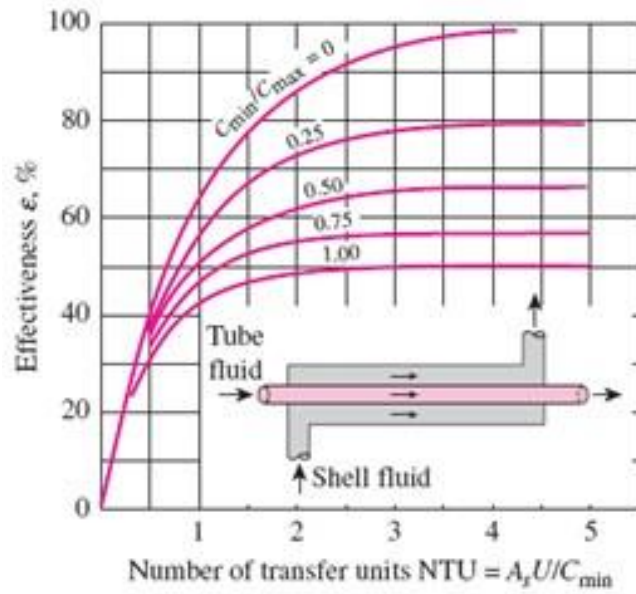
Condensadores e caldeiras (refervedores) $\rightarrow T_{cond, ebul,} = \text{constante}$

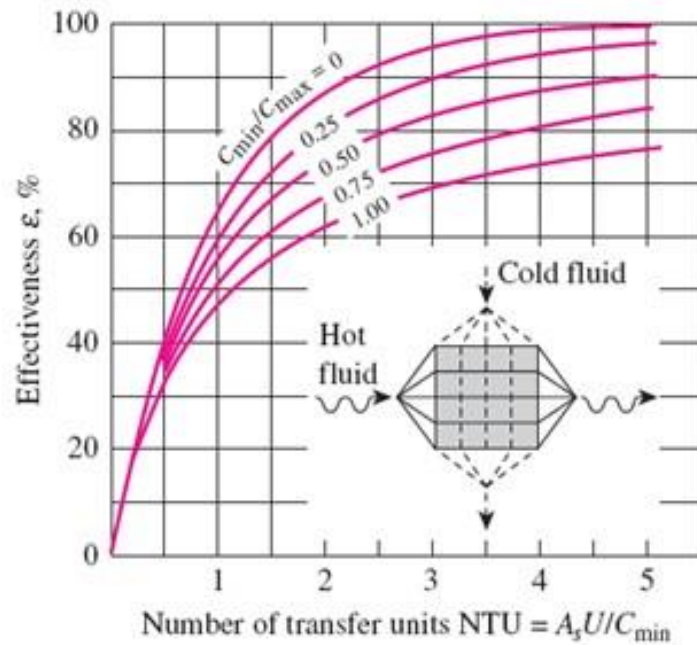
$$\Leftrightarrow T_i - T_0 \approx 0 \Rightarrow \begin{array}{l} C_q = (m_p c_{p_q}) \\ \text{ou} \\ C_f = (m_f c_{p_f}) \end{array} \quad \text{Comportam-se como capacidade calorificas}$$

Condensador e caldeira $\Rightarrow T = \text{constante}$

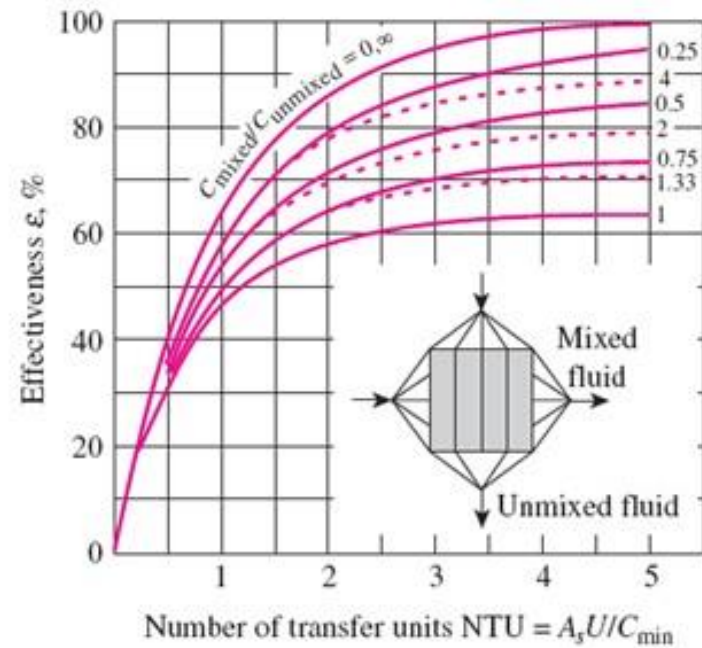
$$\Rightarrow C_{m\acute{a}x} \rightarrow \infty$$

