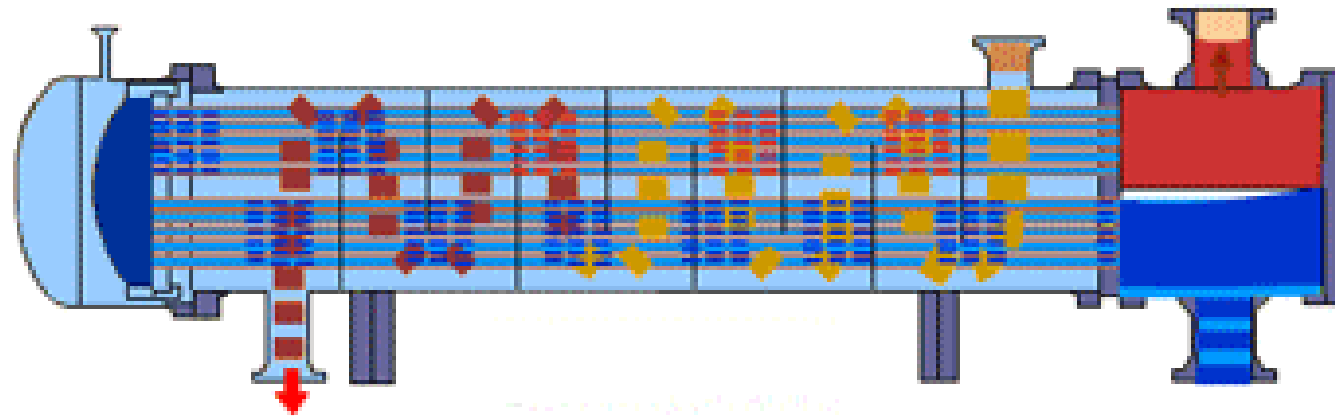


Trocadores de Calor



Prof. Fabrício Maciel Gomes

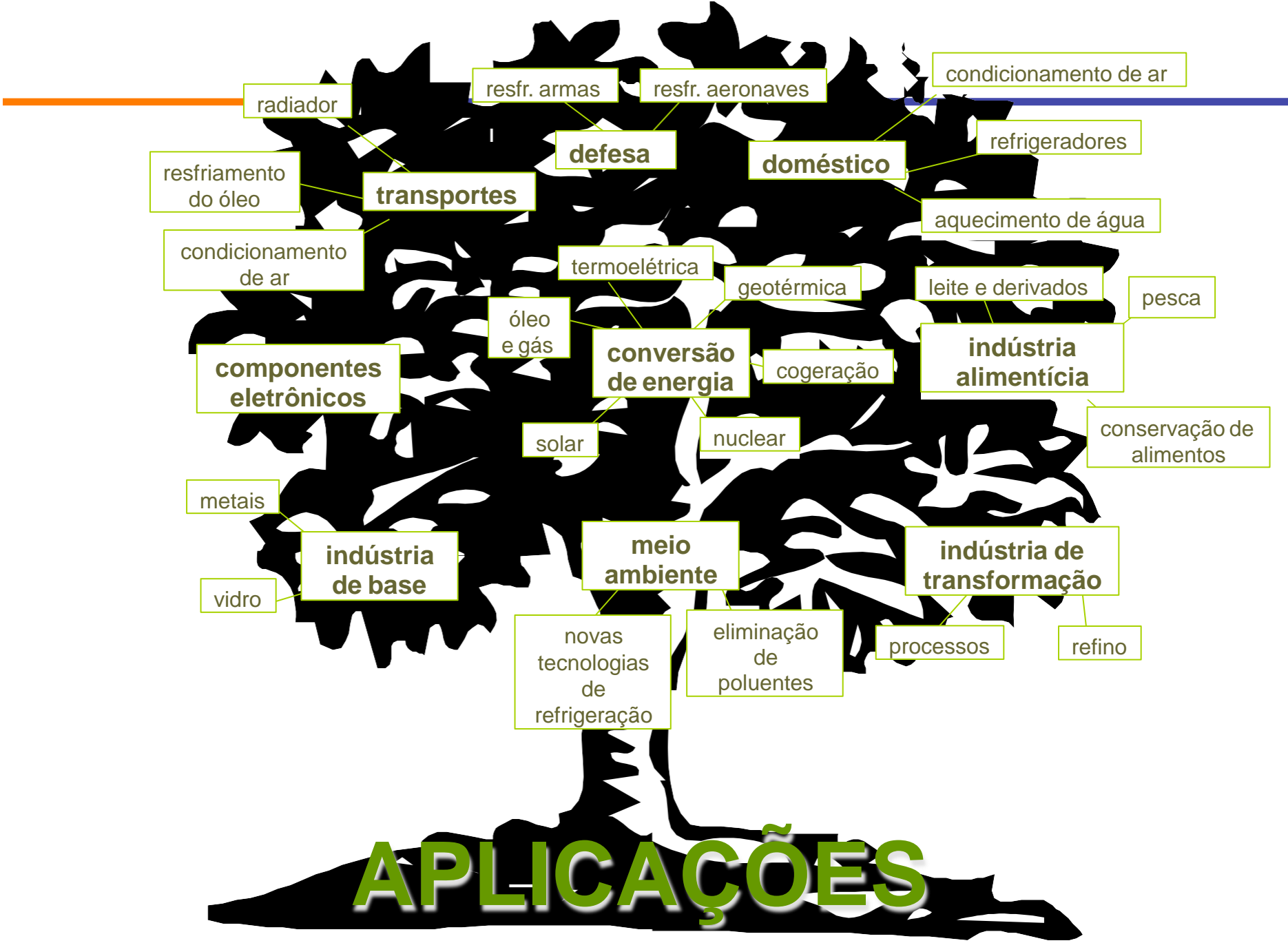
Trocadores de Calor

O que são Trocadores de Calor?

Equipamentos de vários tipos e configurações onde ocorre transferência de energia sob a forma de calor* entre duas ou mais massas de fluido** que podem ou não estar em contato direto.

* Normalmente, NÃO há interações com o ambiente sob a forma de calor e trabalho.

** Nos fluidos, pode haver sólidos em suspensão.



Trocadores de Calor

I: Quanto ao processo de transferência

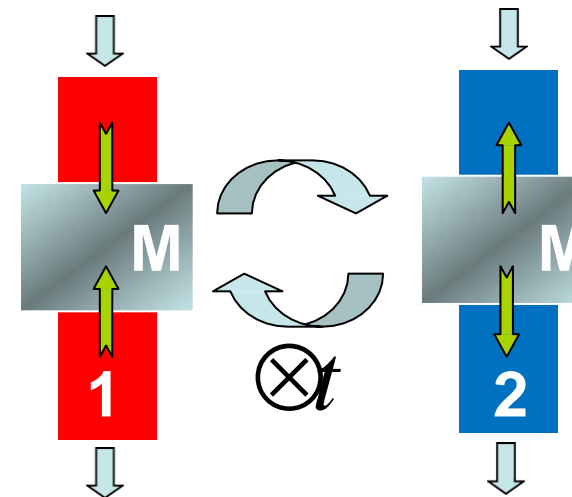
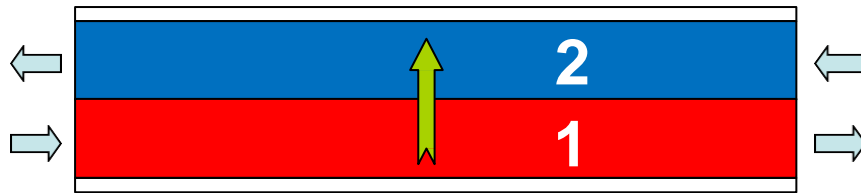
TROCADORES DE CALOR

RECUPERADORES

REGENERADORES

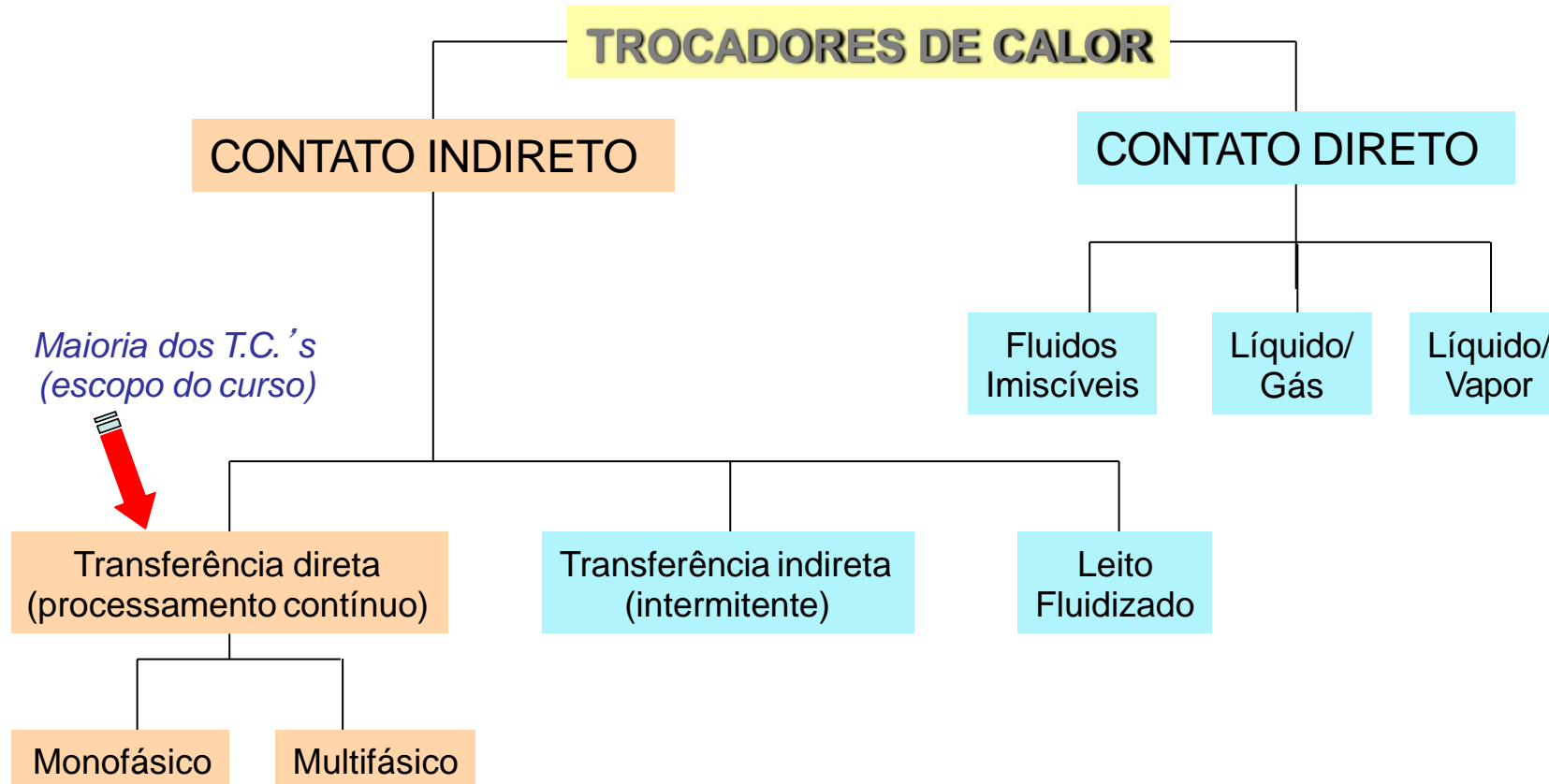
Transferência direta
(processamento contínuo)

