

# **TRANSMISSÃO DE CALOR II**

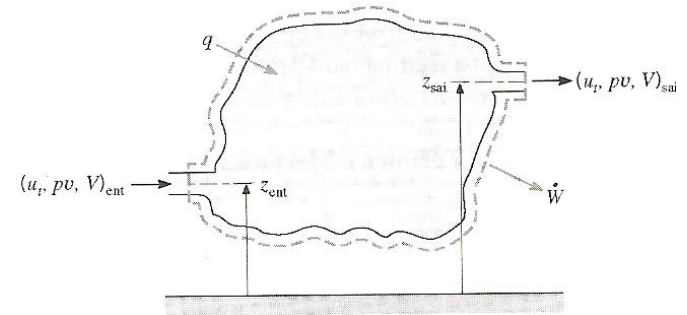
**Prof. Eduardo C. M. Loureiro, DSc.**

# TROCADORES DE CALOR

## ANÁLISE TÉRMICA

Equação da energia para processos contínuos em regime permanente:

$$q - \dot{W} = \dot{m} \left( u + pv + \frac{V^2}{2} + gz \right)_{ent} - \left( u + pv + \frac{V^2}{2} + gz \right)_{sai}$$

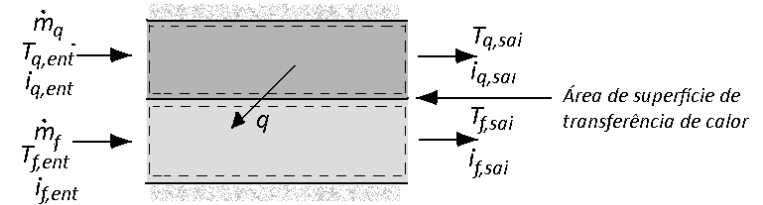


Se desprezamos a troca de calor entre o trocador de calor e a vizinhança, e as mudanças de energia potencial e cinética do sistema, temos:

$$q = \dot{m}_q (i_{q,ent} - i_{q,sai}) \quad \text{e} \quad q = \dot{m}_f (i_{f,sai} - i_{f,ent})$$

Onde  $i$  é a entalpia do fluido. Se os fluidos não passam por uma mudança de fase e se forem admitidos calores específicos constantes:

$$q = \dot{m}_q c_{p,q} (T_{q,ent} - T_{q,sai}) \quad \text{e} \quad q = \dot{m}_f c_{p,f} (T_{f,sai} - T_{f,ent})$$



Uma extensão da lei do resfriamento de Newton poderia ser aplicada à diferença de temperatura entre o fluido quente e o frio:

$$\Delta T = T_q - T_f \quad q = UA\Delta T_m$$

Onde  $U$  é o coeficiente global de transferência de calor,  $A$  é a área de transferência e  $\Delta T_m$  é uma média apropriada de diferenças de temperaturas, já que  $\Delta T$  varia com a posição no trocador de calor.