$$C = \frac{C_{min}}{C_{m\acute{a}x}} \rightarrow 0$$





(e) Cross-flow with both fluids unmixed

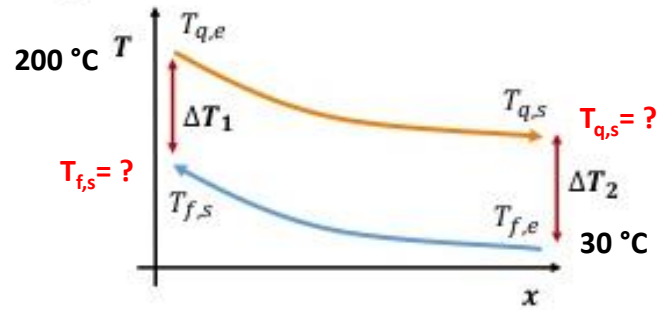


(f) Cross-flow with one fluid mixed and the other unmixed

FIGURE 11-26
Effectiveness for heat exchangers.

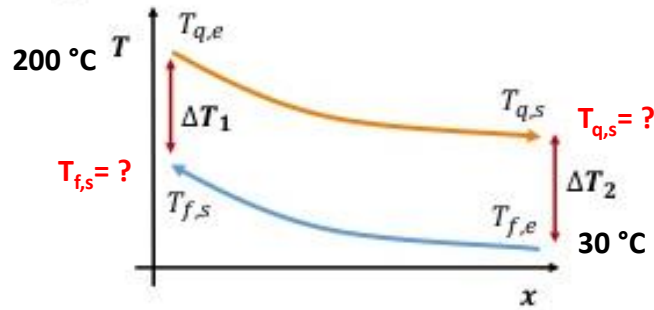
Exercício 10.

Um permutador tubular com fluxo em contra-corrente é utilizado para aquecer água com gases de escape quente. O gás quente ($c_p = 1050 \text{ J}/(\text{kg } ^\circ\text{C})$) entra a $T = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ e com um caudal de $m = 2,5 \text{ kg/s}$, enquanto a água entra a $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ e circula com um caudal de $m = 1,5 \text{ kg/s}$. O coeficiente global de transferência de calor $U = 150 \text{ W}/(\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C})$ e a área de transferência $A = 17,5 \text{ m}^2$. Calcule a taxa total de transferência de calor e as temperaturas de saída do gás de escape e da água.



Exercício 10.

Um permutador tubular com fluxo em contra-corrente é utilizado para aquecer água com gases de escape quente. O gás quente ($c_p = 1050 \text{ J/(kg } ^\circ\text{C)}$) entra a $T = 200 \text{ } ^\circ\text{C}$ e com um caudal de $m = 2,5 \text{ kg/s}$, enquanto a água entra a $T = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$ e circula com um caudal de $m = 1,5 \text{ kg/s}$. O coeficiente global de transferência de calor $U = 150 \text{ W/(m}^2\text{ } ^\circ\text{C)}$ e a área de transferência $A = 17,5 \text{ m}^2$. Calcule a taxa total de transferência de calor e as temperaturas de saída do gás de escape e da água.



$$C_q = m_q c_{pq} = 2,5 \times 1050 = 2625 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

$$C_f = m_f c_{pf} = 1,5 \times 4180 = 6270 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

$$\frac{C_{min}}{C_{max}} = \frac{2625}{6270} \Rightarrow \frac{C_{min}}{C_{max}} = 0,42$$

$$NTU = \frac{AU_m}{C_{min}} = \frac{17,5 \times 150}{2625} = 1$$

$$c_p = 4180 \text{ J/kg K}$$

$$Q = \varepsilon Q_{max} = \varepsilon C_{min} (T_{qe} - T_{fe})$$

$$\varepsilon \approx 0,58$$

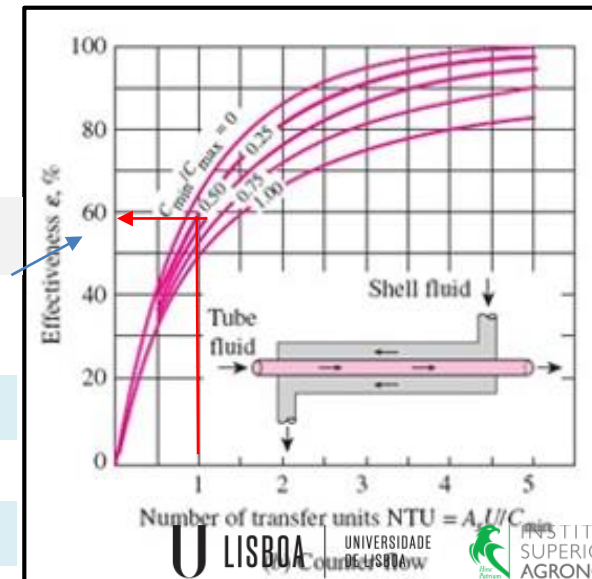
$$Q = 0,58 \times 2625 (200 - 30) = 258\,825 \text{ W}$$

$$Q = mc_p \Delta T \quad T_{q,s} = ? \quad 258\,825 = 2625(200 - T_{q,s})$$

$$T_{q,s} = 101,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{De modo análogo, } T_{f,s} = ? \quad 258\,825 = 6270(T_{f,s} - 30)$$