Transferência indireta
(processamento intermitente -
meio intermediário)

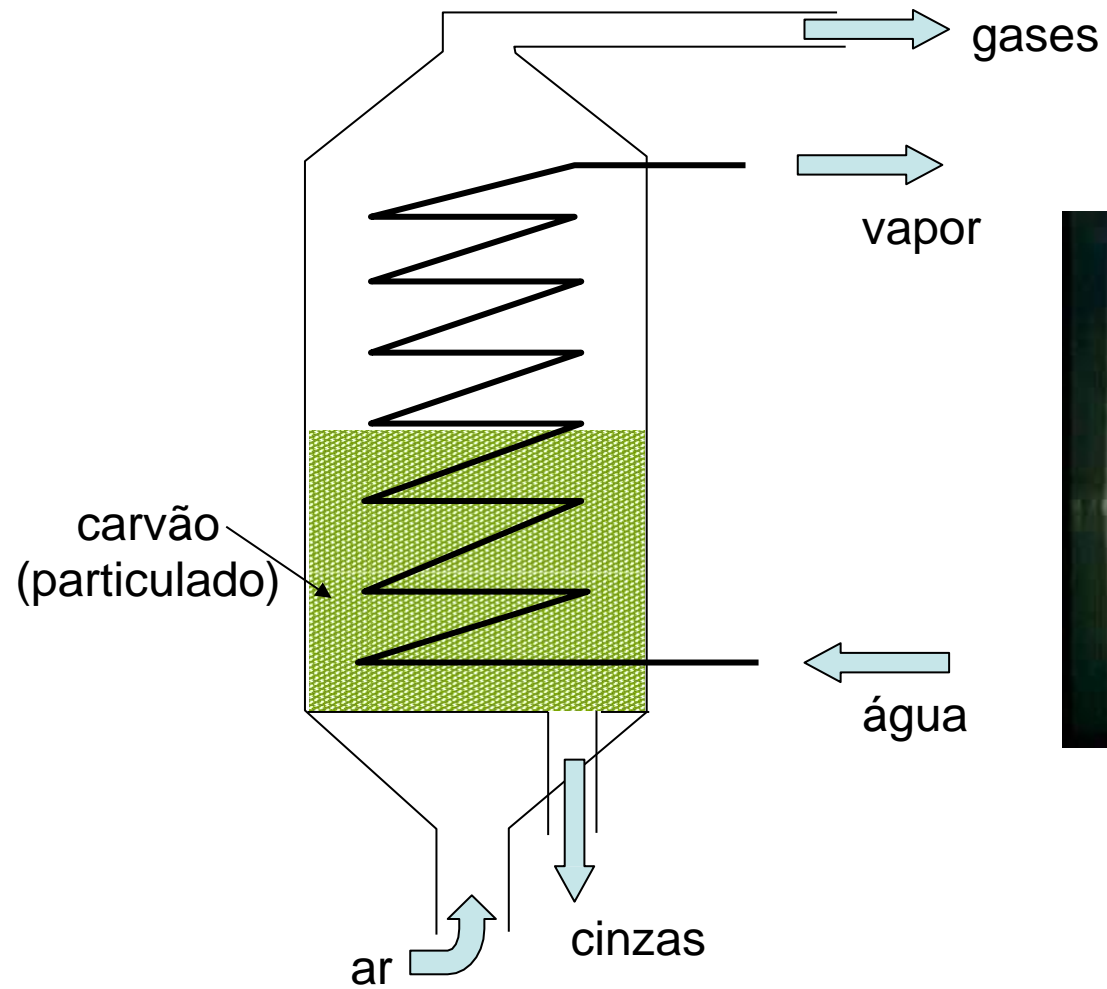


Trocadores de Calor

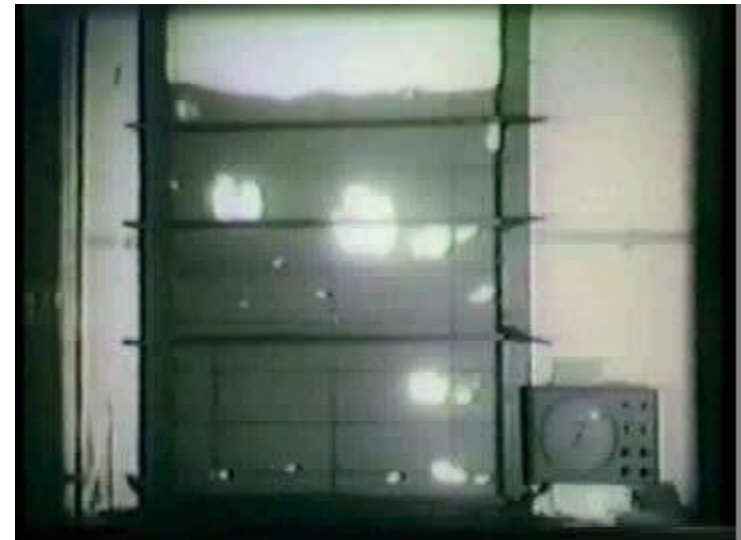
II: Quanto ao contato entre as correntes



