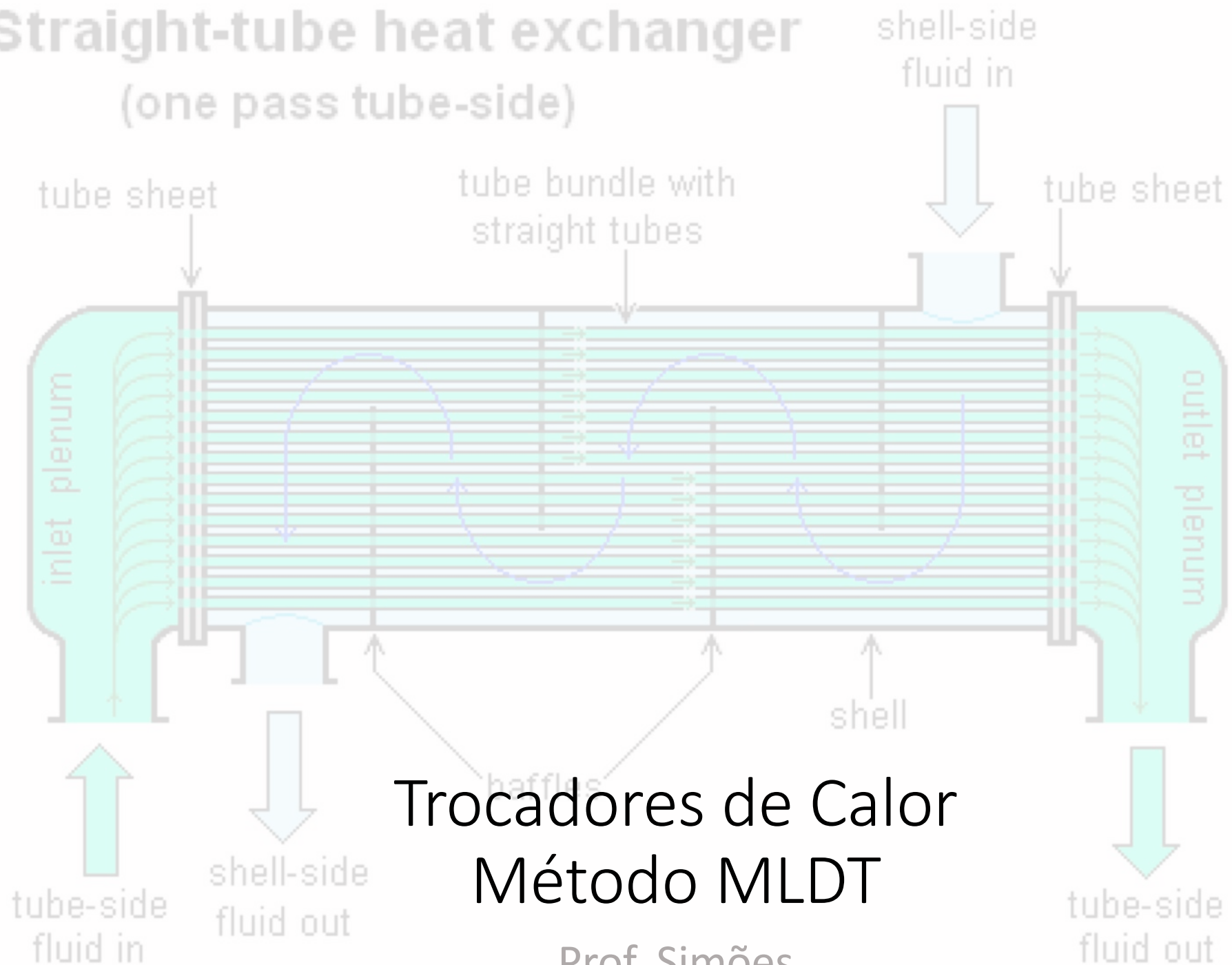


Straight-tube heat exchanger (one pass tube-side)



Trocadores de Calor
Método MLDT

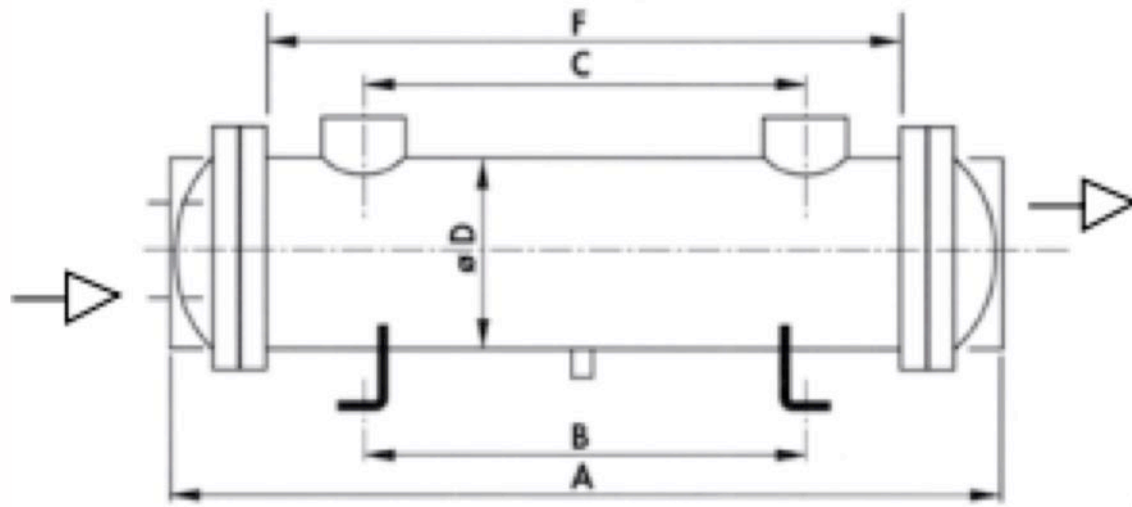
Prof. Simões

Objetivos

- Identificar como se classificam os trocadores
- Identificar os elementos necessários para o dimensionamento de um trocador
- Entender o que é Média Logarítmica de Diferenças de Temperatura
- Rever as equações térmicas da termodinâmica
- Entender o que é o coeficiente global de transmissão de calor
- Dimensionar um trocador de calor pela metodologia MLDT

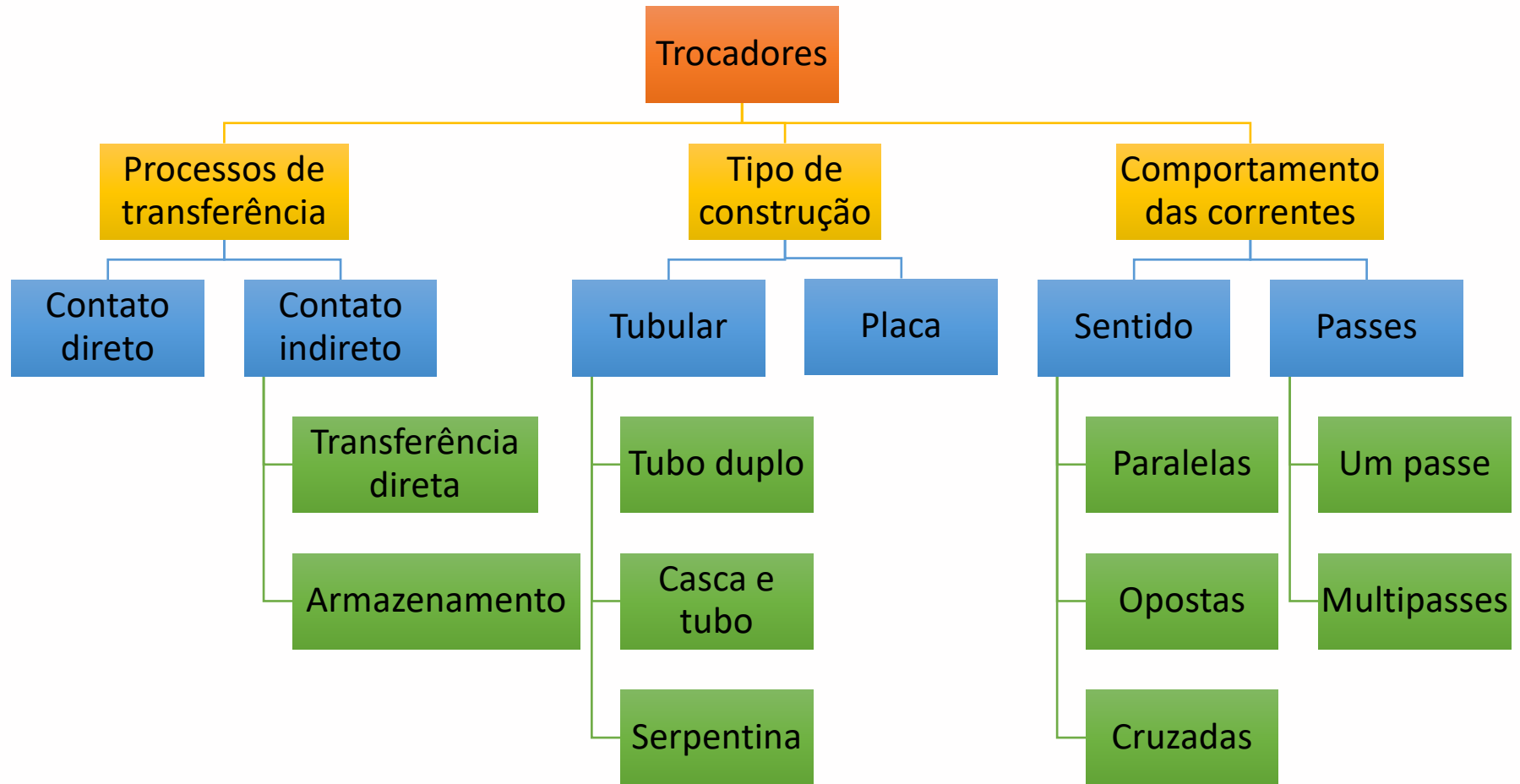
Problema típico

- Uma coluna de fracionamento produz benzeno no estado de vapor saturado a 80°C . É necessário condensar e sub-resfriar cerca de 3630 kg/h de benzeno até uma temperatura de 46°C , usando água a 13°C como refrigerante, a uma vazão mássica de 18.148 kg/h . Dimensione e compare a área necessária no trocador de calor tipo casca e tubo de um passe de fluxo paralelo e de fluxo inverso, considerando nos dois casos um coeficiente global de troca de calor de $1135\text{ W/m}^2\text{K}$.