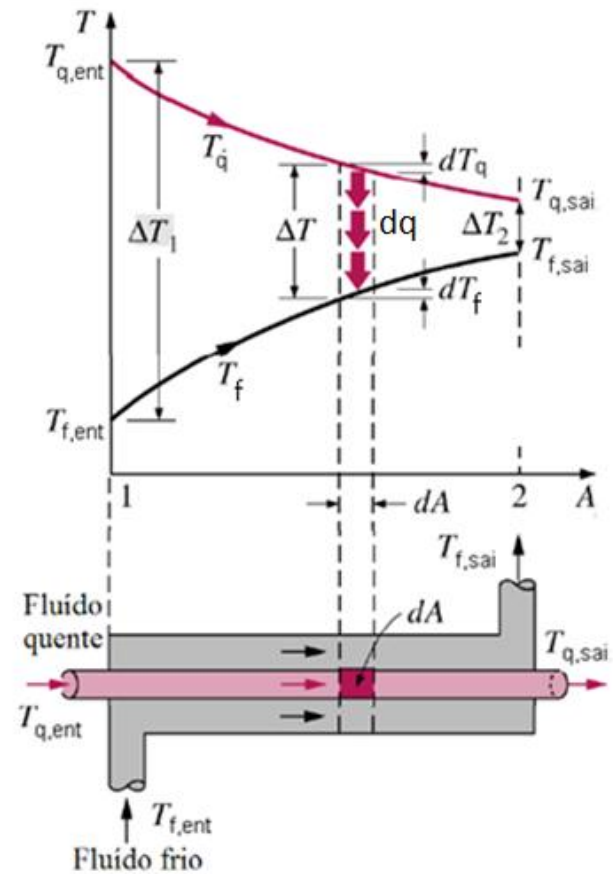


# TROCADORES DE CALOR

## ANÁLISE TÉRMICA

### TROCADOR DE CALOR COM ESCOAMENTO PARALELO

- Inicialmente a diferença de temperaturas é muito grande, mas diminui com o aumento de  $x$ ;
- A temperatura do fluido frio nunca vai ser superior à do fluido quente.



# TROCADORES DE CALOR

## ANÁLISE TÉRMICA

### TROCADOR DE CALOR COM ESCOAMENTO PARALELO

- Inicialmente a diferença de temperaturas é muito grande, mas diminui com o aumento de  $x$ ;
- A temperatura do fluido frio nunca vai ser superior à do fluido quente.

Pode-se fazer um balanço de energia nos elementos diferenciais nos fluidos quente e frio, sujeitos às seguintes considerações:

- O trocador de calor encontra-se isolado termicamente da vizinhança;
- A condução axial ao longo dos tubos é desprezível;
- Mudanças nas energias cinéticas e potencial são desprezíveis;
- Os calores específicos dos fluidos são constantes;
- O coeficiente global de transferência de calor é constante.

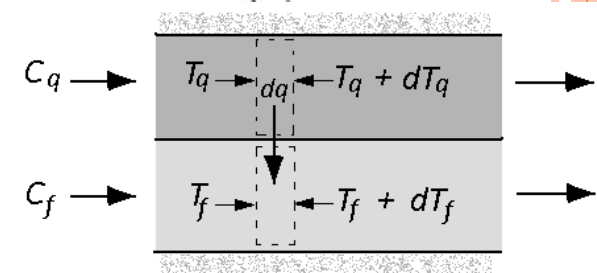
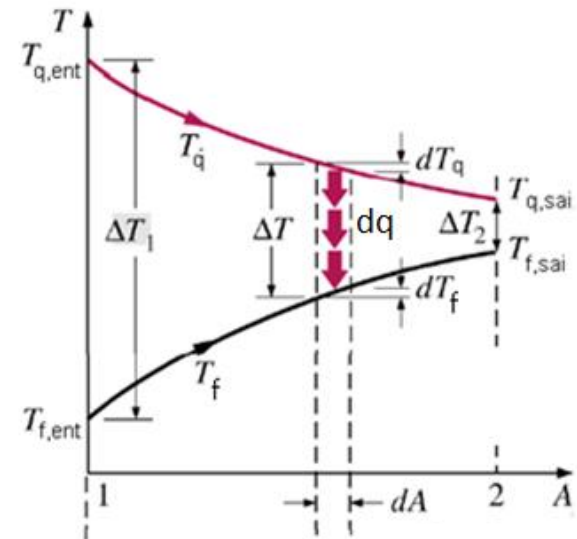
Aplicando-se um balanço de energia em cada um dos elementos diferenciais:

$$dq = -\dot{m}_q c_{p,q} dT_q = -C_q dT_q \qquad dq = \dot{m}_f c_{p,f} dT_f = C_f dT_f$$

Onde  $C_q$  e  $C_f$  são as *taxas de capacidade calorífica* dos fluidos quente e frio.

Estas expressões podem ser integradas ao longo do trocador de calor fornecendo os balanços de energia globais:

$$q = \dot{m}_q c_{p,q} (T_{q,ent} - T_{q,sai}) \qquad q = \dot{m}_f c_{p,f} (T_{f,sai} - T_{f,ent})$$