Trocadores de Calor



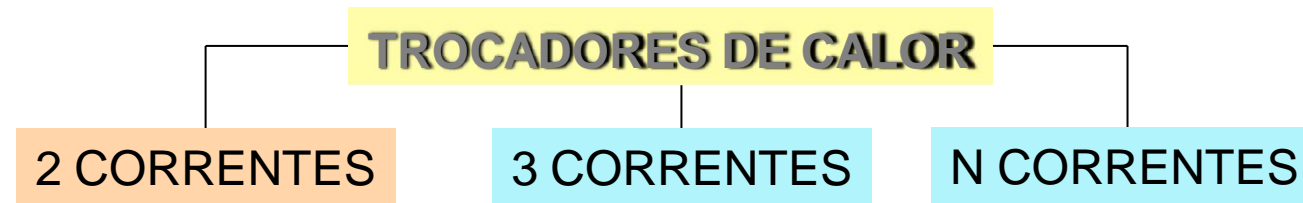
Uma caldeira a carvão



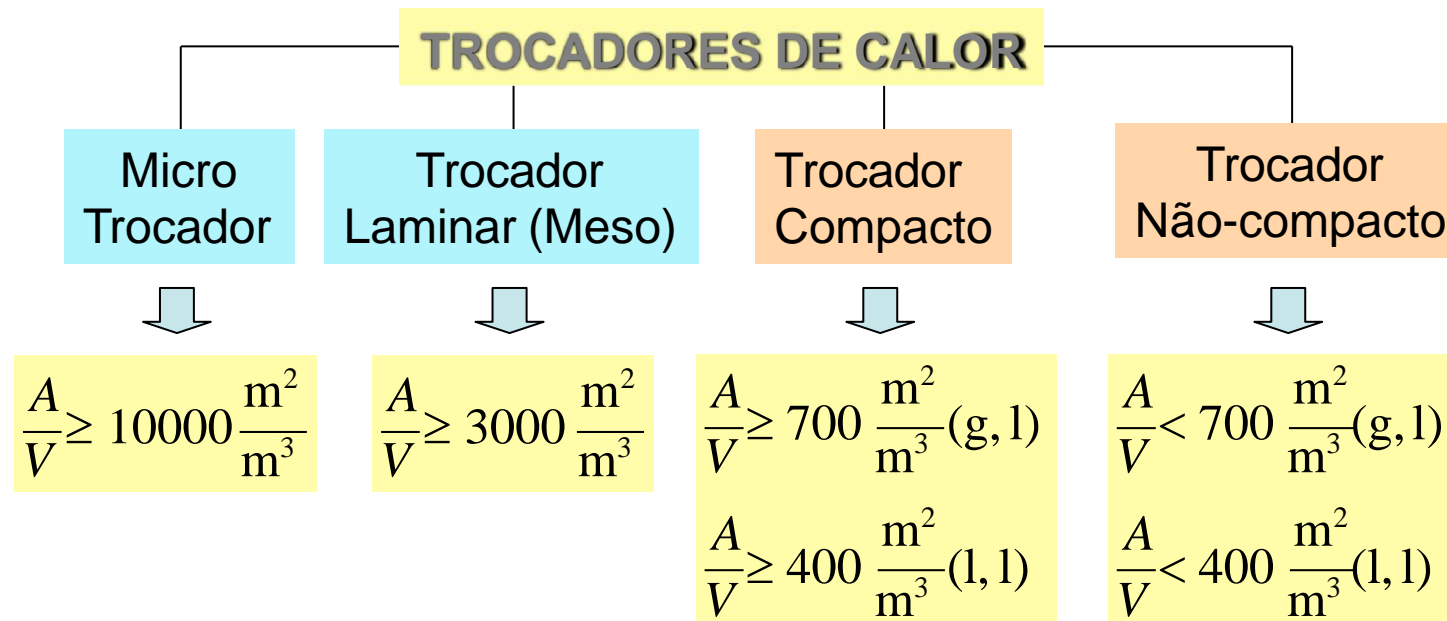
Leito Fluidizado

Trocadores de Calor

III: Quanto ao número de correntes

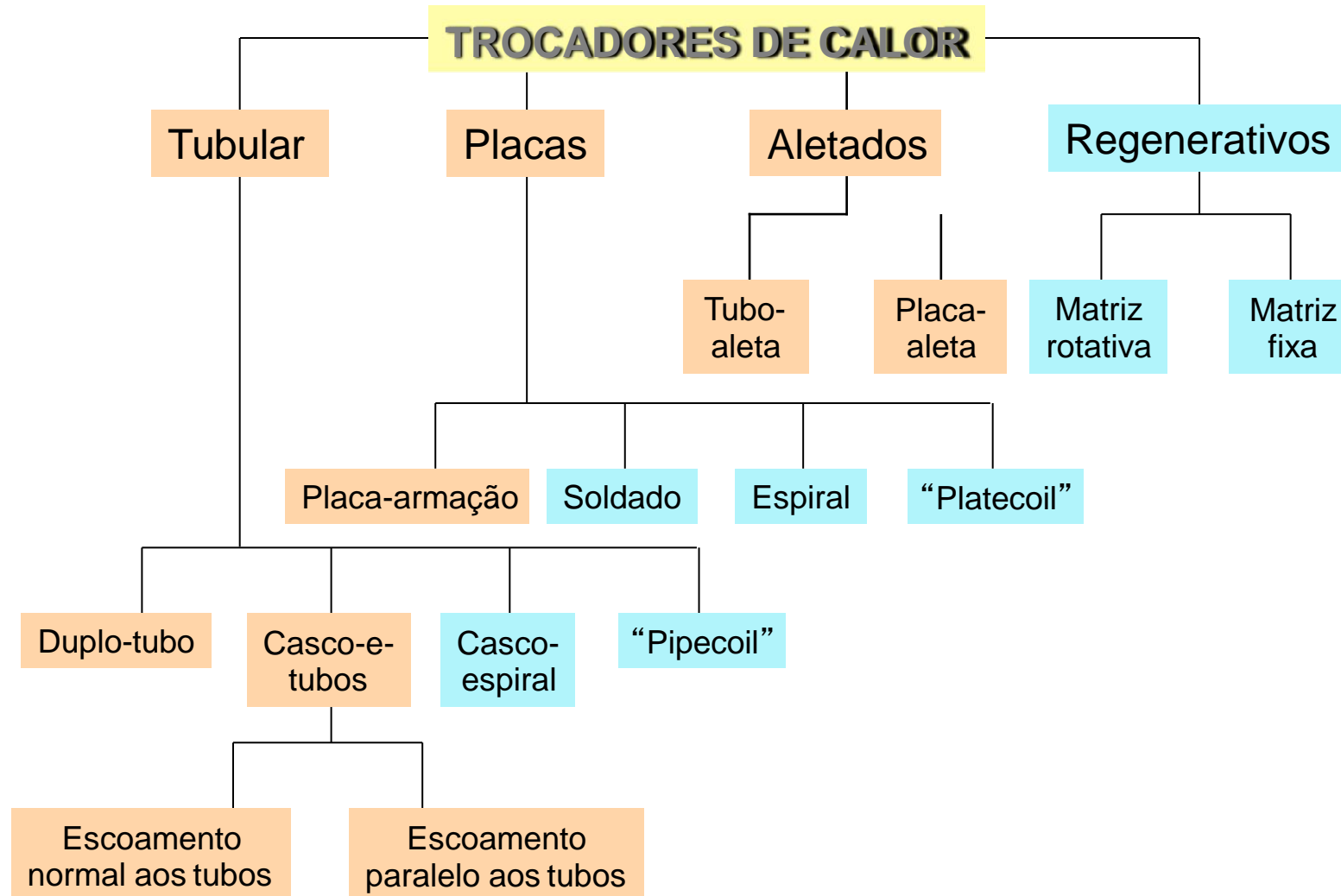


IV: Quanto à razão área de troca/volume

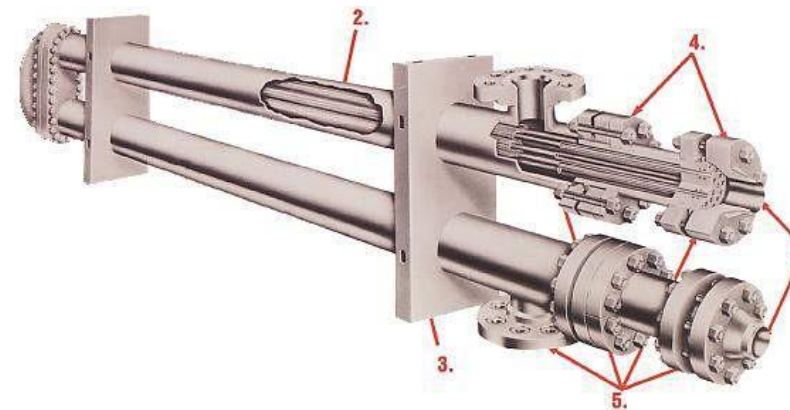
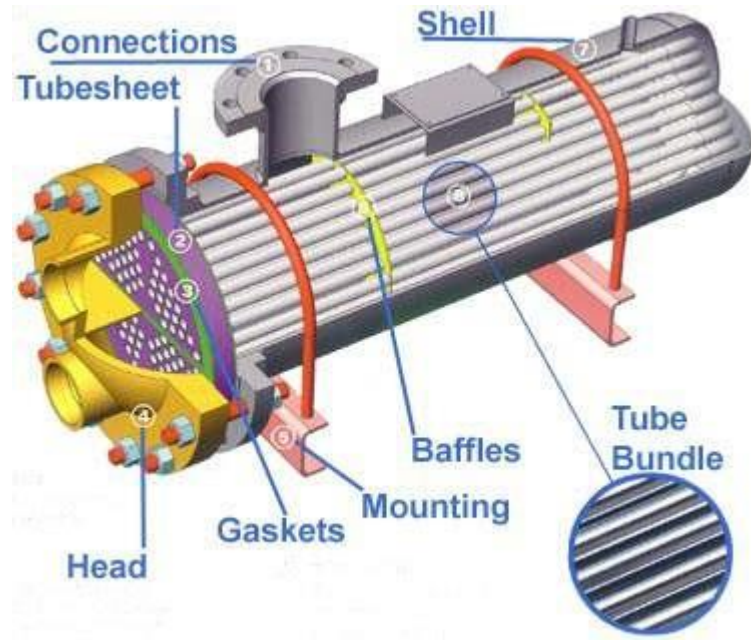