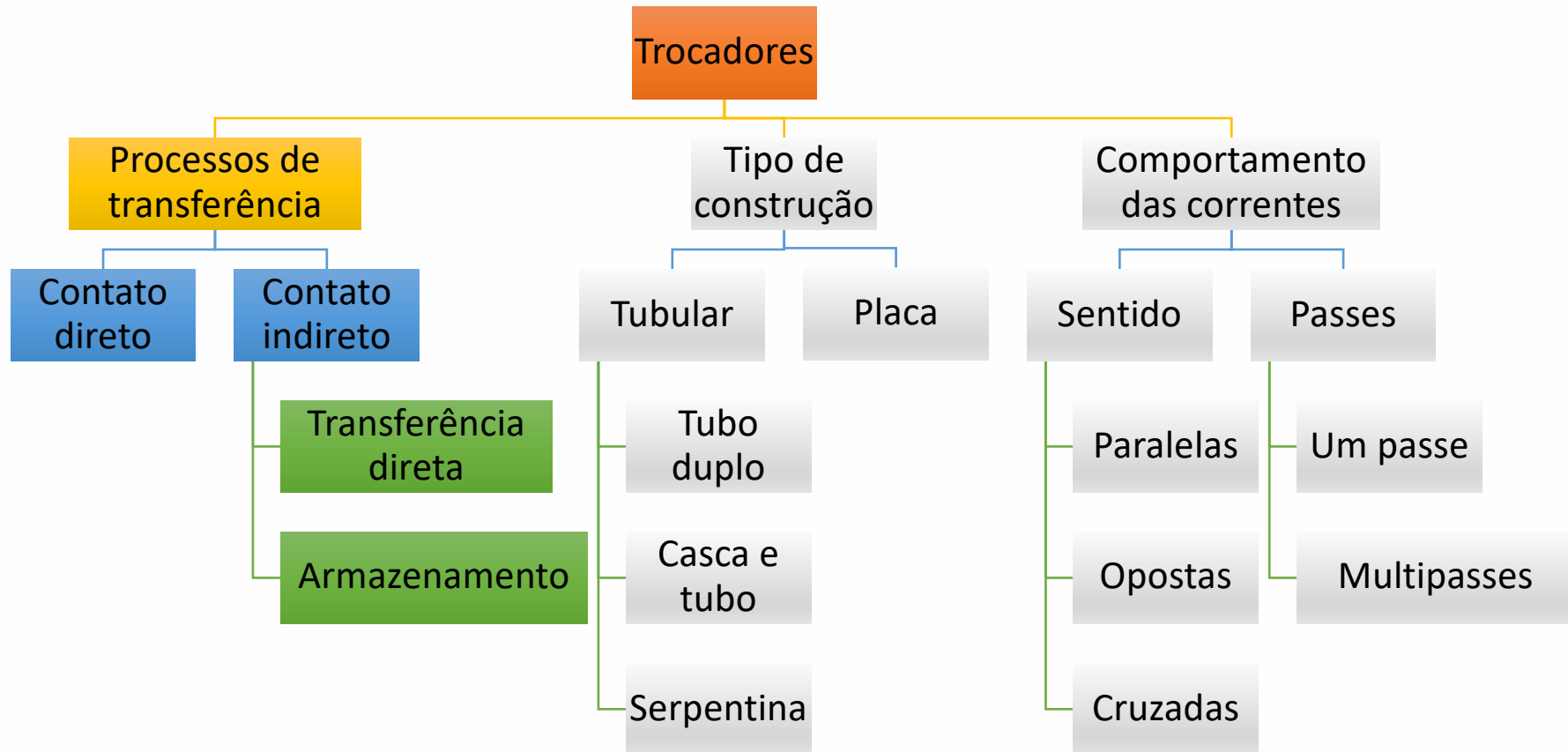


Modelo TA	Área de Troca (m ²)	Vazão Óleo l/min. min./max.
30-2-2	0,54	16/58
50-2-1	0,90	21/70
50-3-2	1,25	30/115
75-3-1	1,87	38/130
50-4-2	2,52	50/180
75-4-1	3,78	62/200

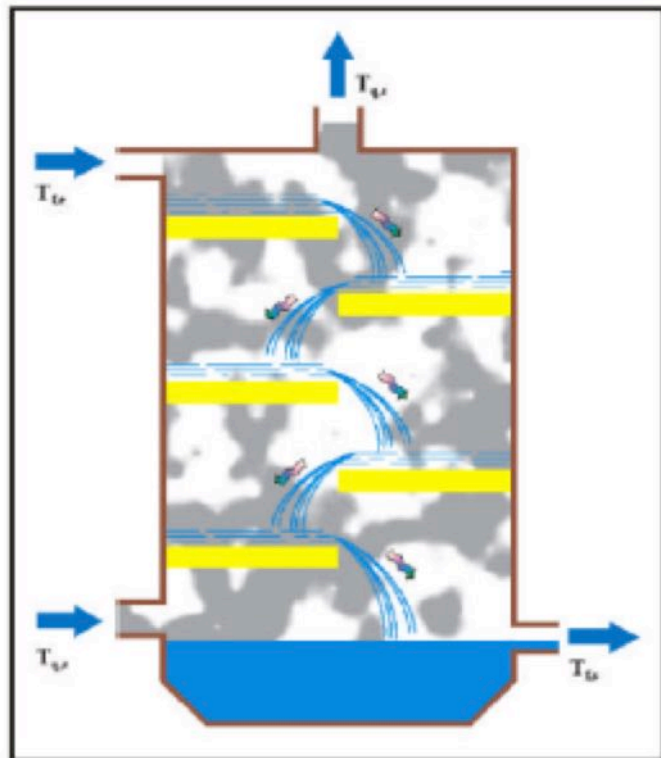
Classificação dos trocadores



Classificação por processos de transferência



Contato: direto



- Os dois fluidos ficam em contato
- Há transferência de calor e massa
- Construção relativamente barata
- Alta taxa de transferência de calor
- Temperaturas próximas ao ambiente
- Materiais não nocivos (ar, água)

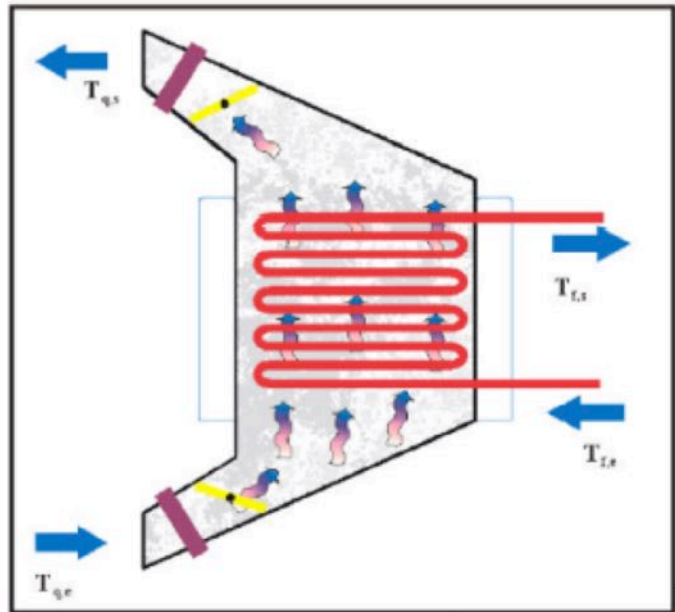
Processos de
transferência

Exemplo:
torres de
resfriamento



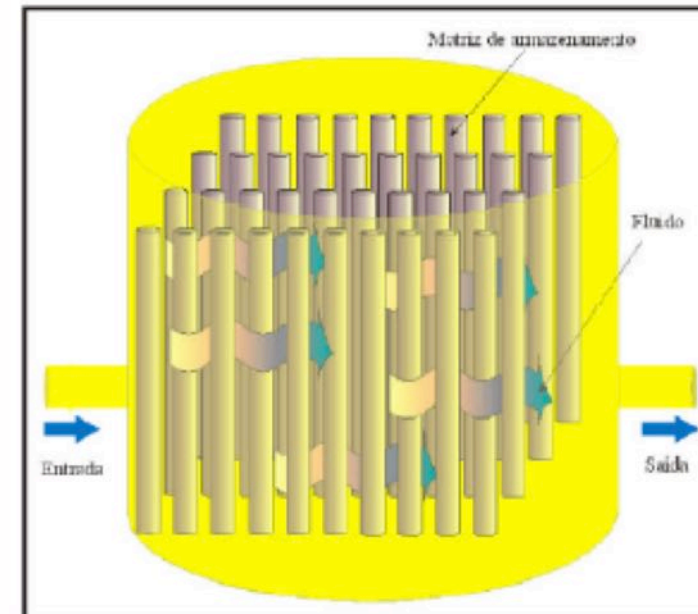
Contato: indireto

Transferência direta



- Os dois fluidos são separados
- Há transferência apenas de calor
- Também chamados de recuperadores