# TROCADORES DE CALOR

## ANÁLISE TÉRMICA

### TROCADOR DE CALOR COM ESCOAMENTO PARALELO

Repetindo as equações:

$$dq = -\dot{m}_q c_{p,q} dT_q = -C_q dT_q$$

$$dq = \dot{m}_f c_{p,f} dT_f = C_f dT_f$$

$$q = \dot{m}_q c_{p,q} (T_{q,ent} - T_{q,sai})$$

$$q = \dot{m}_f c_{p,f} (T_{f,sai} - T_{f,ent})$$

A transferência de calor através da área  $dA$  também pode ser descrita como:

$$dq = U \Delta T dA$$

$$\Delta T = T_q - T_f$$

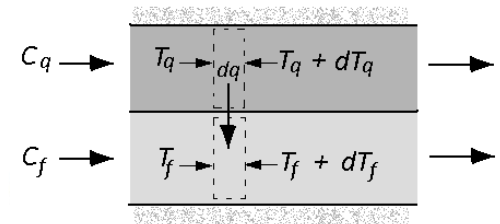
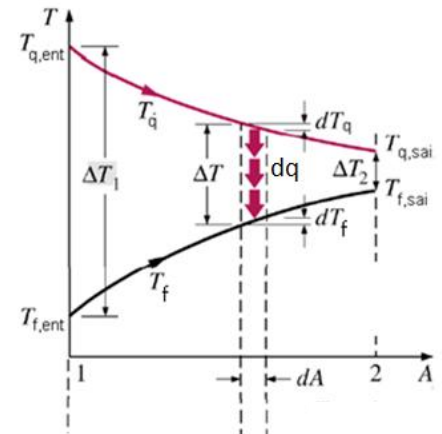
Na forma diferencial:

$$d(\Delta T) = dT_q - dT_f \quad \Rightarrow \quad d(\Delta T) = -dq \left( \frac{1}{C_q} + \frac{1}{C_f} \right) \quad \Rightarrow \quad dq = \frac{d(\Delta T)}{-\left( \frac{1}{C_q} + \frac{1}{C_f} \right)}$$

$$\int_1^2 \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -U \left( \frac{1}{C_q} + \frac{1}{C_f} \right) \int_1^2 dA \quad \Rightarrow \quad \ln \left( \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right) = -UA \left( \frac{1}{C_q} + \frac{1}{C_f} \right)$$

$$\ln \left( \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right) = -UA \left( \frac{T_{q,ent} - T_{q,sai}}{q} + \frac{T_{f,sai} - T_{f,ent}}{q} \right) = -\frac{UA}{q} [(T_{q,ent} - T_{f,ent}) - (T_{q,sai} - T_{f,sai})]$$

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



# TROCADORES DE CALOR

## ANÁLISE TÉRMICA

### TROCADOR DE CALOR COM ESCOAMENTO PARALELO

Então, chega-se à conclusão que a diferença de temperaturas média apropriada é uma média logarítmica das diferenças de temperatura:

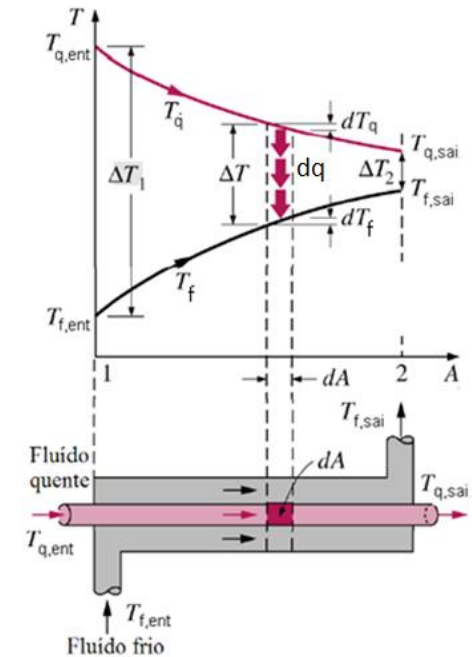
$$q = UA \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)}$$

ou

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

onde

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



### Escoamento paralelo

$$\Delta T_1 = T_{q,1} - T_{f,1} = T_{q,ent} - T_{f,ent}$$

$$\Delta T_2 = T_{q,2} - T_{f,2} = T_{q,sai} - T_{f,sai}$$

# TROCADORES DE CALOR

## ANÁLISE TÉRMICA

### TROCADOR DE CALOR COM ESCOAMENTO CONTRACORRENTE

- A variação na diferença de temperaturas ao longo de  $x$  não é, em posição alguma, tão grande quanto na região de entrada de um trocador com escoamento paralelo.
- A temperatura de saída do fluido frio pode, agora, ser maior que a temperatura de saída do fluido quente.