Trocadores de Calor

V: Quanto à construção

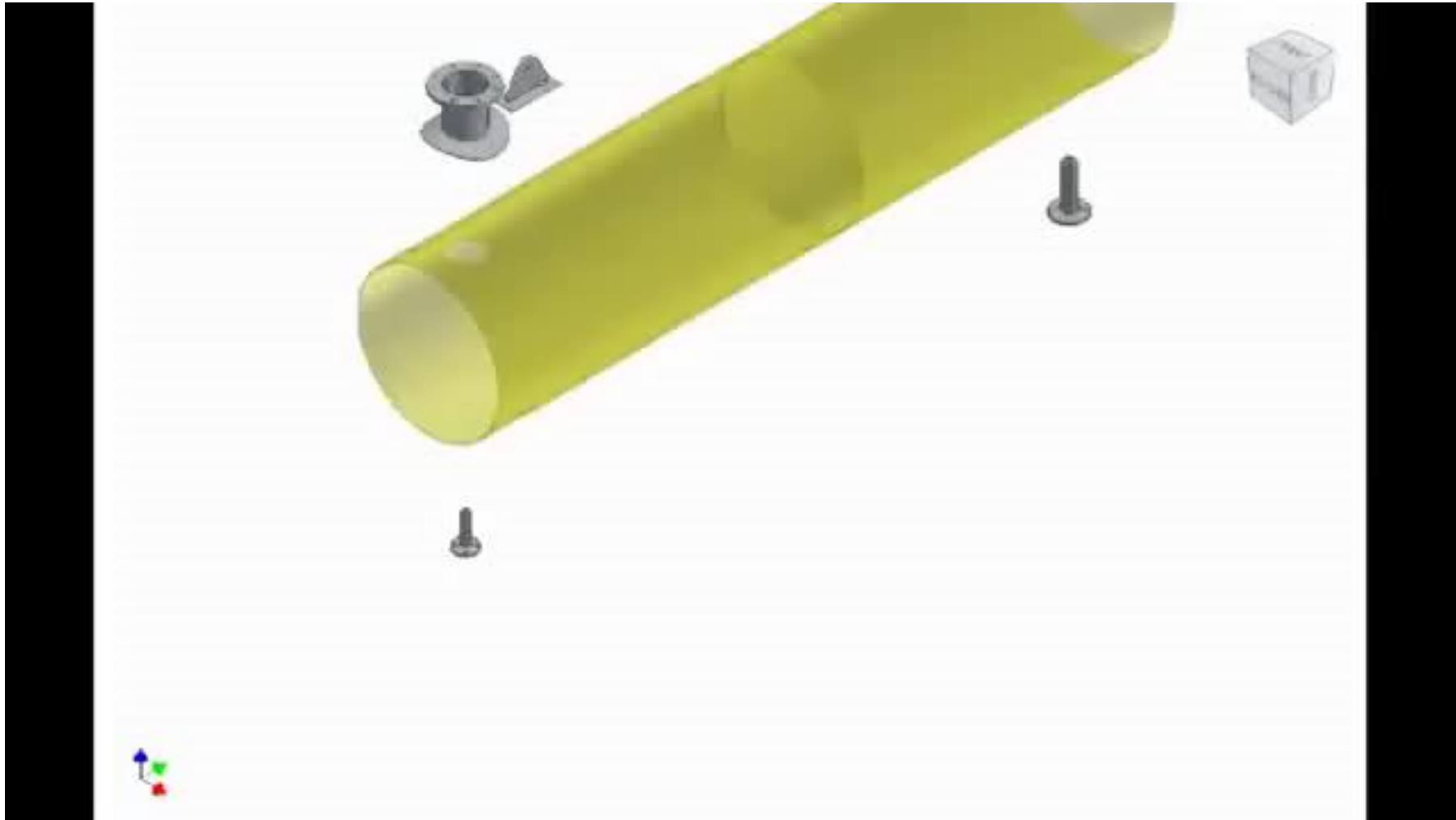


Trocadores de Calor

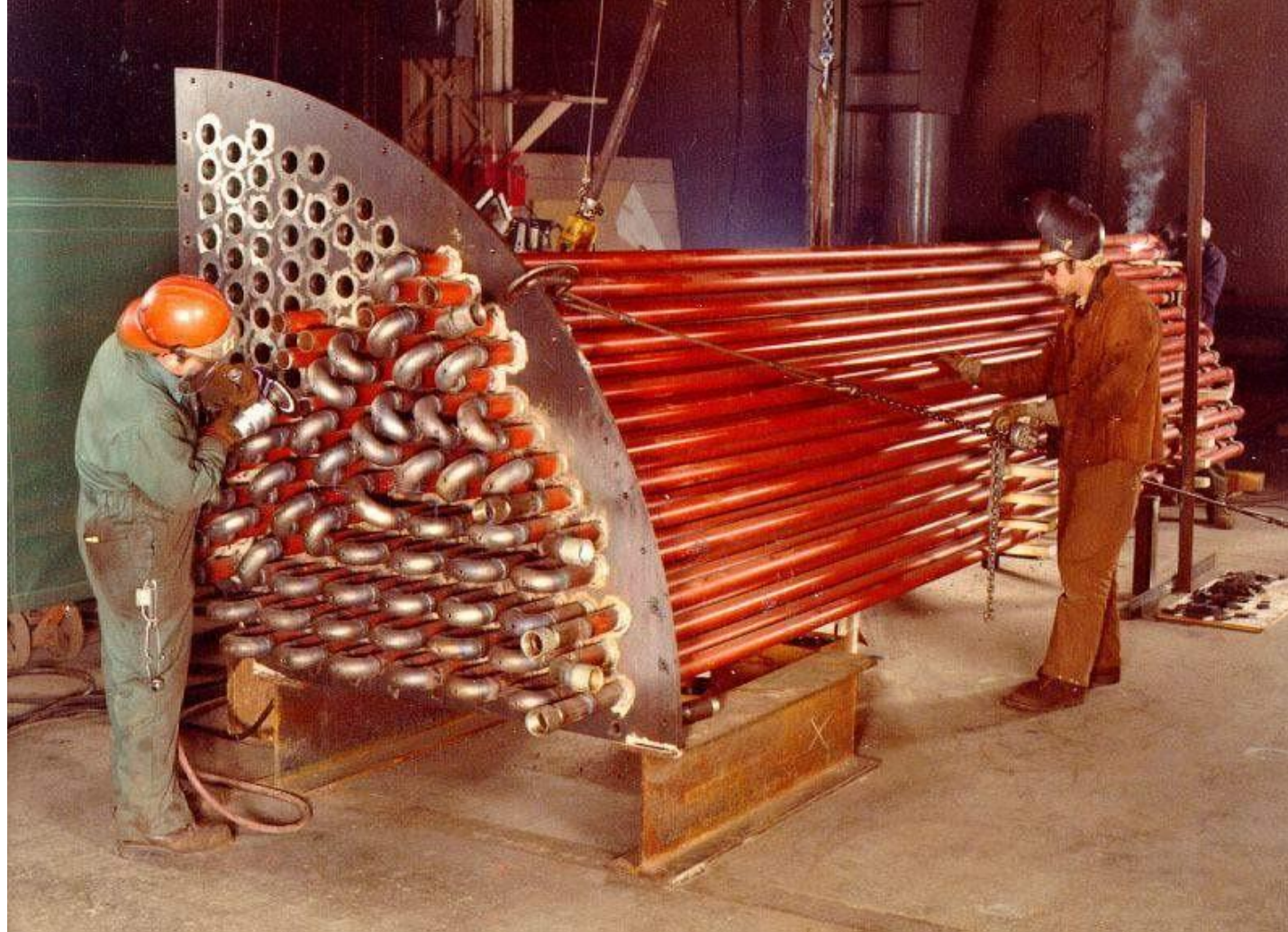


Trocadores Tubulares

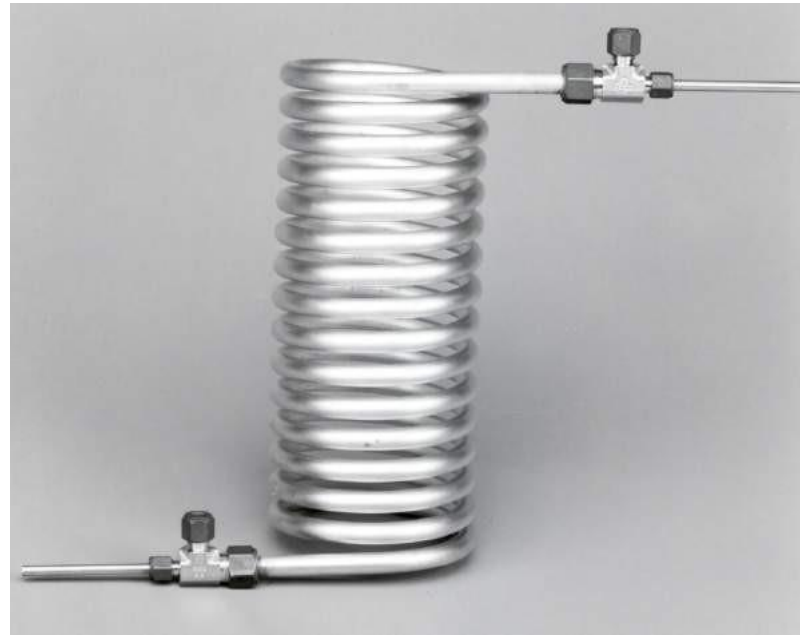
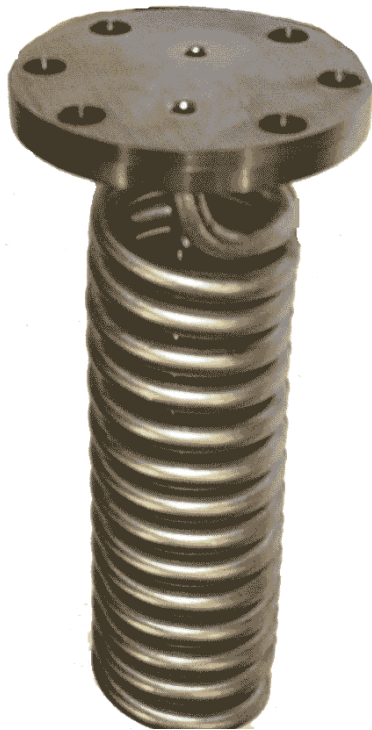
Trocadores de Calor