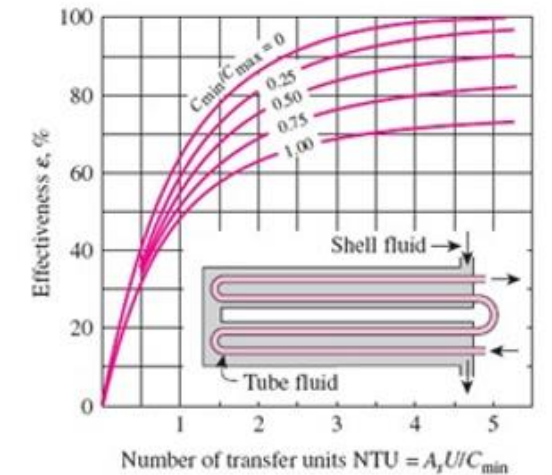
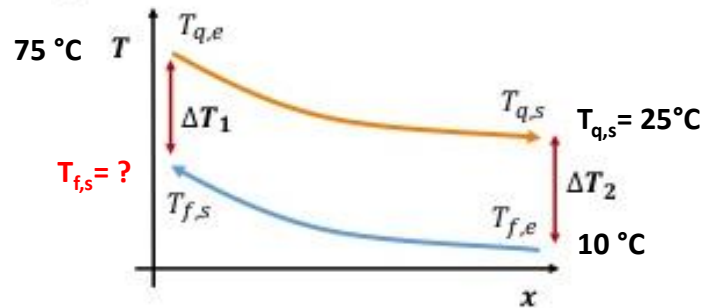
$$T_{f,s} = 71,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$



Exercício 11.

Num permutador de invólucro e tubos 2:4 (4 passagens nos tubos e 2 passagens no invólucro) é utilizado para arrefecer água dos $T = 75\text{ °C}$ até aos $T = 25\text{ °C}$ que circula nos tubos com um caudal de $m = 5\text{ kg/s}$. No exterior dos tubos circula água fria que entra a $T = 10\text{ °C}$ com um caudal de 6 kg/s . O coeficiente global de transferência de calor $U = 750\text{ W/(m}^2\text{°C)}$. Calcular a área de transferência necessária, e a temperatura de saída da água de arrefecimento.

Utilizar o método da eficiência.



$$c_p = 4180\text{ J/kg K da água}$$

$$\left. \begin{aligned} C_q &= m_q c_{pq} = 5 \times 4180 = 20900\text{ W/°C} \\ C_f &= m_f c_{pf} = 6 \times 4180 = 25080\text{ W/°C} \end{aligned} \right\} \frac{C_{min}}{C_{max}} = \frac{20900}{25080} = \frac{C_{min}}{C_{max}} = 0,83$$

$$Q = m_q c_{pq} (T_{qe} - T_{qs}) = 5 \times 4180 (75 - 25) = 1045000\text{ W}$$

Exercício 11.

Num permutador de invólucro e tubos 2:4 (4 passagens nos tubos e 2 passagens no invólucro) é utilizado para arrefecer água dos $T = 75\text{ °C}$ até aos $T = 25\text{ °C}$ que circula nos tubos com um caudal de $m = 5\text{ kg/s}$. No exterior dos tubos circula água fria que entra a $T = 10\text{ °C}$ com um caudal de 6 kg/s . O coeficiente global de transferência de calor $U = 750\text{ W/(m}^2\text{°C)}$. Calcular a área de transferência necessária, e a temperatura de saída da água de arrefecimento.

Utilizar o método da eficiência.

$$Q = m_q c_{pq} (T_{qe} - T_{qs}) = 5 \times 4180 (75 - 25) = 1045000\text{ W}$$

$$Q = \varepsilon Q_{max} = \varepsilon C_{min} (T_{qe} - T_{fe})$$

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}} = \frac{Q}{C_{min} (T_{qe} - T_{fe})} = \frac{1045000}{20900 \times (75 - 10)} = 0,77$$

$$NTU = \frac{AU_m}{C_{min}} = 4,5$$

$$A = (NTU \times C_{min}) / U_m$$

$$A = (4,5 \times 20900) / 750 = 125,4\text{ m}^2$$

$T_{f,s} = ?$

$$Q = m_f c_{pf} (T_{fs} - T_{fe}) = 6 \times 4180 (T_{fs} - 10) = 1045000\text{ W}$$

$$T_{f,s} = 51,7\text{ °C}$$