A partir de uma análise semelhante à feita para o trocador de calor de escoamento paralelo, pode-se mostrar que as equações abaixo também são válidas para os trocadores com escoamento contracorrente.

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

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

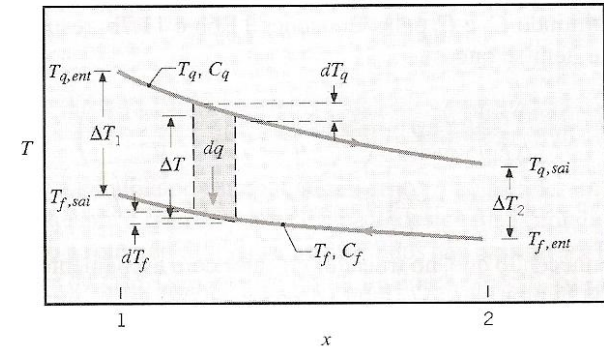
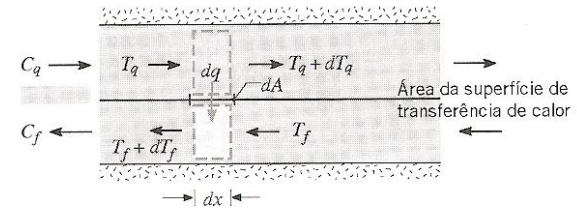
$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$$

ALTERA!

Escoamento contracorrente

$$\Delta T_1 = T_{q,1} - T_{f,1} = T_{q,ent} - T_{f,sai}$$

$$\Delta T_2 = T_{q,2} - T_{f,2} = T_{q,sai} - T_{f,ent}$$



# TROCADORES DE CALOR

## ANÁLISE TÉRMICA

### CONDIÇÕES OPERACIONAIS ESPECIAIS

- Quando o fluido quente possui uma taxa de capacidade calorífica muito maior que a do fluido frio, a temperatura do fluido quente permanece aproximadamente constante ao longo de todo o trocador de calor, enquanto a temperatura do fluido frio aumenta.

A mesma condição é alcançada se o fluido quente for um vapor condensando. A condensação acontece a uma temperatura constante e, para todas as finalidades práticas  $C_q \rightarrow \infty$



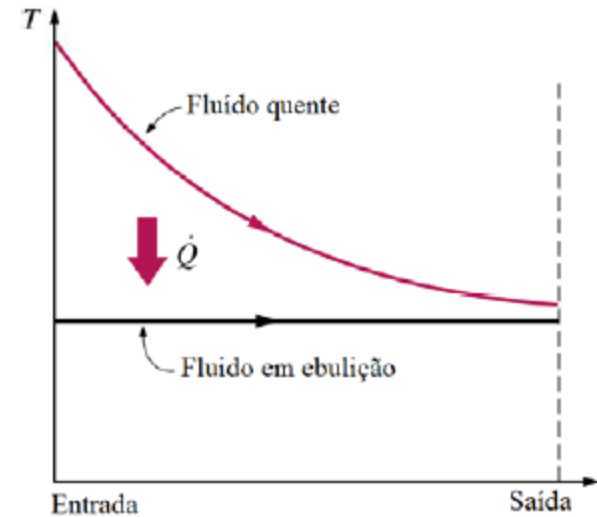


# TROCADORES DE CALOR

## ANÁLISE TÉRMICA

### CONDIÇÕES OPERACIONAIS ESPECIAIS

- Em um evaporador ou em uma caldeira, é o fluido frio que muda de fase e permanece a uma temperatura praticamente constante, neste caso,  $C_f \rightarrow \infty$ .
- O mesmo efeito é obtido sem mudança de fase se  $C_q \ll C_f$