Trocadores de Calor

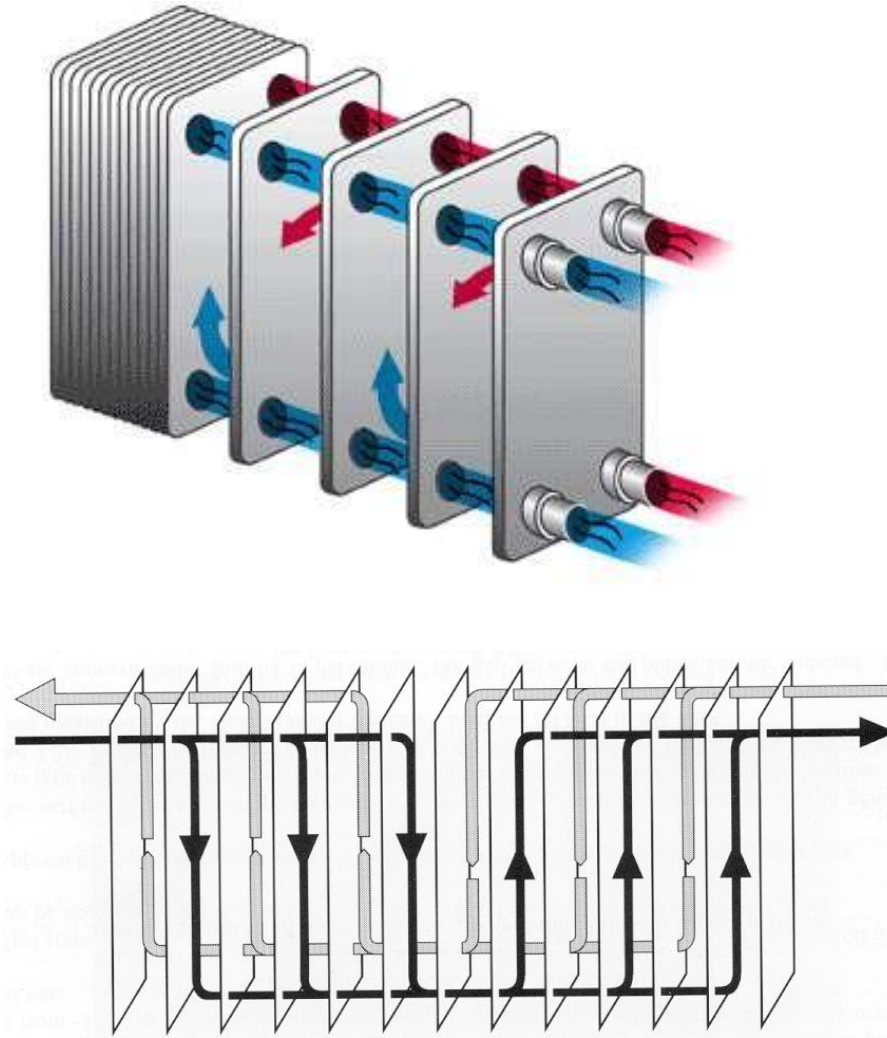


Trocadores de Calor



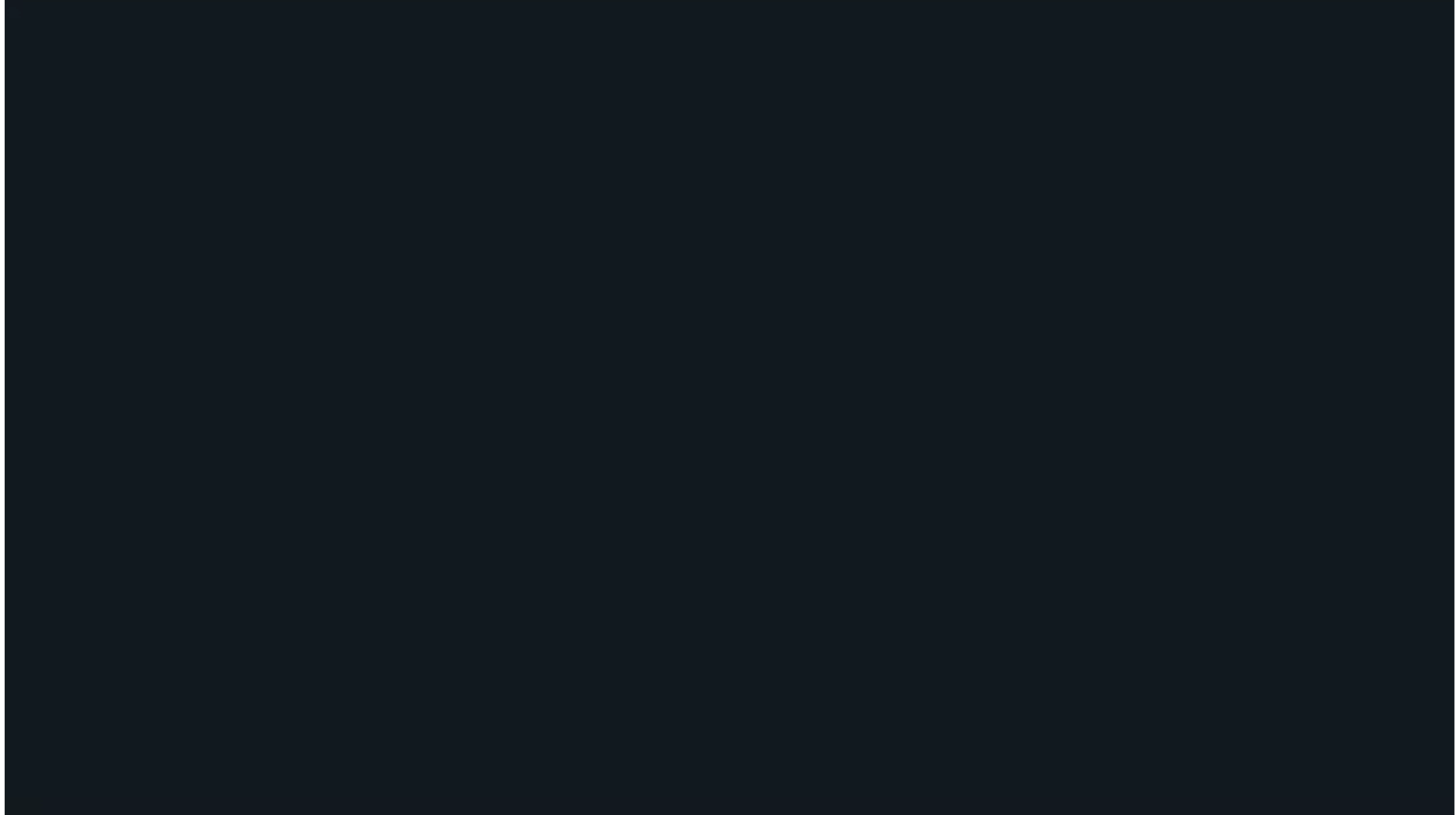
Trocadores Tubulares

Trocadores de Calor



Trocadores de Placas

Trocadores de Calor



Trocadores de Calor

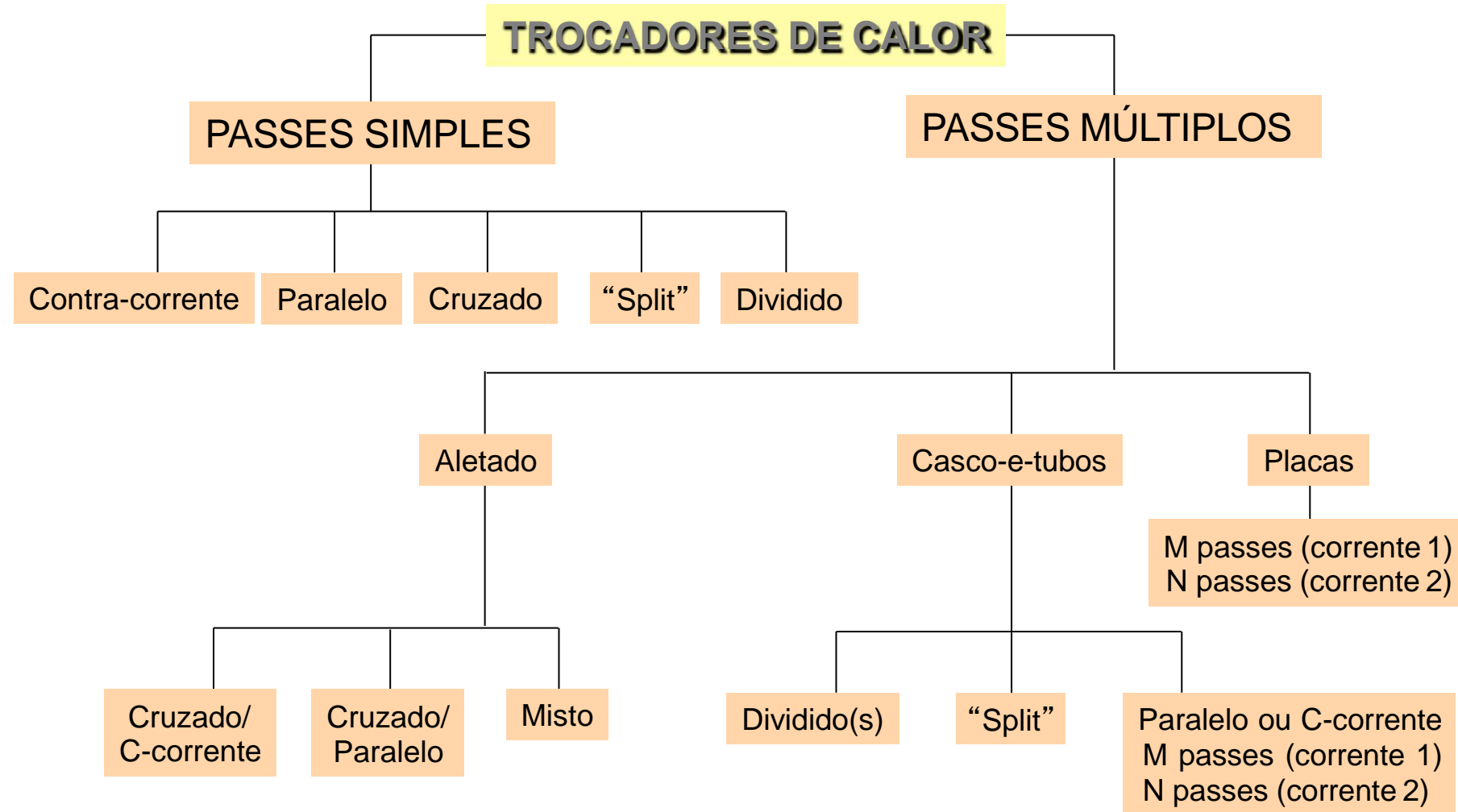


Trocadores de Placas



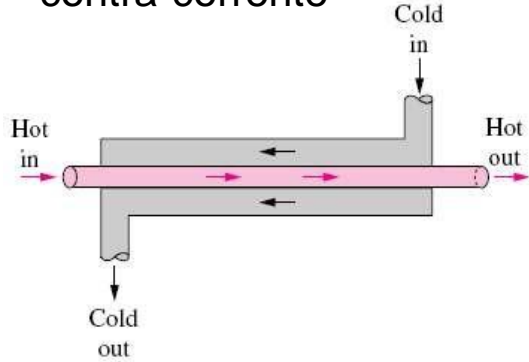
Trocadores de Calor

VI: Quanto à disposição das correntes

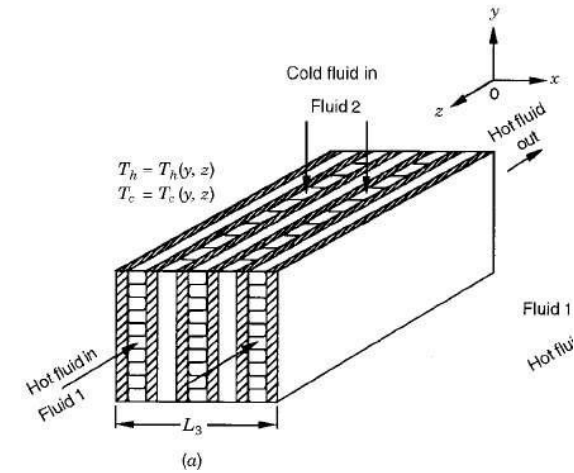
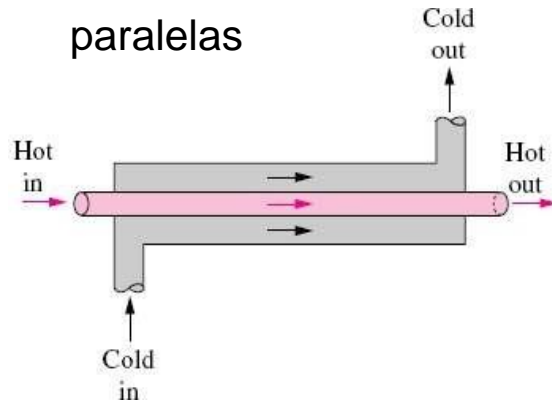


Trocadores de Calor

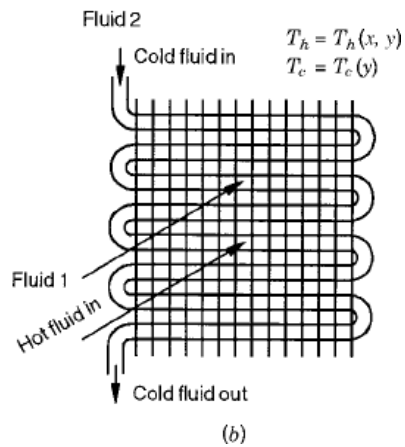
contra-corrente



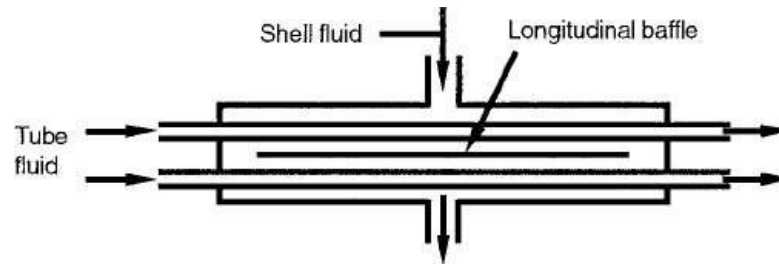
paralelas



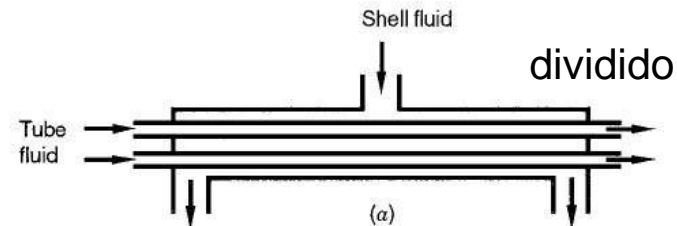
correntes cruzadas (M-M)



correntes cruzadas (M-não M)

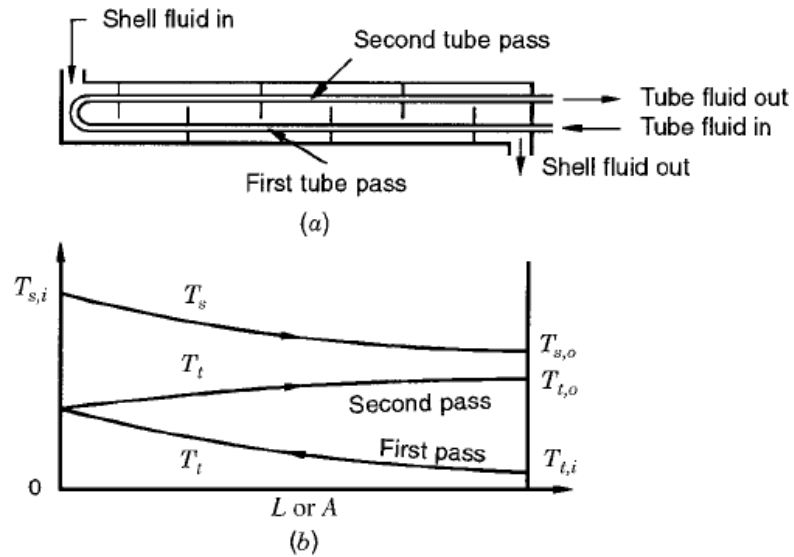


split

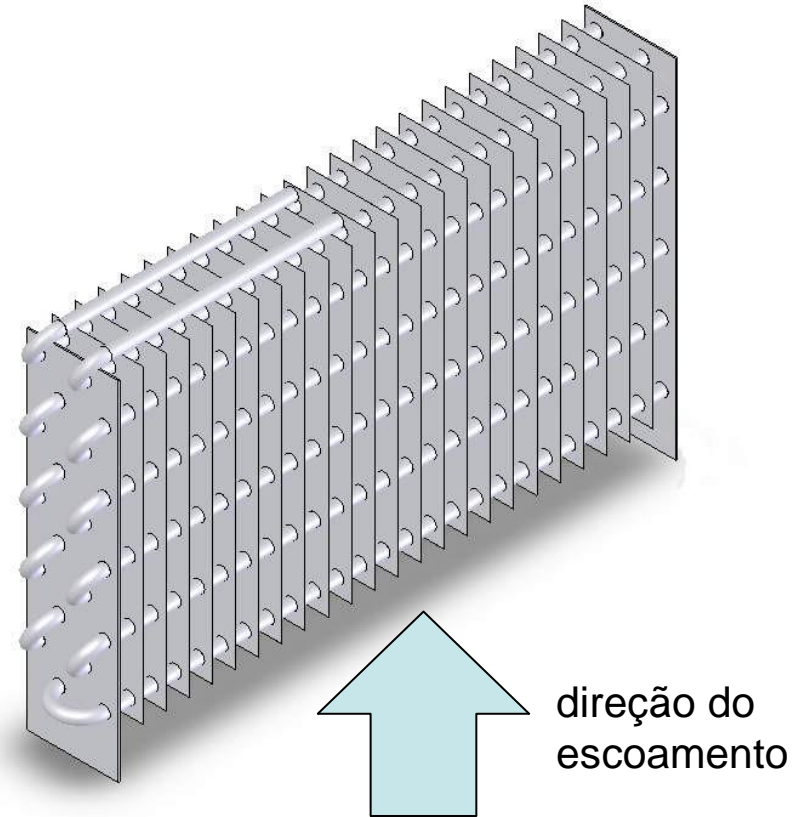


(a)