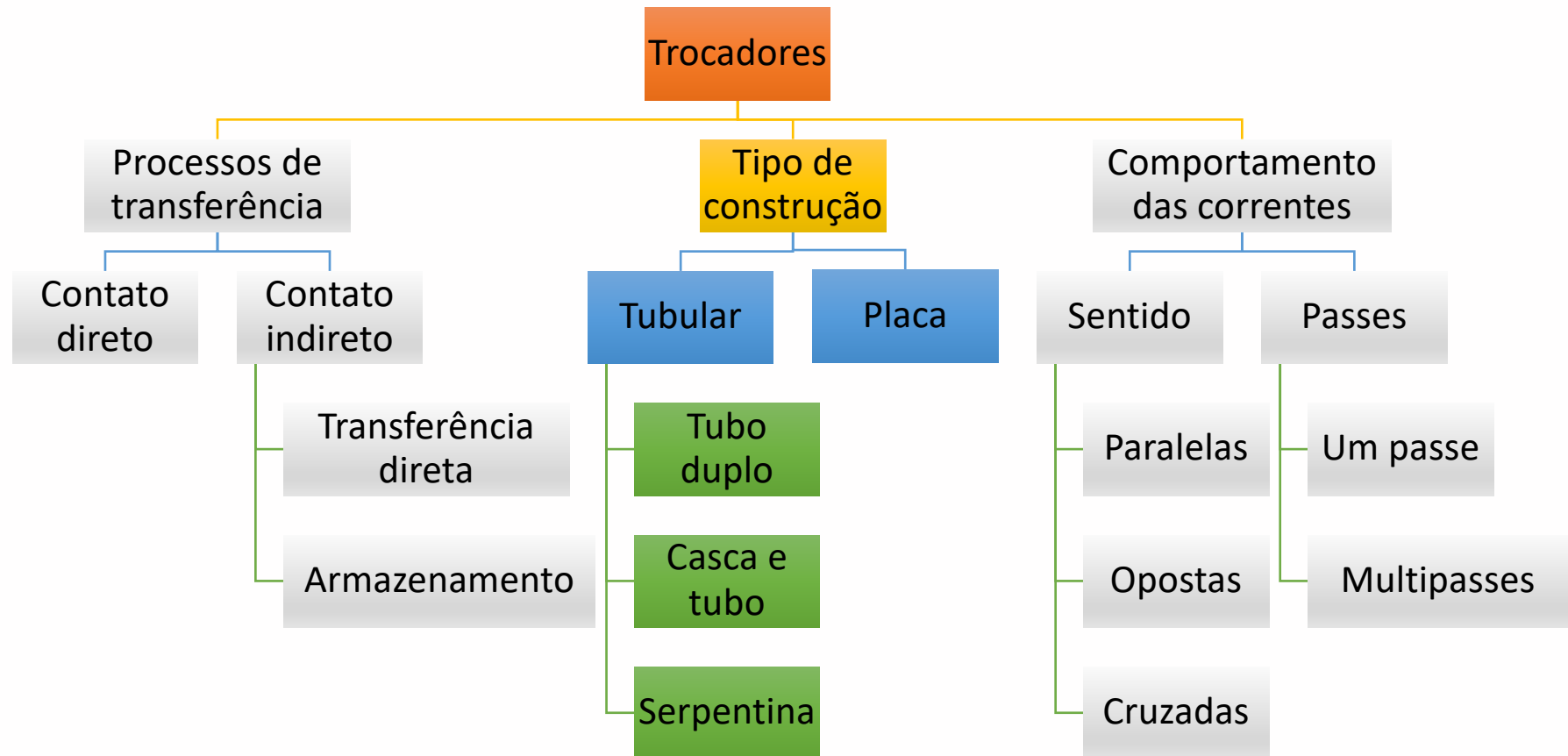
Armazenamento



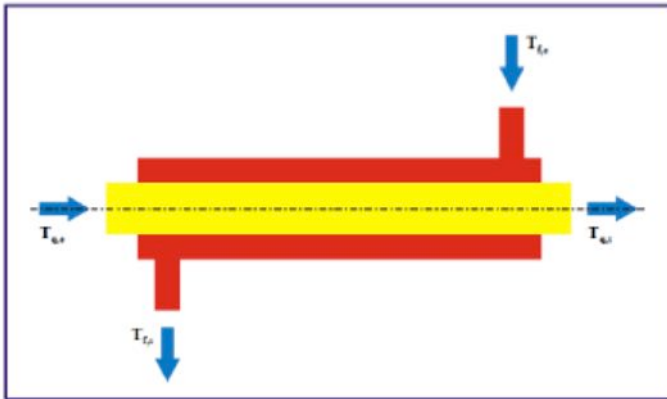
- O mesmo fluido alternativamente armazena e retira calor da matriz

Processos de
transferência

Classificação por tipo de construção



Construção: tubular



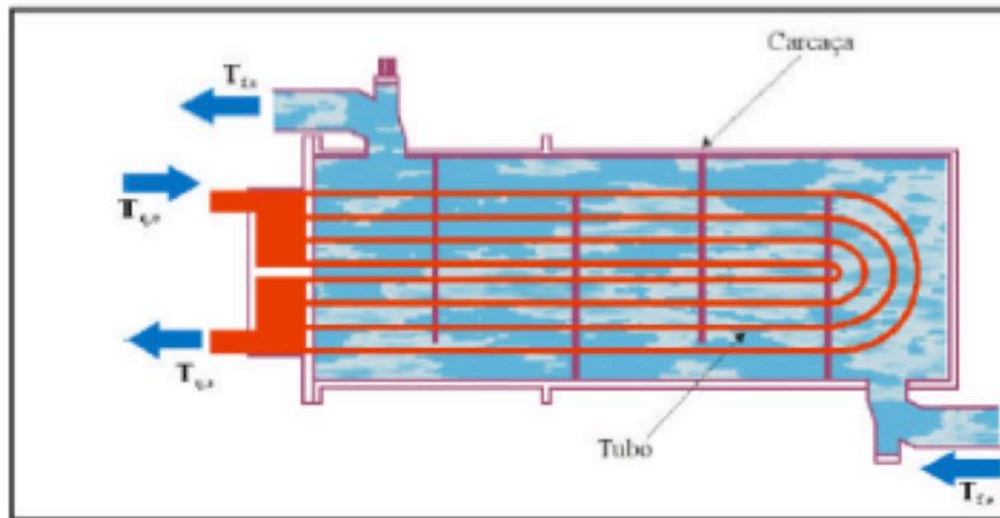
Tubo duplo

- Simples
- Pequena capacidade



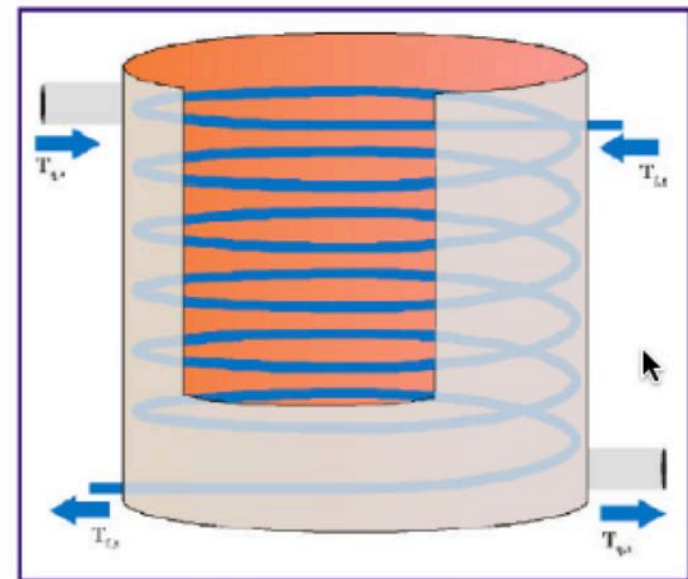
Casca e tubo (shell and tube)

- Mais usado
- Ampla gama de temperaturas
- Vários tipos de fluidos



Serpentina

- Boa área de troca
- Limpeza difícil



Construção: tubular



Serpentina



Tubo aletado

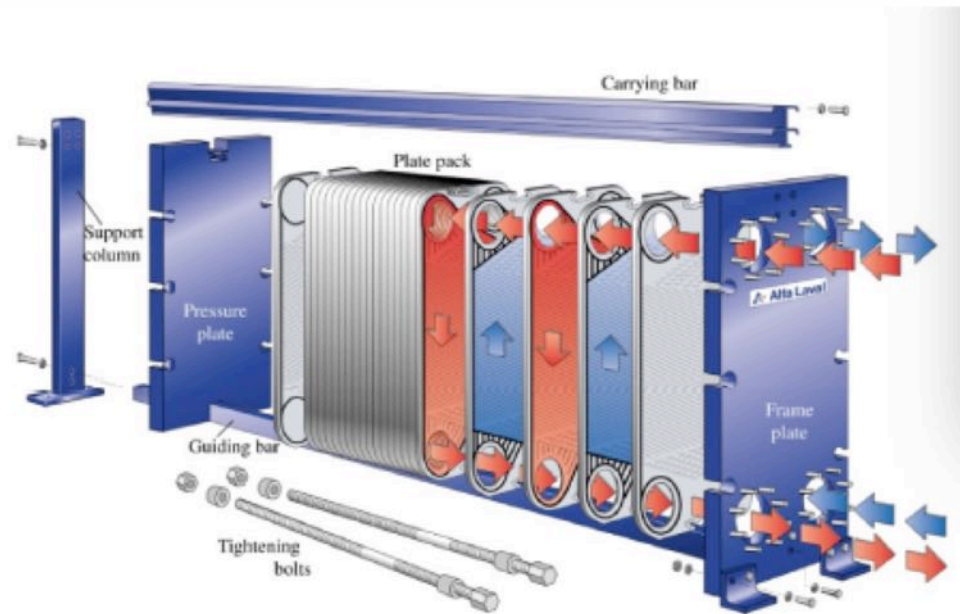


Tubo duplo



Casca e tubo

Construção: placas

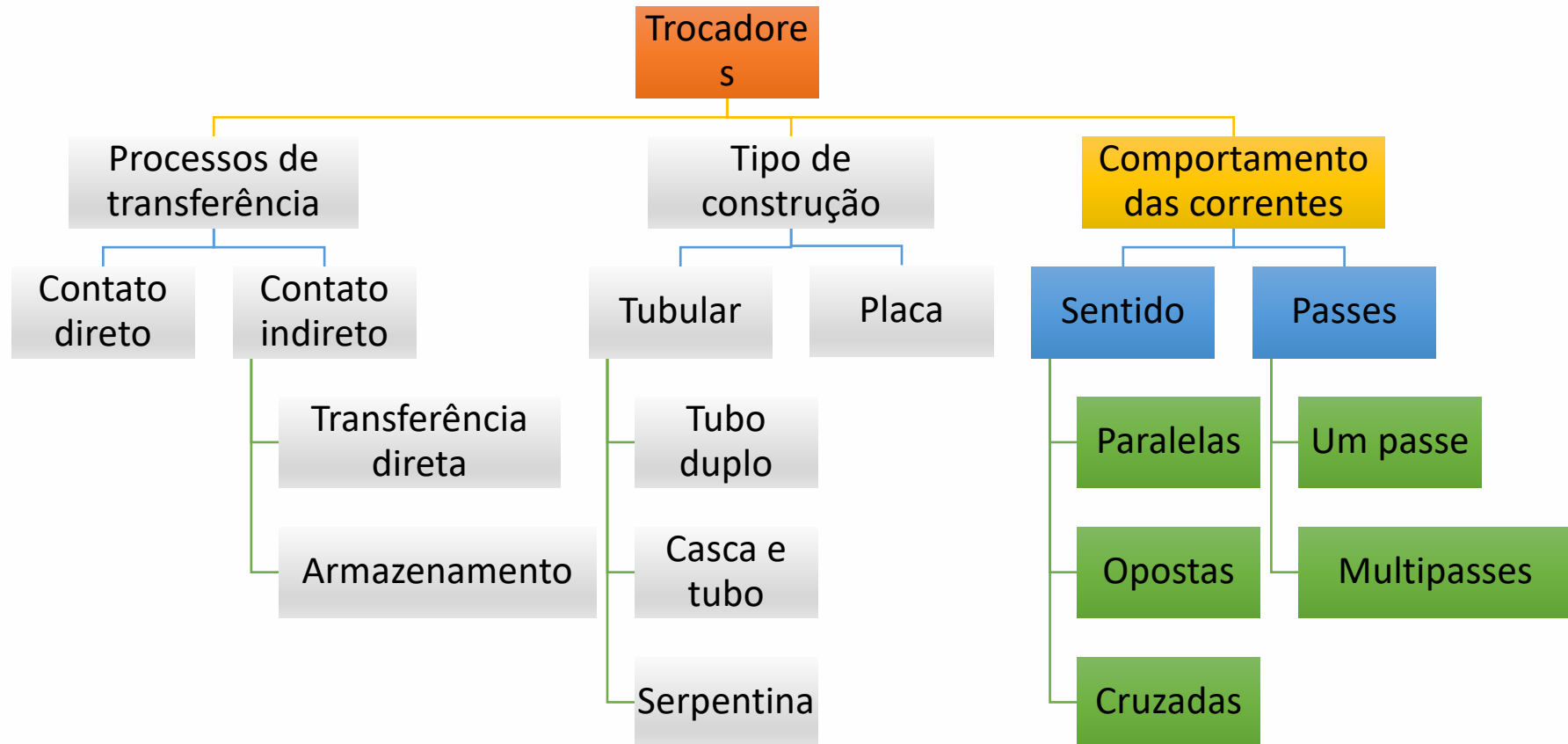


- Placas podem ser lisas ou onduladas
- Grande área de contato
- Compactos
- Aplicações de baixa pressão

Tipo de construção

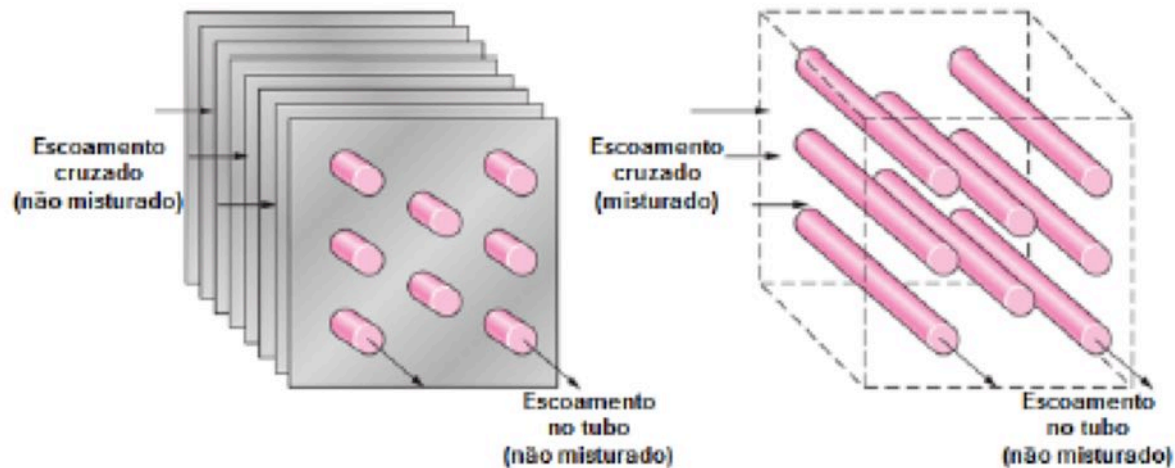
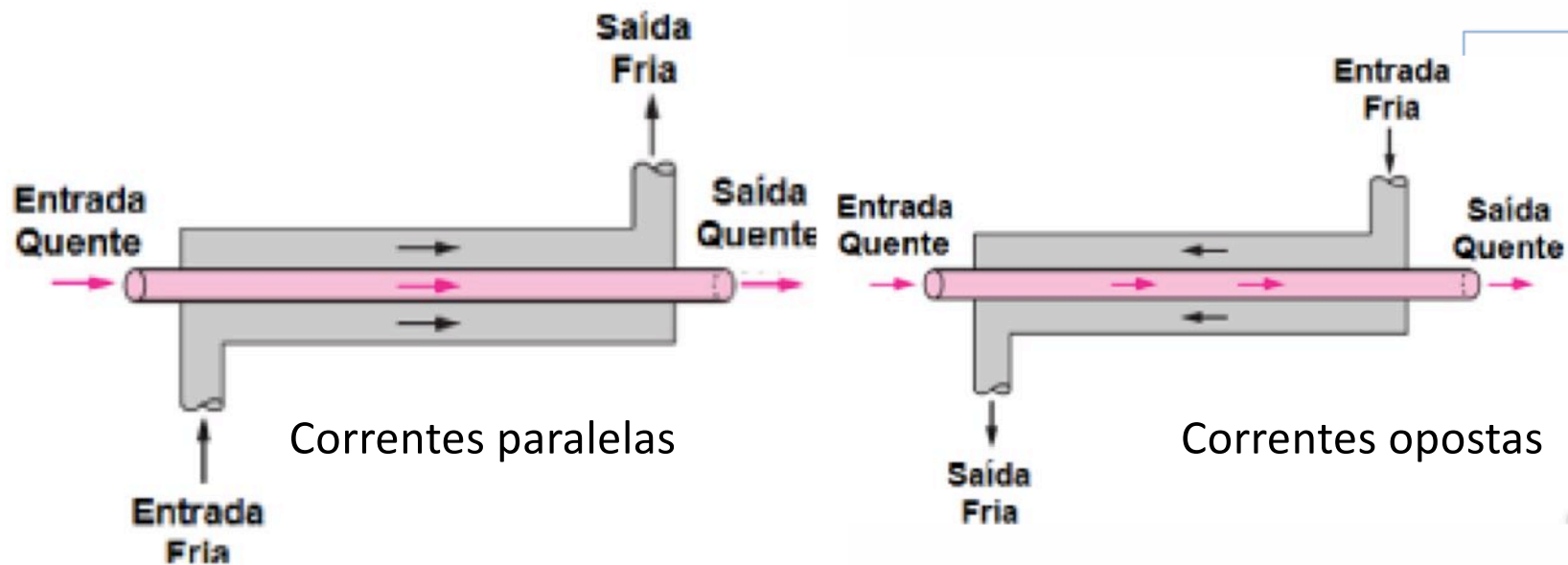