Trocadores de Calor



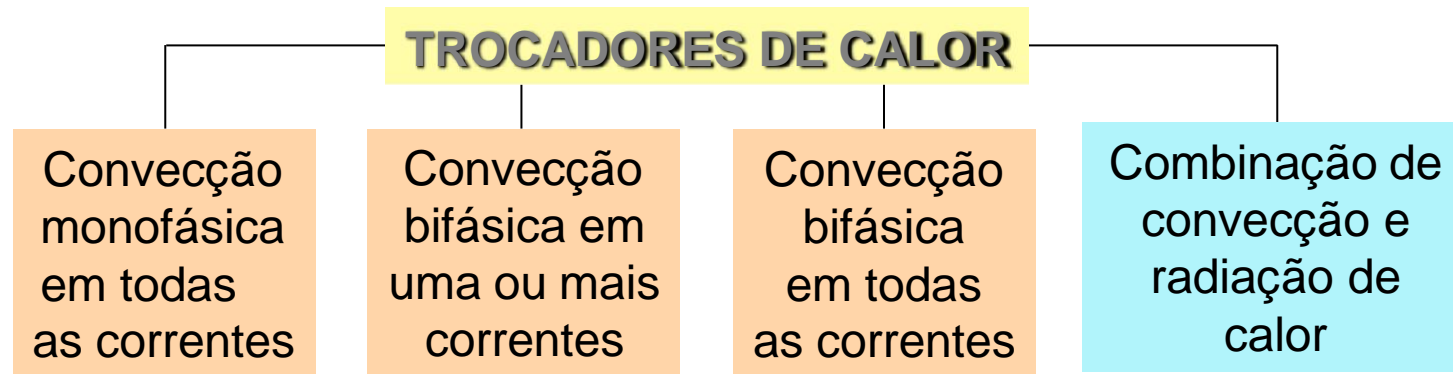
1 passe no casco
2 passes nos tubos



misto

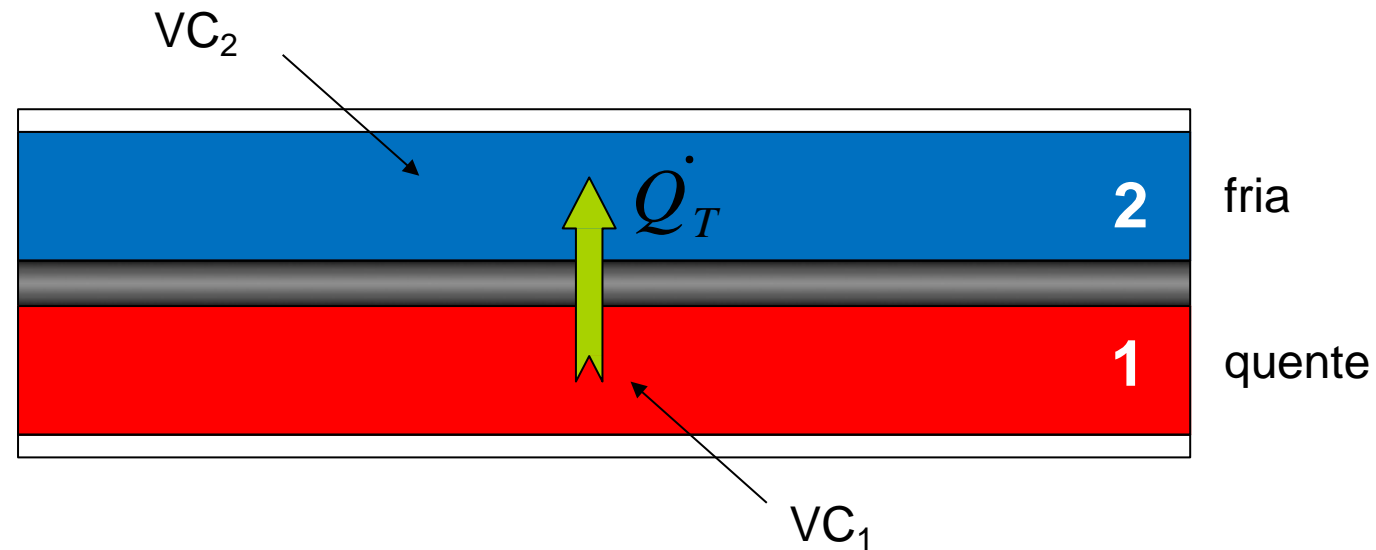
Trocadores de Calor

VII: Quanto ao mecanismo de transferência de calor



Trocadores de Calor

Duas correntes fluidas (vazões mássicas conhecidas) trocando calor através de uma superfície



Aplicando a 1ª Lei da Termodinâmica (Eq. da energia) a cada VC...

Trocadores de Calor

... com as seguintes hipóteses:

1. sem trabalho realizado por ou sobre o sistema
2. regime permanente
3. variações de energia cinética e potencial desprezíveis
4. propriedades uniformes
5. perdas de calor desprezíveis entre as correntes e o ambiente (isoladas)

Temos a taxa total de calor trocado:

$$Q_{Total} = M_{Quente} \cdot (T_{entrada, quente} - T_{saída, quente}) = M_{Frio} \cdot (T_{saída, frio} - T_{entrada, frio})$$

Trocadores de Calor

... se ainda

6. os fluidos não experimentam mudança de fase ao longo do trocador
7. seus calores específicos são aproximadamente constantes

Temos:

$$\Delta H = cp \cdot \Delta T$$

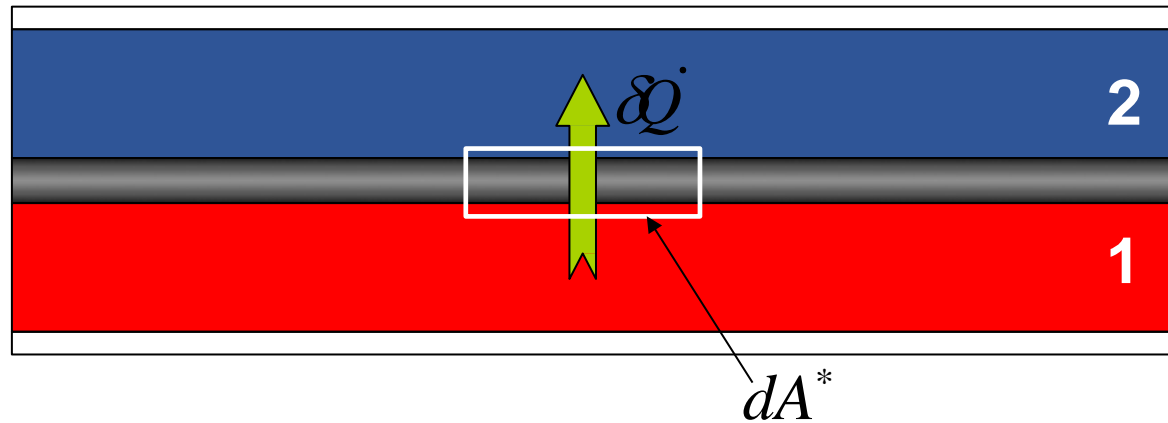
$$Q_{Total} = M_{quente} \cdot cp_{quente} \cdot \Delta T_{quente} = M_{Frio} \cdot cp_{frio} \cdot \Delta T_{frio}$$

A Termodinâmica sozinha não fornece subsídios para o dimensionamento do trocador de calor

Trocadores de Calor

Equação fundamental - Lei de resfriamento de Newton

$$\delta Q = U^* \cdot \Delta T \cdot dA^*$$



Trocadores de Calor

\dot{Q} taxa de calor trocado **LOCAL** (ou seja, no elemento de área) [W]

U^* coeficiente GLOBAL de transferência de calor **LOCAL** [W/m².K]

T_1, T_2 temperaturas **LOCAIS** das correntes 1 e 2 (quente e fria) [K]

dA^* incremento infinitesimal de área de troca
(de referência consistente com U^*) [m²]

Integrando a equação diferencial acima com respeito a qualquer uma das variáveis primárias (Q ou A), temos:

Trocadores de Calor

$$A = \int_0^{Q_T} \frac{\delta Q}{U^* \cdot \Delta T}$$

$$Q_{Total} = \int_0^{A_{Total}} U^* \cdot \Delta T \cdot dA^*$$

Um método de cálculo ou de projeto deve propor, em última análise, um procedimento através do qual a equação acima pode ser integrada.

Se $(T - T)$ e U são conhecidos, o problema está resolvido...

Trocadores de Calor

Se U^* for **UNIFORME** em A^* :

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T$$

Variável a ser determinada sob integração na área

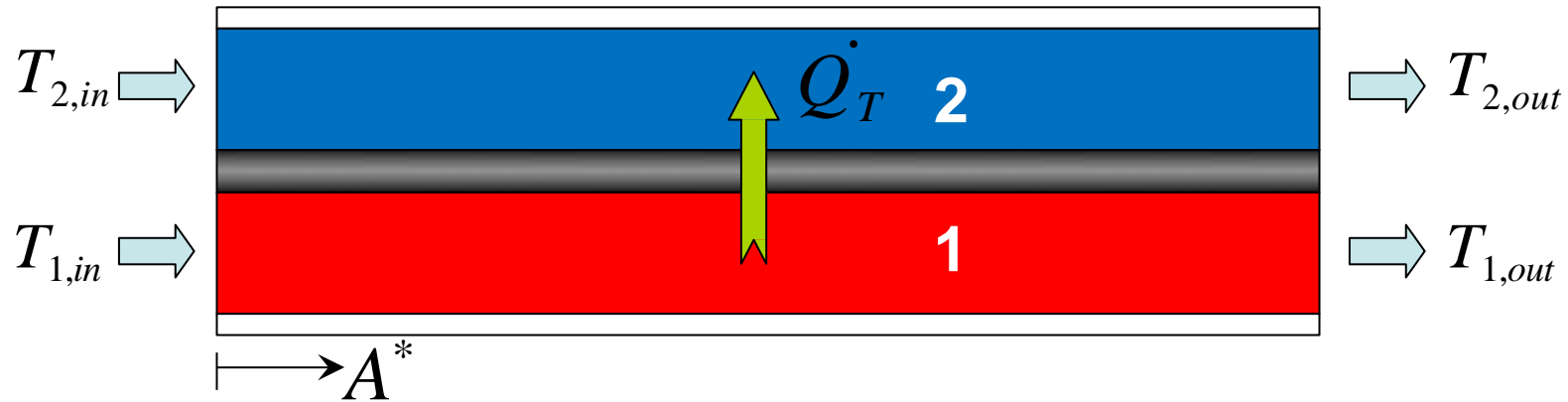
$$\Delta T_M \cong (T_1 - T_2) = \frac{1}{A} \cdot \int_{A^*} (T_1 - T_2) dA^*$$