Classificação pelo comportamento da corrente



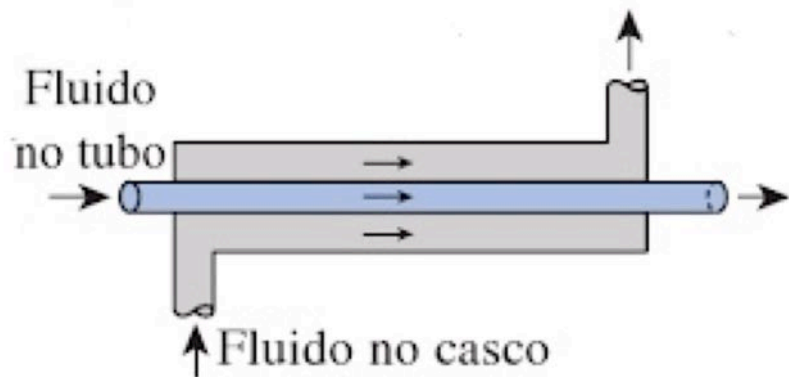
Corrente: direção e sentido

Comportamento das correntes

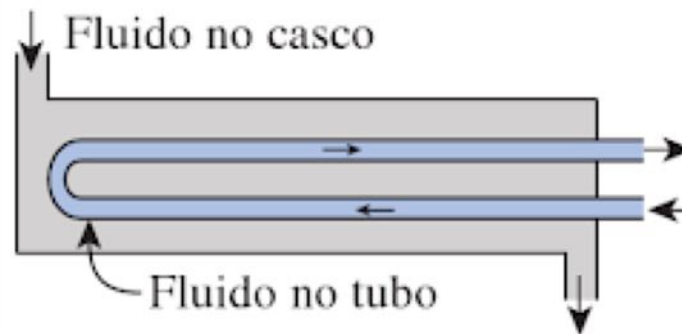


Correntes cruzadas

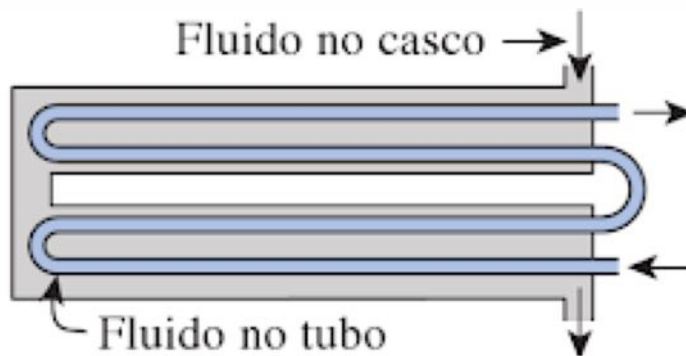
Corrente: número de passes



Um passe no casco
Um passe no tubo

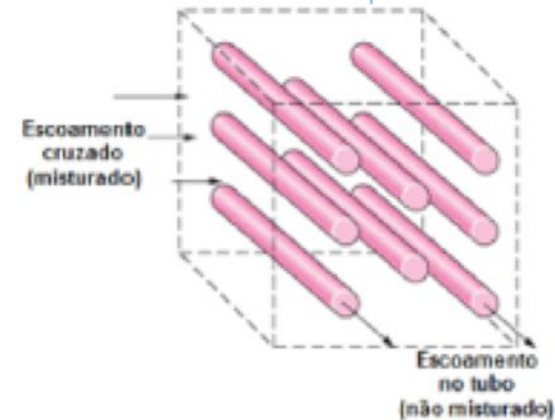


Um passe no casco
Dois ou múltiplos de dois passes no tubo

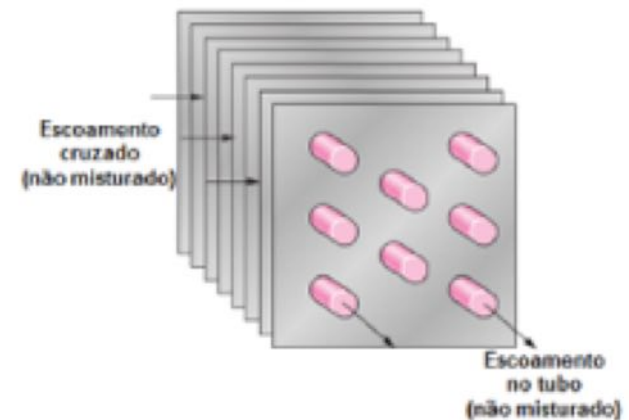


Dois ou múltiplos de dois passes no casco e no tubo

Comportamento das correntes



Cruzado, misturado no casco



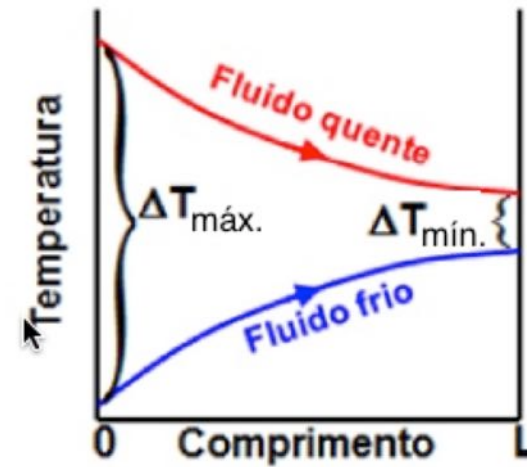
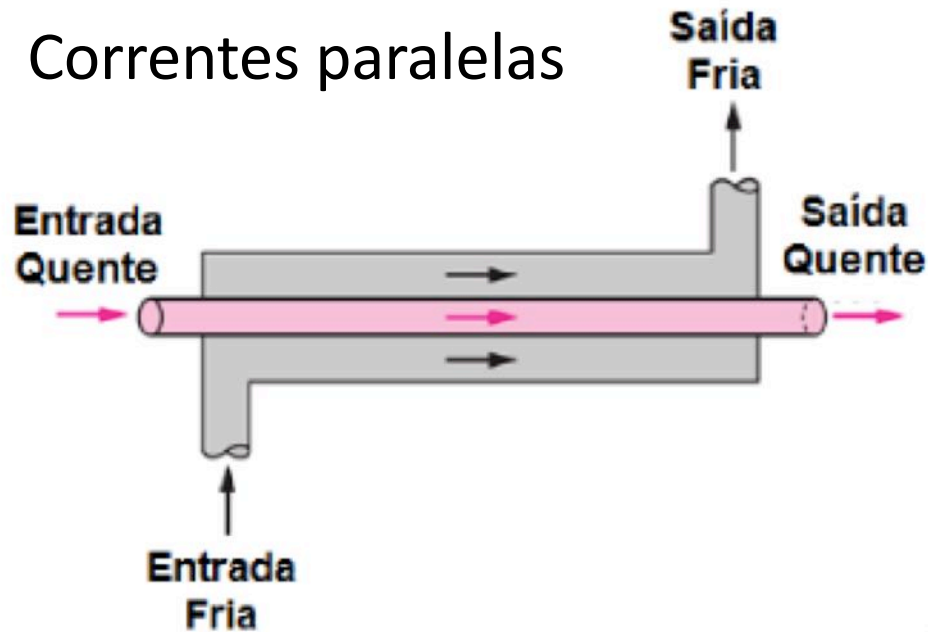
Cruzado, não misturado no casco

Cálculo de trocadores de calor

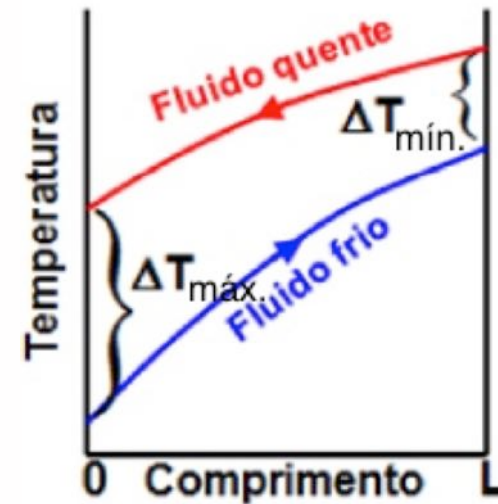
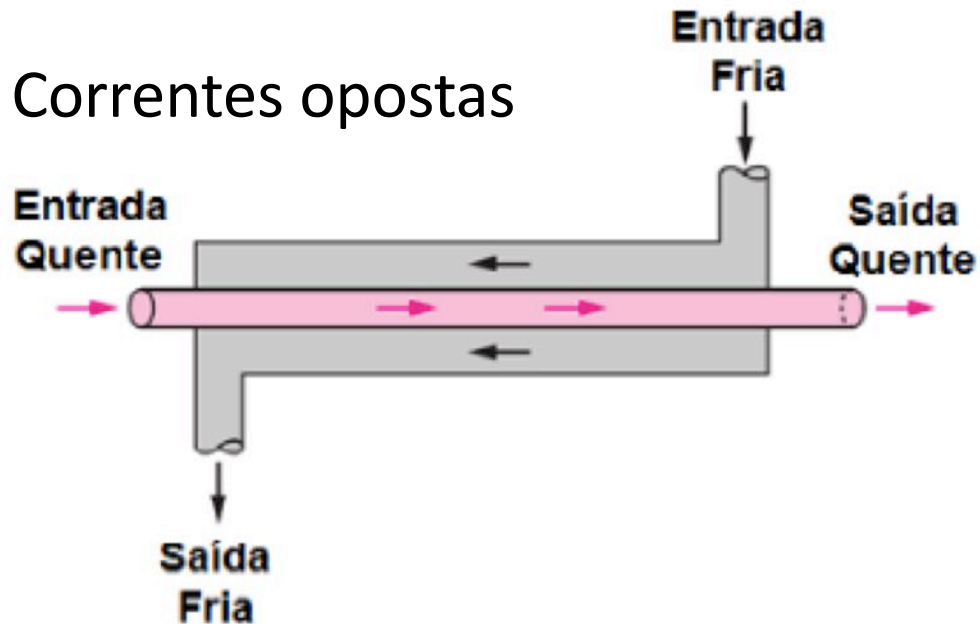
- Nesse tema veremos trocadores de calor de contato indireto.
- Existem dois métodos para o cálculo:
 - MLDT – é o método que leva em conta a **Média Logarítmica das Diferenças de Temperatura**
 - Indicado quando as temperaturas são conhecidas ou podem ser determinadas
 - NTU – **Número de Unidades de Transferência**
 - Aplicado quando o MLDT exige muitas interações
- Primeiro será visto o método MLDT para um passe no tubo e no casco.
- Depois será feita a correção caso vários passes forem usados.

Variação da temperatura sem mudança de estado

- Correntes paralelas



- Correntes opostas



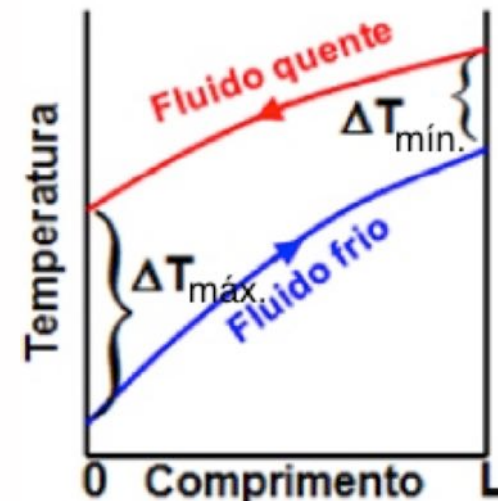
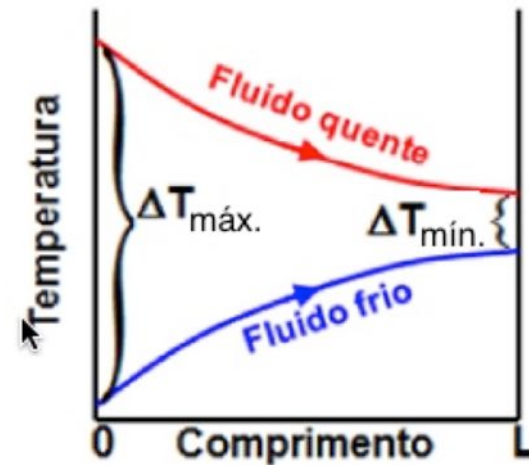
Média logarítmica das diferenças de temperatura

- Nos dois casos, a variação de temperatura não é linear, mas será dada pela Média Logarítmica das Diferenças de Temperatura (MLDT):

$$MLDT = \frac{\Delta T_{m\acute{a}x} - \Delta T_{m\acute{i}n}}{\ln \frac{\Delta T_{m\acute{a}x}}{\Delta T_{m\acute{i}n}}}$$

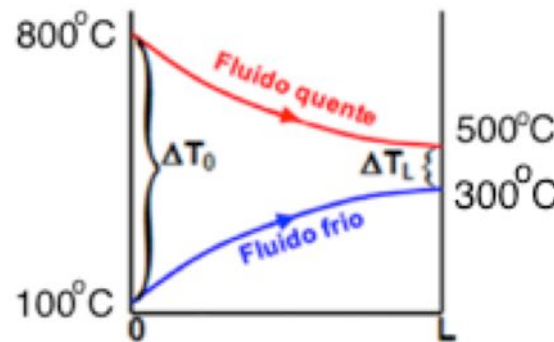
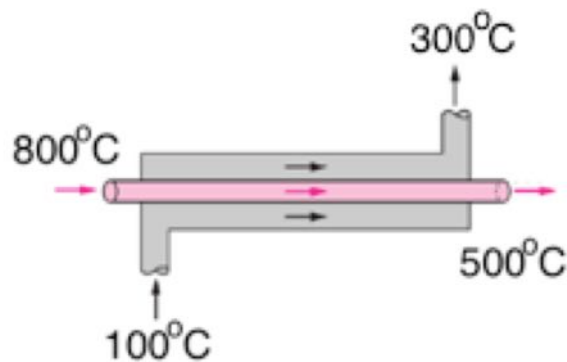
No caso dos trocadores de correntes opostas, pode ocorrer que $\Delta T_{m\acute{a}x} = \Delta T_{m\acute{i}n}$, o que torna inviável a fórmula acima. Nesses casos, usar a diferença entre as médias aritméticas:

$$\Delta T_{m\acute{e}dia} = \frac{T_{qe} + T_{qs}}{2} - \frac{T_{fe} + T_{fs}}{2}$$