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_M$$

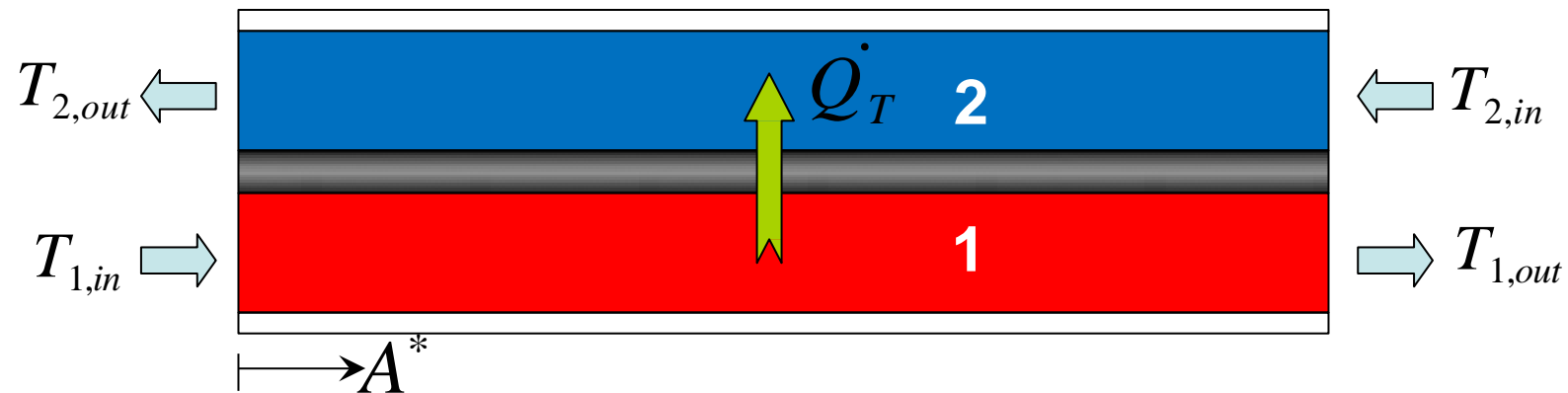
Trocadores de Calor

São duas as configurações fundamentais

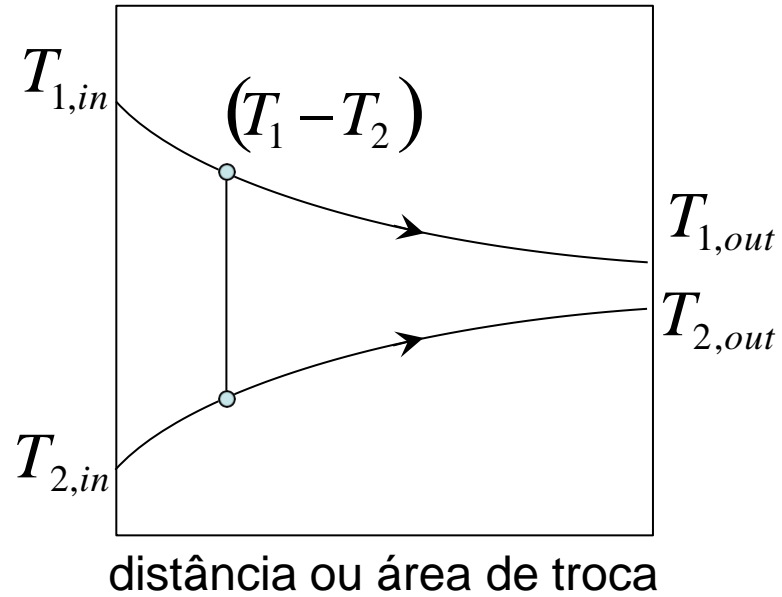
ARRANJO DE CORRENTES EM PARALELO



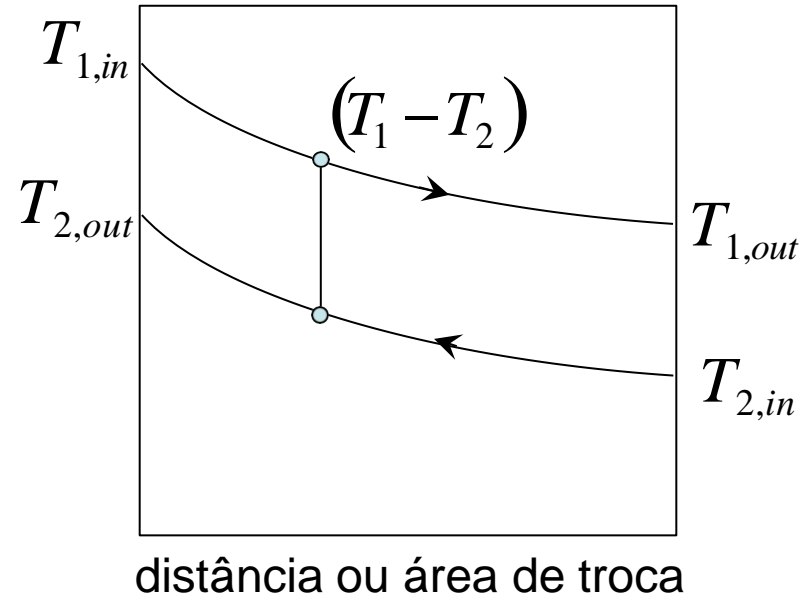
ARRANJO EM CONTRA-CORRENTE



Trocadores de Calor



PARALELO

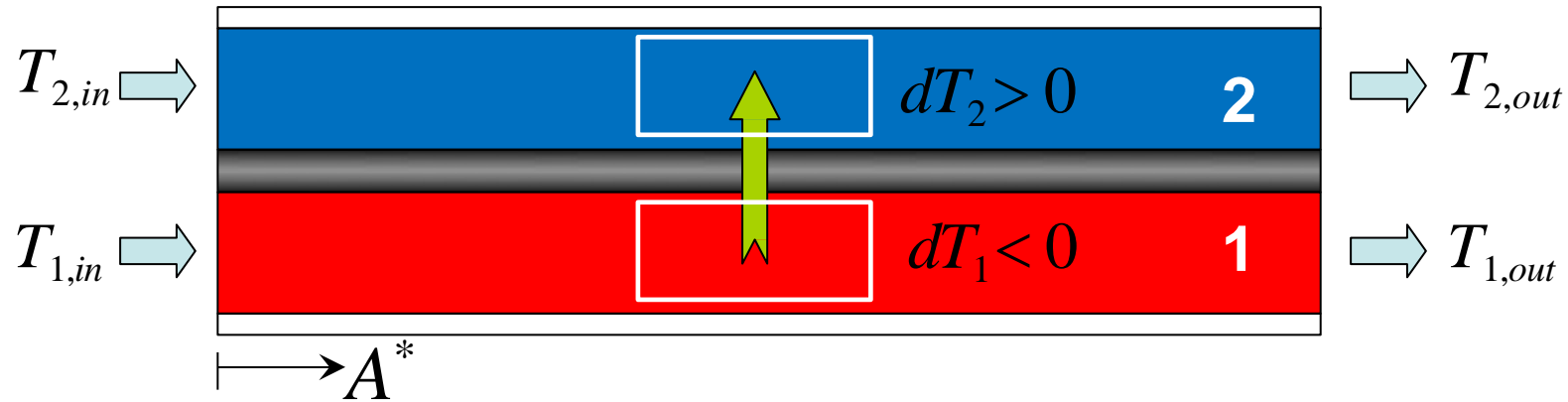


C-CORRENTE

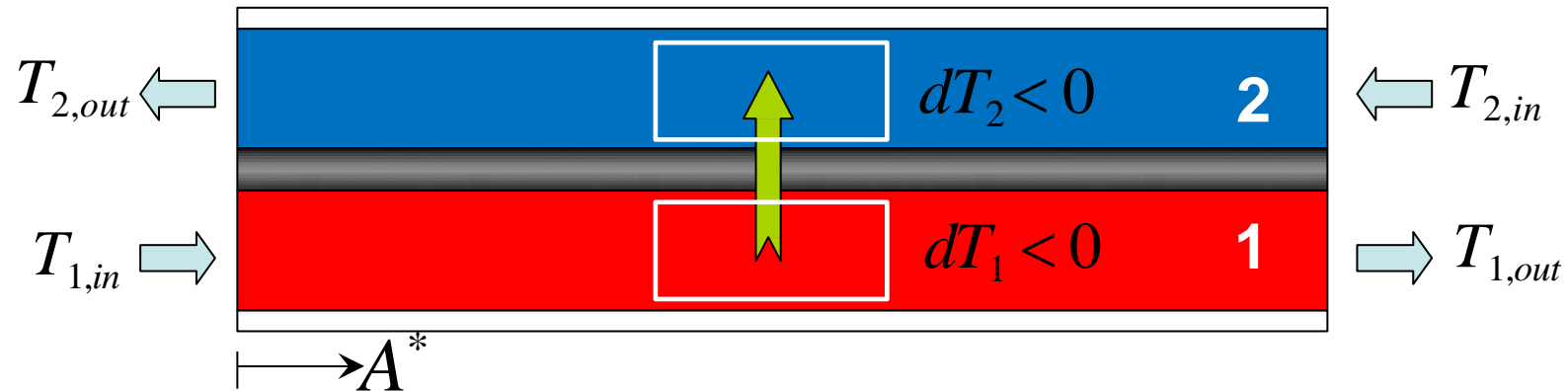
Trocadores de Calor

Analisando os VC' s infinitesimais

ARRANJO DE CORRENTES EM PARALELO



ARRANJO EM CONTRA-CORRENTE



Trocadores de Calor

Passo 1: Calcular $d(T_1 - T_2)$ para cada configuração

Paralelo

$$dT_1 = -\frac{\delta Q}{C_1} \quad dT_2 = -\frac{\delta Q}{C_2}$$

$$d(T_1 - T_2) = -\delta Q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)$$

C-Corrente

$$dT_1 = -\frac{\delta Q}{C_1} \quad dT_2 = -\frac{\delta Q}{C_2}$$

$$d(T_1 - T_2) = -\delta Q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)$$

Trocadores de Calor

Passo 2: Substituir a Eq. Fundamental em (1) e (2)

$$\delta Q = U (T - T) dA$$

Paralelo

$$\frac{d(T_1 - T_2)}{(T_1 - T_2)} = -U^* \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) dA^*$$

C-Corrente

$$\frac{d(T_1 - T_2)}{(T_1 - T_2)} = -U^* \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) dA^*$$

Trocadores de Calor

Passo 3: Integrar ao longo da área

Paralelo

$$\int_{\Delta T_1}^{\Delta T_2} \frac{d(T_1 - T_2)}{(T_1 - T_2)} = -U^* \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) \int_0^{A^*} dA^*$$

$$\ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right) = -U^* \cdot A^* \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)$$

C-Corrente

$$\int_{\Delta T_1}^{\Delta T_2} \frac{d(T_1 - T_2)}{(T_1 - T_2)} = -U^* \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) \int_0^{A^*} dA^*$$

$$\ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right) = -U^* \cdot A^* \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)$$

Trocadores de Calor

Uma observação importante:

A diferença de temperatura varia exponencialmente com a área

Paralelo

$$\Delta T_2 = \Delta T_1 \cdot \exp \left[-U^* \cdot A^* \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) \right]$$

C-Corrente

$$\Delta T_2 = \Delta T_1 \cdot \exp \left[-U^* \cdot A^* \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) \right]$$