Exemplo

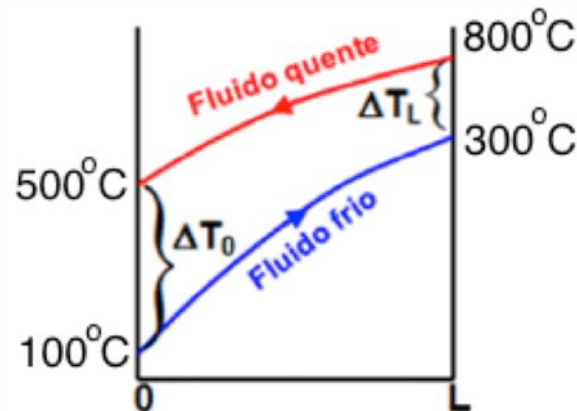
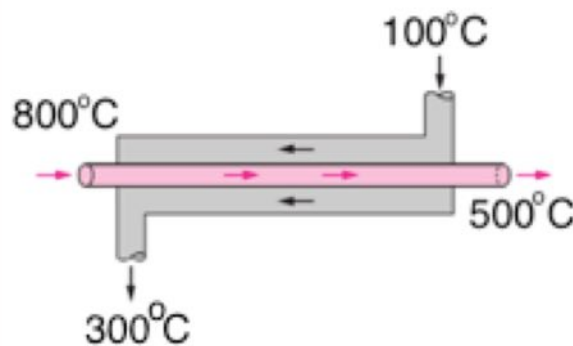
Num trocador de calor de um passe o fluido quente entra a 800°C e sai a 500°C e o fluido frio entra a 100°C e sai a 300°C. Calcule a MLDT considerando (a) correntes paralelas e (b) correntes opostas.



$$\Delta T_{m\acute{a}x} = 700^{\circ}C$$

$$\Delta T_{m\acute{i}n} = 200^{\circ}C$$

$$MLDT = \frac{700 - 200}{\ln \frac{700}{200}} = 399^{\circ}C$$



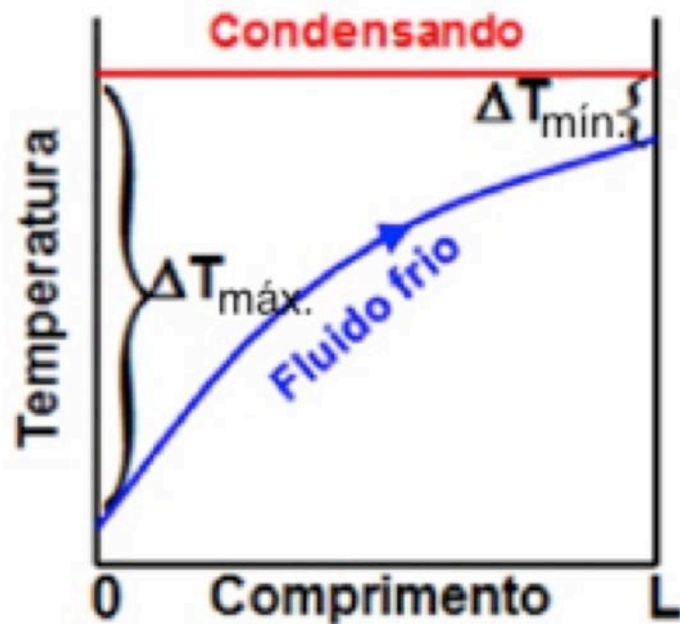
$$\Delta T_{m\acute{a}x} = 500^{\circ}C$$

$$\Delta T_{m\acute{i}n} = 400^{\circ}C$$

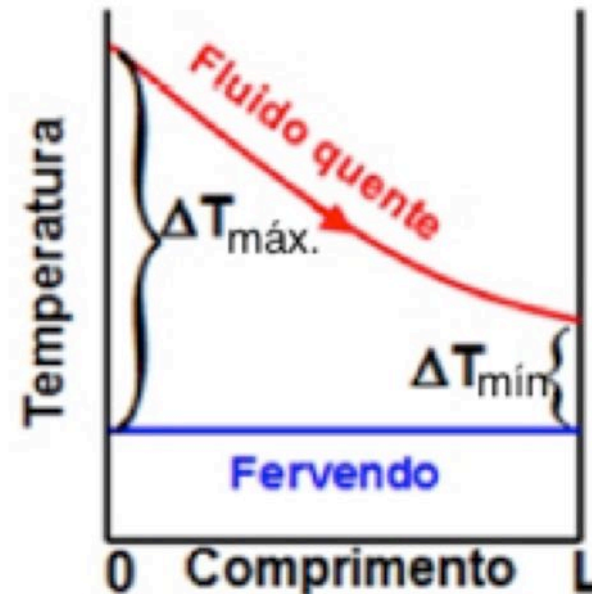
$$MLDT = \frac{500 - 400}{\ln \frac{500}{400}} = 448^{\circ}C$$

Troca com mudança de estado

- Durante a mudança de estado, não há alteração da temperatura
- Há troca de calor (latente)



Condensação



Vaporização

Correção da MLDT

- Para trocadores com mais de um passe no casco ou no tubo, ou de correntes cruzadas, a MLDT deve ser corrigida por um fator F .
- Esse fator de correção F depende de dois outros fatores, R e P :

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \qquad P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$$

- Onde:

$T_1 \Rightarrow$ Temperatura de entrada no casco

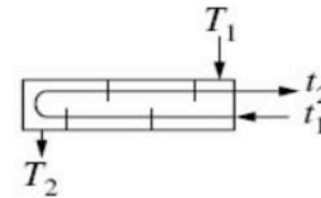
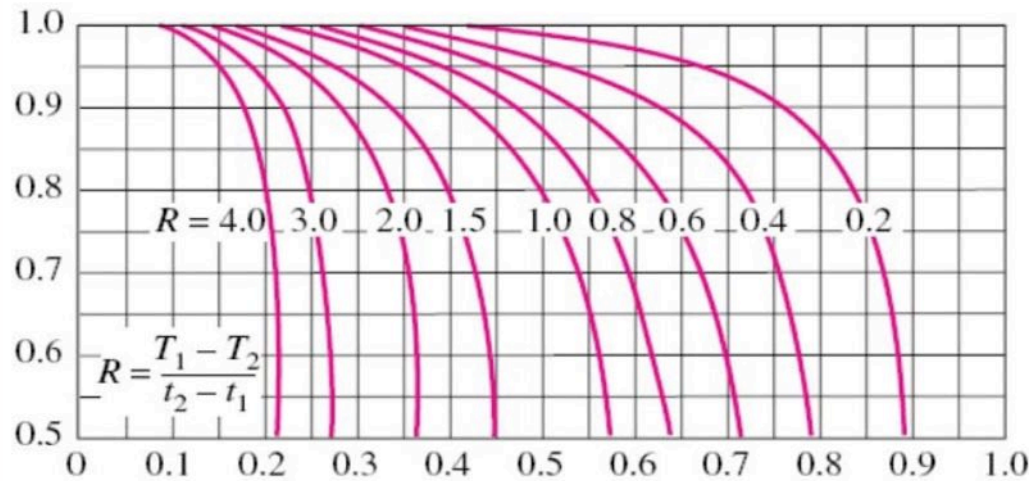
$T_2 \Rightarrow$ Temperatura de saída do casco

$t_1 \Rightarrow$ temperatura de entrada no tubo

$t_2 \Rightarrow$ temperatura de saída do tubo

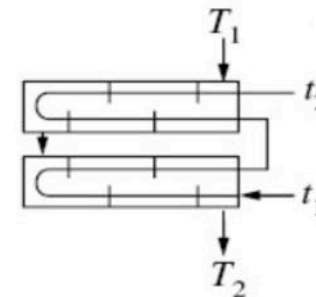
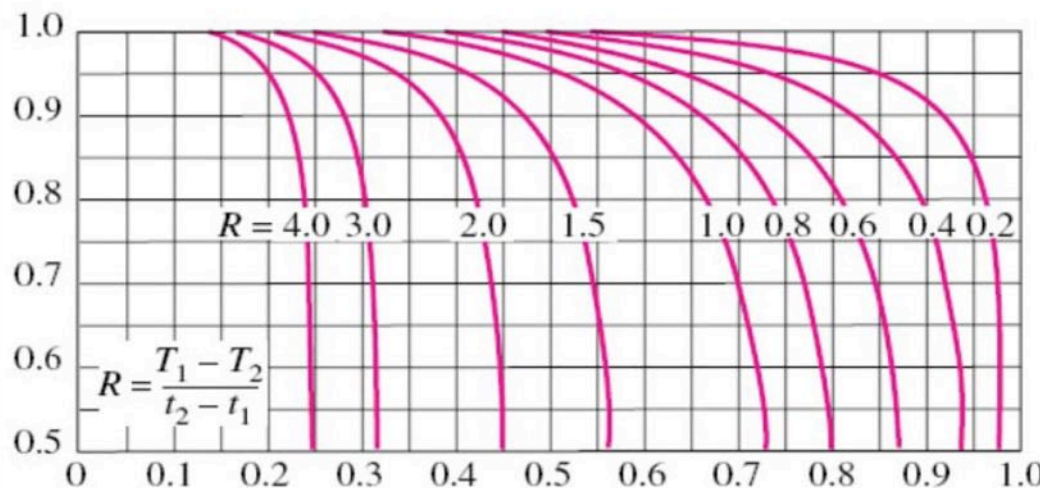
Correção da MLDT

- Com os valores de P (no eixo x) e R (curva), entramos no gráfico respectivo para obter F (no eixo y):



Um passe no casco e números pares de passes nos tubos.