Trocadores de Calor

Passo 4: Substituir as taxas de capacidade calorífica em (3) e (4)

Paralelo

$$\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right) = -U^* \cdot A^* \left(\frac{T_{1,entrada} - T_{1,Saída}}{C_1} + \frac{T_{2,entrada} - T_{2,Saída}}{C_2} \right)$$

$$\Delta T_1 = T_{1,entrada} - T_{2,entrada} \qquad \Delta T_2 = T_{1,saída} - T_{2,saída}$$

C-Corrente

$$\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right) = -U^* \cdot A^* \left(\frac{T_{1,entrada} - T_{1,Saída}}{C_1} + \frac{T_{2,entrada} - T_{2,Saída}}{C_2} \right)$$

$$\Delta T_1 = T_{1,entrada} - T_{2,entrada} \qquad \Delta T_2 = T_{1,saída} - T_{2,saída}$$

Trocadores de Calor

Para as duas configurações básicas, então:

$$Q_{Total} = U^* \cdot A^* \cdot \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)}$$

$$\Delta T_M = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)}$$

Trocadores de Calor

Média Logarítmica da Diferença de Temperaturas (MLDT)

$$\Delta T_{MLDT} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right)}$$

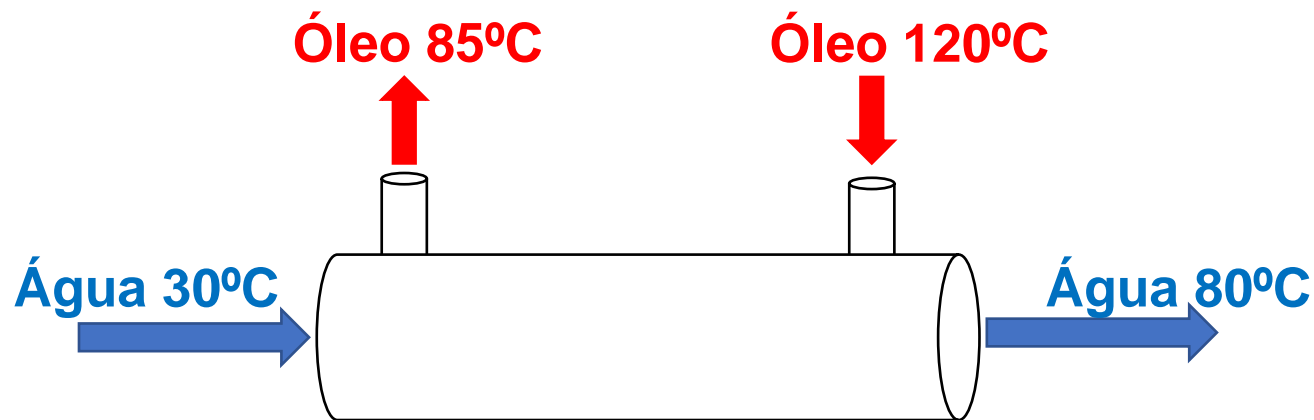
É a diferença de temperatura “efetiva” ou “média” dos trocadores em correntes em paralelo ou contra-corrente sob as restrições impostas pelas hipóteses iniciais

Nesses casos, a Eq. fundamental de projeto é então:

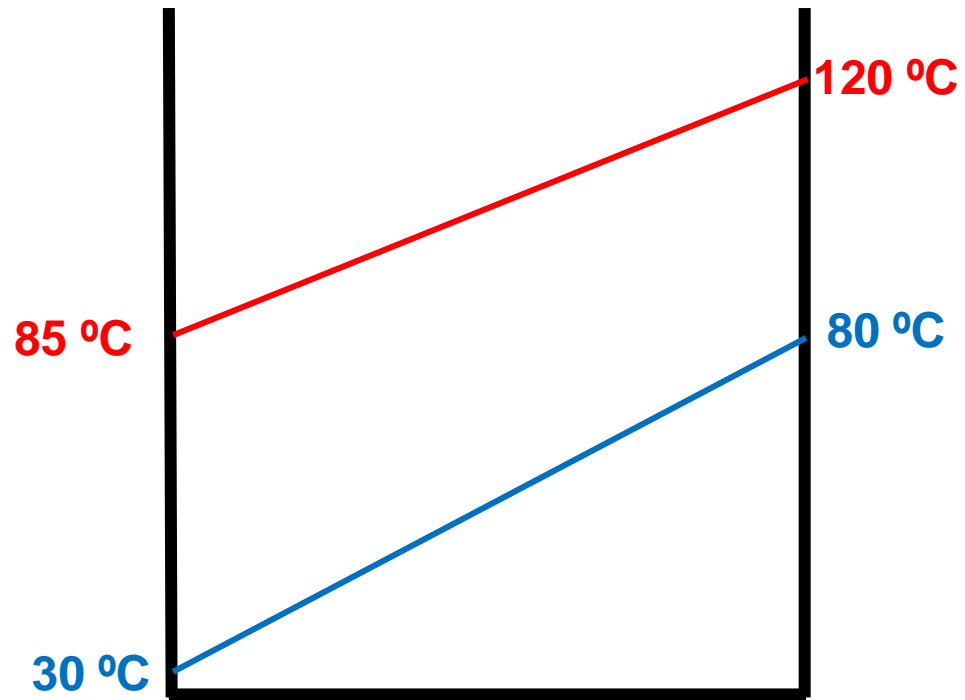
$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{MLDT}$$

Trocadores de Calor

Exemplo: Um trocador de calor do tipo casco e tubos, em contracorrente, é empregado para aquecer água à vazão de $0,8 \text{ kg/s}$ desde $T_1=30 \text{ }^\circ\text{C}$ até $80 \text{ }^\circ\text{C}$, com óleo quente entrando a $120 \text{ }^\circ\text{C}$ e saindo a $85 \text{ }^\circ\text{C}$. O coeficiente global de troca de calor é $U = 125 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$. Calcule a área de transferência de Calor



Trocadores de Calor



$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{MLDT}$$

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

$$\Delta T_{MLDT} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right)}$$

Trocadores de Calor

$$\Delta T_1 = 120 - 80 = 40^\circ C$$

$$\Delta T_2 = 85 - 30 = 55^\circ C$$

$$\Delta T_{MLDT} = \frac{55 - 40}{\ln\left(\frac{55}{40}\right)} = 47,11^\circ C$$

$$Q = 0,8 \cdot 4180 \cdot (80 - 30)$$

$$Q = 167200W$$

Trocadores de Calor

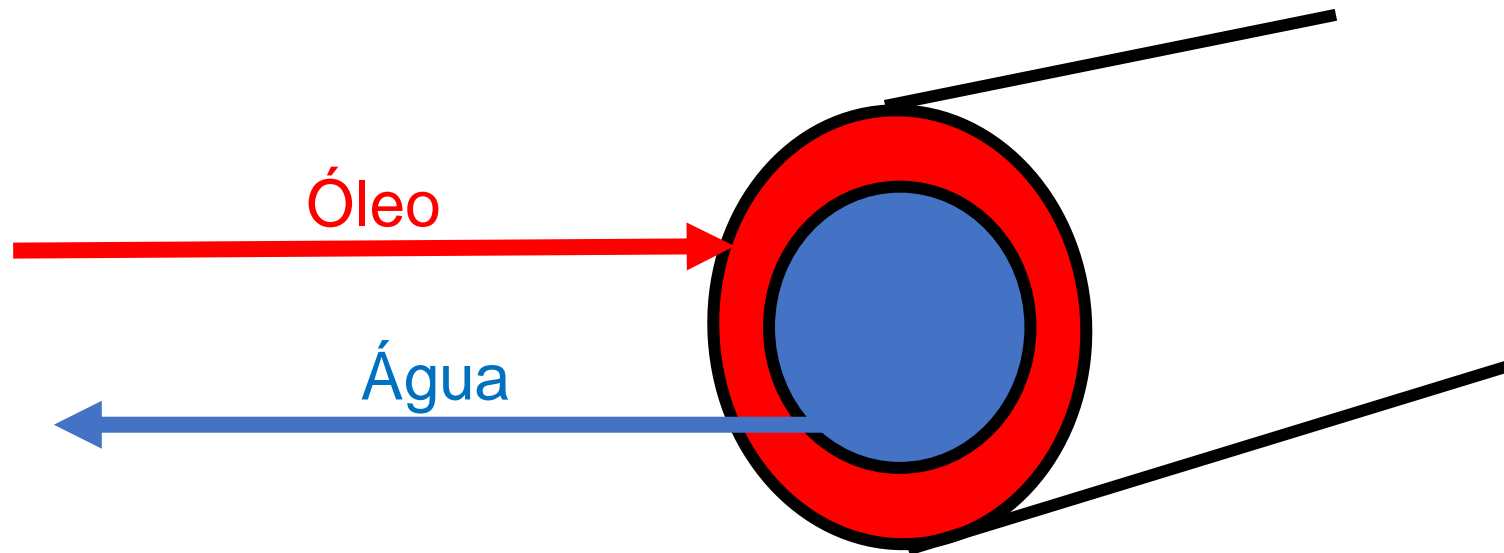
$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{ML}$$

$$167200 = 125 \cdot A \cdot 47,11$$

$$A = 28,39m^2$$

Trocadores de Calor

Exemplo: Quer-se resfriar óleo de máquina de 80 para 50 °C em um trocador de calor em contracorrente resfriado por água a 20 °C. A água flui dentro de um tubo de diâmetro interno de 2,5 cm a 0,08 kg/s e o óleo flui no espaço circular entre o tubo interno e externo do trocador a 0,15 kg/s. Os coeficientes de transferência de calor são $h_{\text{água}} = 1000 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ e $h_{\text{óleo}} = 80 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$. As resistências de incrustação são $R_{\text{água}} = 0,00018 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$ e $R_{\text{óleo}} = 0,00016 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$. Determinar o comprimento deste tubo.



Trocadores de Calor

$$T_1 = 80 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$m = 0,15 \text{ kg/s}$$

$$h = 80 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$R = 0,00016 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

$$c_p = 2090 \text{ J/kg }^\circ\text{C}$$

$$T_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_2 = ?$$

$$m = 0,08 \text{ kg/s}$$

$$h = 1000 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$R = 0,00018 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

$$c_p = 4180 \text{ J/kg }^\circ\text{C}$$

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

$$Q = 0,1 \cdot 2090 \cdot (80 - 50)$$

$$Q = 9405 \text{ W}$$

Trocadores de Calor

$$9405 = 0,08 \cdot 4180 \cdot (T_2 - 20)$$

$$T_2 = 48,13^\circ C$$

$$\Delta T_{MLDT} = \frac{30 - 28,13}{\ln\left(\frac{30}{28,13}\right)} = 29,05^\circ C$$

Trocadores de Calor

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{\text{óleo}}} + R_{\text{óleo}} + R_{\text{água}} + \frac{1}{h_{\text{água}}}}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{80} + 0,00016 + 0,00018 + \frac{1}{1000}} = 72,25 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ } ^\circ \text{C}$$

Trocadores de Calor

$$9405 = 72,25 \cdot A \cdot 29,05$$

$$A = 4,48m^2$$

$$A = \pi \cdot D \cdot L$$

$$L = \frac{4,48}{\pi \cdot 0,025} = 57,04m$$