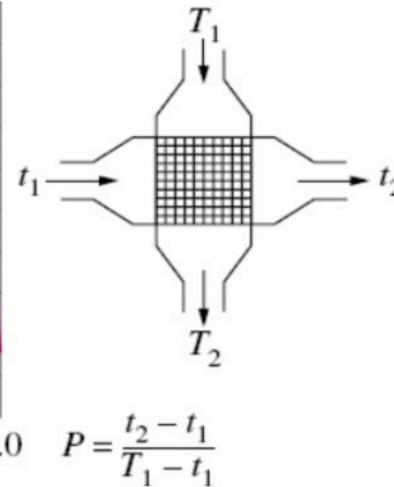
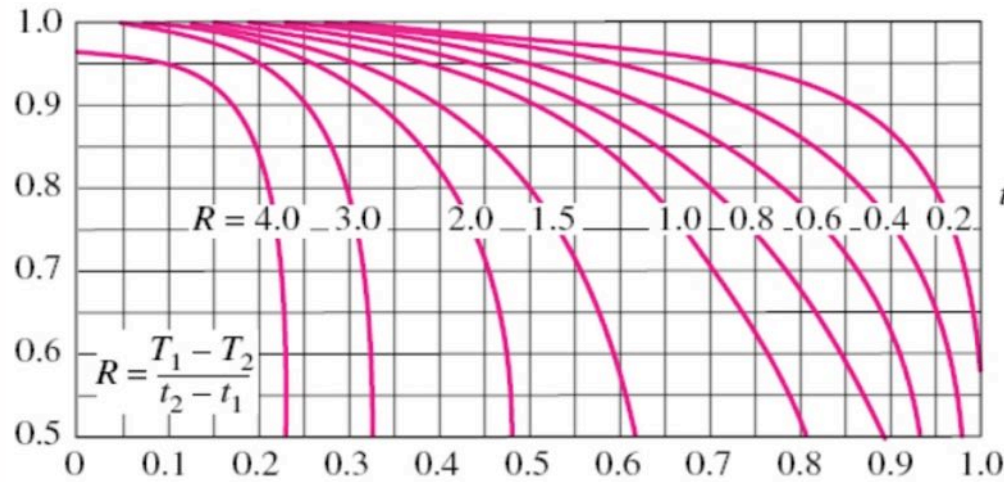
$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$$



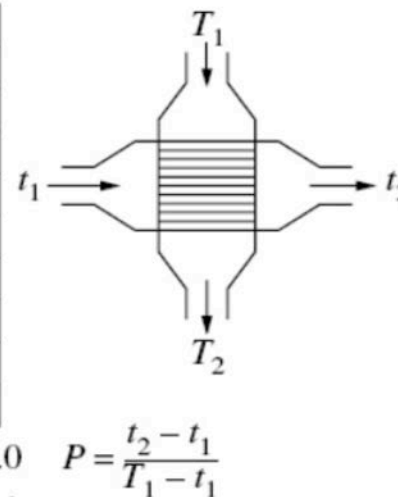
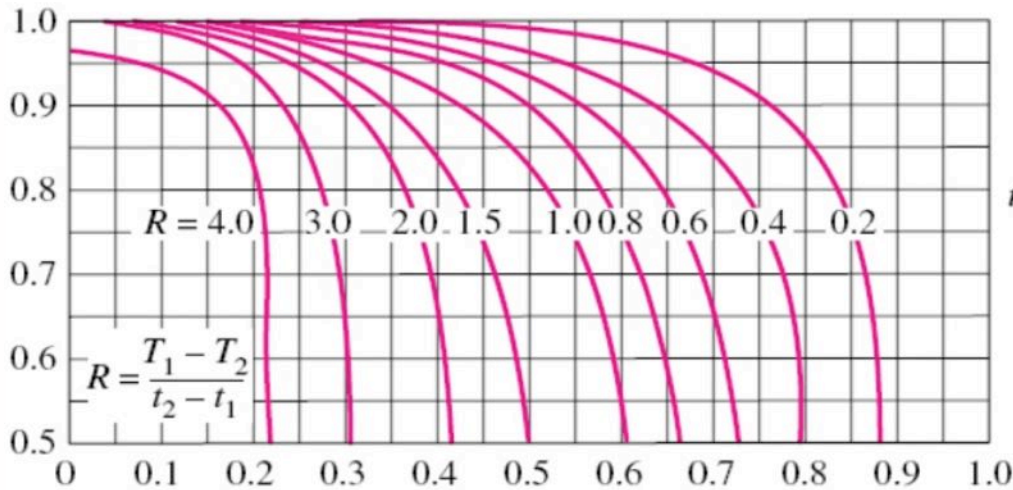
Dois passes no casco e números pares de passes nos tubos.

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

Correção da MLDT



Passe único,
fluido no casco
misturado



Passe único,
fluido no casco
não misturado

Correção do MLDT

- Com o fator F , corrigimos a $MLDT$ fazendo:

$$MLDT_{corrigida} = F \cdot MLDT$$

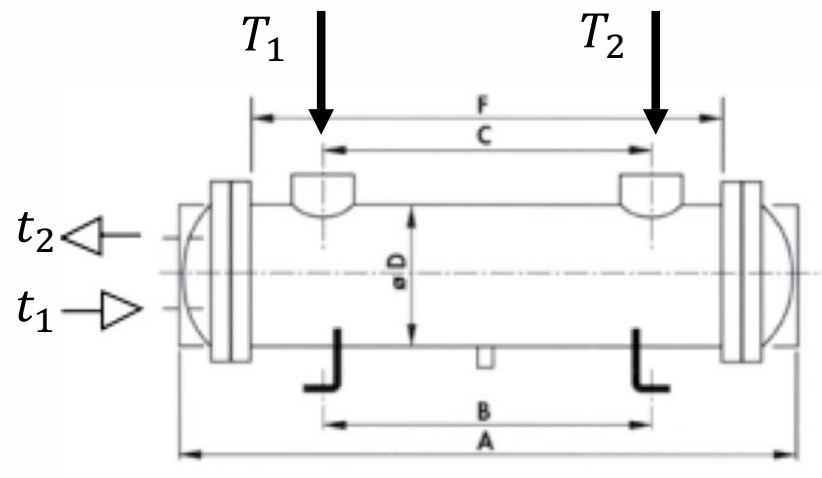
- Exemplo: As temperaturas de um trocador são as informadas abaixo. Calcule a $MLDT$ e a $MLDT_{corrigida}$.

$$T_1 = 10^{\circ}\text{C}$$

$$T_2 = 36,2^{\circ}\text{C}$$

$$t_1 = 65,6^{\circ}\text{C}$$

$$t_2 = 39,4^{\circ}\text{C}$$



Resolução

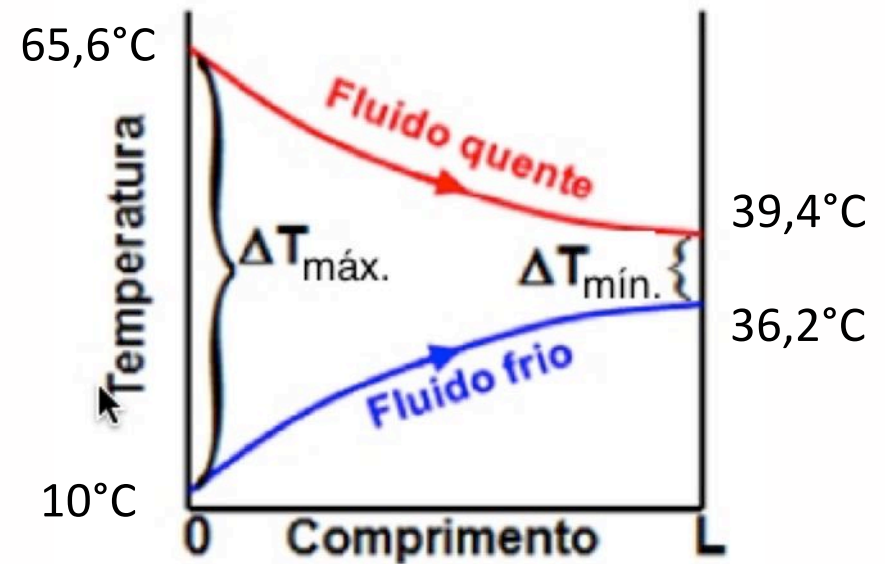
- MLDT

$$\Delta T_{m\acute{a}x} = 65,6 - 10 = 55,6^{\circ}C$$

$$\Delta T_{m\acute{i}n} = 39,4 - 36,2 = 3,2^{\circ}C$$

$$MLDT = \frac{\Delta T_{m\acute{a}x} - \Delta T_{m\acute{i}n}}{\ln \frac{\Delta T_{m\acute{a}x}}{\Delta T_{m\acute{i}n}}}$$

$$MLDT = \frac{55,6 - 3,2}{\ln \frac{55,6}{3,2}} \Rightarrow MLDT = 18,4^{\circ}C$$



$$T_1 = 10^{\circ}C$$

$$T_2 = 36,2^{\circ}C$$

$$t_1 = 65,6^{\circ}C$$

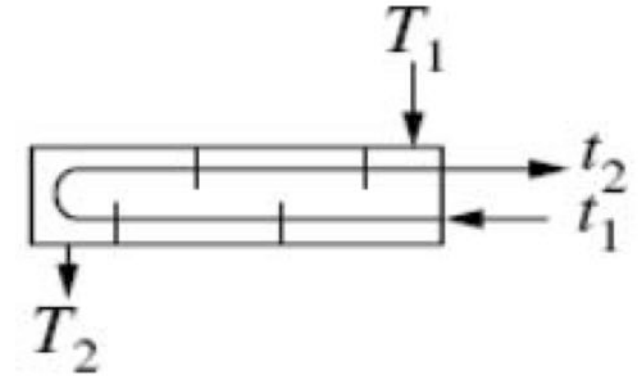
$$t_2 = 39,4^{\circ}C$$

Resolução

- MLDT corrigida

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \Rightarrow R = \frac{10 - 36,2}{39,4 - 65,6} \Rightarrow R = 1,0$$

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \Rightarrow P = \frac{39,4 - 65,6}{10 - 65,6} \Rightarrow P = 0,47$$



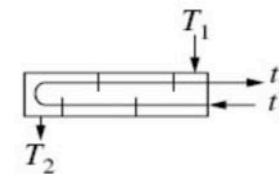
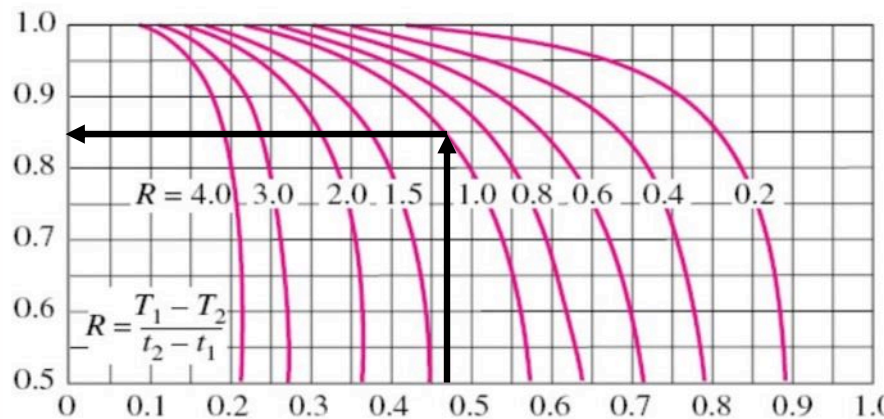
$$T_1 = 10^{\circ}\text{C}$$

$$T_2 = 36,2^{\circ}\text{C}$$

$$t_1 = 65,6^{\circ}\text{C}$$

$$t_2 = 39,4^{\circ}\text{C}$$

$$F = 0,85$$



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

$$MLDT_{corrigida} = F \cdot MLDT = 0,85 \cdot 18,4 \Rightarrow MLDT_{corrigida} = 15,6^{\circ}\text{C}$$

Balanço térmico no trocador (calor sensível)

- Da termodinâmica temos que, sem mudança de estado físico, a quantidade de calor é:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

Essa fórmula expressa quanto calor (em joules) é necessário para variar a temperatura de um corpo.

- No trocador de calor, teremos:
 - O fluido quente cede calor

$$\dot{q}_{cedido} = \dot{m}_q \cdot c_q \cdot (T_{eq} - T_{sq})$$

- O fluido frio recebe calor

$$\dot{q}_{recebido} = \dot{m}_f \cdot c_f \cdot (T_{sf} - T_{ef})$$

Essas fórmulas expressam o fluxo de calor (em J/s ou W) necessário para alterar a temperatura de um fluxo de massa (kg/s)

- No balanço térmico, teremos:

$$\dot{q}_{cedido} = \dot{q}_{recebido} = \dot{q}$$

Balanço térmico no trocador (calor latente)

- Caso haja mudança de estado físico (condensação, vaporização), o corpo (ou fluxo de massa) absorverá ou cederá calor, mas sua temperatura não se altera.
- A quantidade de calor necessária para alterar o estado físico de um corpo é:

$$Q = m \cdot L$$

$$\dot{q} = \dot{m} \cdot L$$

Onde

$L = \text{calor latente de mudança de estado} \left(\frac{J}{kg} \right)$

- Exemplos: vapor passando para estado líquido (condensação); água passando para o estado de vapor (vaporização).

Exemplo

- O calor latente de vaporização da água é $2,256 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$. Uma vazão de vapor saturado de 5600 kg/h precisa ser condensada. Qual o fluxo de calor necessário para esse processo?

$$\dot{m} = \frac{5600}{3600} \Rightarrow \dot{m} = 15,6 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{q} = \dot{m} \cdot L$$

$$\dot{q} = 15,6 \cdot 2,256 \cdot 10^6 \Rightarrow \dot{q} = 3,52 \cdot 10^7 \frac{\text{J}}{\text{s}}$$

Coeficiente global de transferência de calor

- Lembramos que o fluxo de calor total pode ser expresso por:

$$\dot{q} = \frac{\Delta T}{R_T} \quad \text{Onde:} \quad R_T = \frac{1}{A_i h_i} + \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2 \cdot k \cdot \pi \cdot L} + \frac{1}{A_e h_e}$$

- No caso do trocador, as paredes dos tubos são finas. Assim, sua resistência térmica pode ser desprezada e $A_i \cong A_e$. Com isso, temos:

$$\dot{q} = \frac{\Delta T}{\frac{1}{A_e h_i} + \frac{1}{A_e h_e}} \Rightarrow \dot{q} = \frac{A_e \cdot \Delta T}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e}} \Rightarrow \dot{q} = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e}} \cdot A_e \cdot \Delta T$$

- Chamamos U o coeficiente global de troca de calor:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e}} \quad \text{ou} \quad \frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} \quad \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

Coeficiente global de troca de calor

- Alguns valores típicos

Tipo de trocador de calor	U , W/m ² ·K
Água-água	850–1.700
Água-óleo	100–350
Água-gasolina ou querosene	300–1.000
Aquecedores de água de alimentação	1.000–8.500
Vapor-óleo combustível leve	200–400
Vapor-óleo combustível pesado	50–200
Condensador de vapor	1.000–6.000
Condensador de freon (resfriado a água)	300–1.000
Condensador de amônia (resfriado a água)	800–1.400
Condensadores de álcool (resfriado a água)	250–700
Gás-gás	10–40
Água-ar em tubos aletados (água nos tubos)	30–60 [†]
	400–850 [‡]
Vapor-ar em tubos aletados (vapor tubos)	30–300 [†]
	400–4.000 [‡]

[†] Com base na superfície do lado do ar.

[‡] Com base na superfície do lado da água ou do vapor.

Tranferência de Calor e Massa

Por Yunus A. Çengel, Afshin J. Ghajar

Fator de fuligem (*fouling factor*)

- Com o tempo, é comum haver depósitos de sedimentos, formação de algas, etc, nas paredes do trocador, que podem ter um impacto importante na sua eficiência
- Adota-se, portanto, um Fator de Fuligem F (não confundir com o fator de correção da MLDT) a ser acrescentado na resistência ao fluxo de calor



Fator de fuligem

- Quando considerado, a resistência térmica total será:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + F}$$

Exemplo: suponha $h_i = 2000 \frac{W}{m^2 K}$ e $h_e = 1000 \frac{W}{m^2 K}$, e calcule U sem e com fuligem de água acima de $50^\circ C$.

$$U_{sem} = \frac{1}{\frac{1}{2000} + \frac{1}{1000}} = 667 \frac{W}{m^2 K}$$

$$U_{sem} = \frac{1}{\frac{1}{2000} + \frac{1}{1000} + 0,002} = 333 \frac{W}{m^2 K}$$

Fluido	$m^2.K/W$
Água destilada, água-marinha, águas fluviais, água de alimentação de caldeiras:	
Abaixo de $50^\circ C$	0,0001
Acima de $50^\circ C$	0,0002
Óleo combustível	0,0009
Vapor (livre de óleo)	0,0001
Refrigerantes (líquido)	0,0002
Refrigerantes (vapor)	0,0004
Vapores de álcool	0,0001
Ar	0,0004

(De Tubular Exchange Manufacturers Association.)

Fator de fuligem

- Quando considerado, a resistência térmica total será:

$$R_t = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + F$$

Assim, o coeficiente global de transmissão de calor passará a ser

$$\frac{1}{U_f} = \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} + F$$

$$\frac{1}{U_f} = \frac{1}{U} + F$$

$$U_f = \frac{1}{\frac{1}{U} + F}$$

Fluido	m ² .K/W
Água destilada, água-marinha, águas fluviais, água de alimentação de caldeiras:	
Abaixo de 50 °C	0,0001
Acima de 50 °C	0,0002
Óleo combustível	0,0009
Vapor (livre de óleo)	0,0001
Refrigerantes (líquido)	0,0002
Refrigerantes (vapor)	0,0004
Vapores de álcool	0,0001
Ar	0,0004

(De Tubular Exchange Manufacturers Association.)

Exemplos

1. Suponha $h_i = 2000 \frac{W}{m^2 K}$ e $h_e = 1000 \frac{W}{m^2 K}$, e calcule U sem e com fuligem de água acima de $50^\circ C$.

$$U_{sem} = \frac{1}{\frac{1}{2000} + \frac{1}{1000}} = 667 \frac{W}{m^2 K}$$

$$U_{sem} = \frac{1}{\frac{1}{2000} + \frac{1}{1000} + 0,002} = 333 \frac{W}{m^2 K}$$

2. Suponha que um trocador novo tenha $U = 350 \frac{W}{m^2 K}$. Qual o fator U considerando um fator de fuligem de $0,0009 \frac{m^2 K}{W}$? Qual a perda percentual?

$$U_f = \frac{1}{\frac{1}{U} + F} \Rightarrow U_f = \frac{1}{\frac{1}{350} + 0,0009} \Rightarrow U_f = 266 \frac{W}{m^2 K}$$

$$Perda = \frac{350 - 266}{350} = 0,24 \Rightarrow Perda = 24\%$$

Fluxo de calor no trocador

- O fluxo de calor seguirá a lei de Newton do fluxo de calor

$$\dot{q} = U \cdot A \cdot MLTD$$

Onde

$U \Rightarrow$ coeficiente global de transmissão de calor, $\frac{W}{m^2 K} = \frac{W}{m^2 ^\circ C}$

$A \Rightarrow$ área de troca térmica, m^2

$MLDT \Rightarrow$ média logarítmica das diferenças de temperatura, $^\circ C$

Exemplo

Uma coluna de fracionamento produz benzeno no estado de vapor saturado a 80°C. É necessário condensar e sub-resfriar cerca de 3630 kg/h de benzeno até uma temperatura de 46°C, usando água a 13°C como refrigerante, a uma vazão mássica de 18.148 kg/h. Dimensione e compare a área necessária no trocador de calor tipo casca e tubo de fluxo paralelo e de fluxo inverso, considerando nos dois casos um coeficiente global de troca de calor de 1135 W/m²h.

Dados:

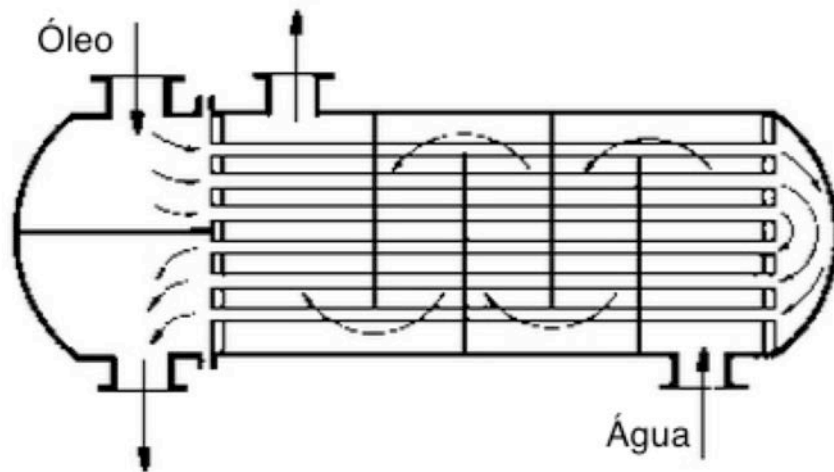
Calor latente de vaporização do benzeno: $L = 3,945 \cdot 10^5 \frac{J}{kg}$

Calor específico do benzeno: $c = 1758,5 \frac{J}{kg}$

Calor específico da água: $c_{\text{água}} = 4196,9 \frac{J}{kg}$

Exercício

Uma vazão de 68 kg/min de água ($c=4180 \text{ J/kgK}$) entrando em um trocador de calor de carcaça e tubo a 35°C precisa ser aquecida para 75°C por um óleo. O óleo ($c=1859 \text{ J/kgK}$) entra no tubo a uma temperatura de 110°C e sai a 75°C . O trocador será de correntes opostas, com uma passagem pelo casco e duas pelo tubo. O coeficiente global de transferência estimado é de $320 \text{ W/m}^2\text{K}$. Calcule a área necessária para o trocador de calor com a área limpa, e depois considerando um fator de fuligem de $0,0005 \text{ m}^2\text{K/W}$. Calcule também a vazão de óleo necessária.



Respostas:

Área limpa = $18,6 \text{ m}^2$

Área com fuligem = $21,5 \text{ m}^2$

Vazão de óleo = 174 kg/min