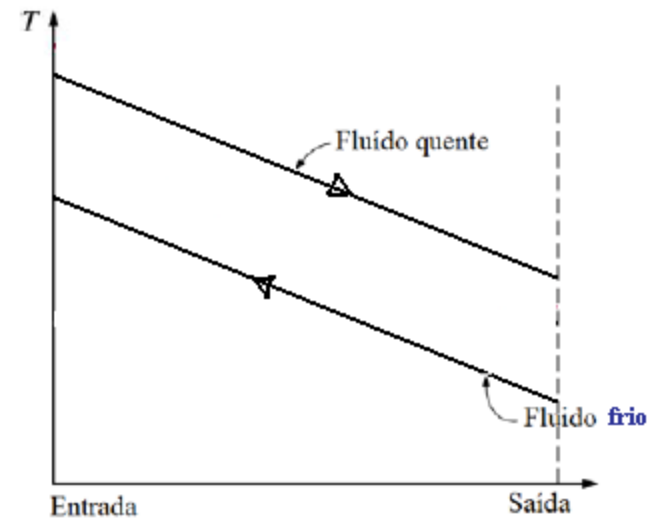
# TROCADORES DE CALOR

## ANÁLISE TÉRMICA

### CONDIÇÕES OPERACIONAIS ESPECIAIS

- Quando as taxas de capacidades caloríficas são iguais em um trocador de escoamento contracorrente o comportamento é o mostrado na figura. A diferença de temperatura deve ser então uma constante ao longo de todo o trocador.

$$\Delta T_1 = \Delta T_2 = \Delta T_{ml}$$



# TROCADORES DE CALOR

## EXEMPLO

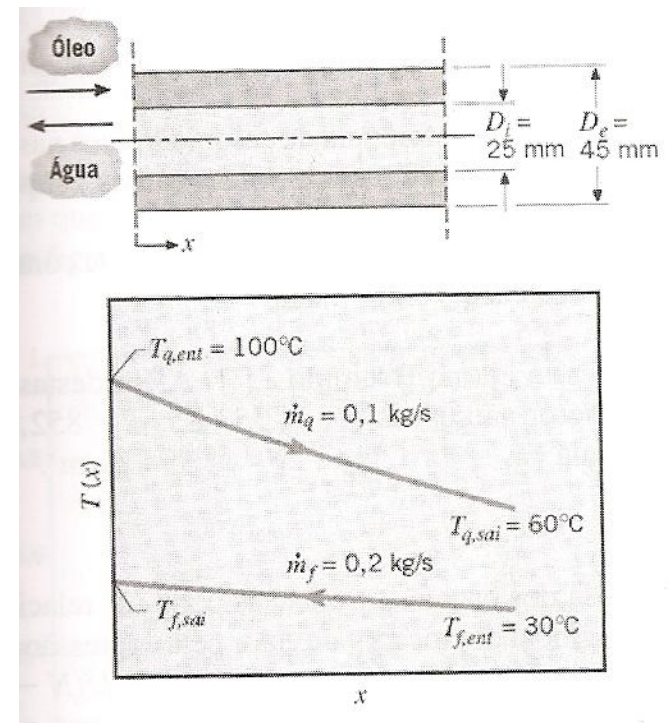
Um trocador de calor bitubular (tubos concêntricos) com configuração contracorrente é utilizado para resfriar o óleo lubrificante de um grande motor de turbina a gás industrial. A vazão mássica da água de resfriamento através do tubo interno ( $D_i = 25\text{mm}$ ) é de  $0,2\text{ kg/s}$ , enquanto que a vazão do óleo através da região anular ( $D_e = 45\text{mm}$ ) é de  $0,1\text{ kg/s}$ . O óleo e a água entram a temperaturas de  $100$  e  $30^\circ\text{C}$ , respectivamente. Qual deve ser o comprimento do trocador se a temperatura de saída do óleo deve ser de  $60^\circ\text{C}$ ?

DADOS:

$$U = 38,1\text{ W/m}^2\text{K};$$

$$\text{Óleo, } 80^\circ\text{C: } c_p = 2131\text{ J/kgK}$$

$$\text{Água, } 35^\circ\text{C: } c_p = 4178\text{ J/kgK}$$



# TROCADORES DE CALOR

## EXEMPLO

O trocador de calor do exemplo anterior é substituído por um trocador de placas, compacto, que é constituído por um conjunto de placas finas de metal, separadas por  $N$  espaços (canais) de espessura  $a$ . Os escoamentos de óleo e de água são subdivididos em  $N/2$  correntes individuais, com água e óleo escoando em sentidos opostos em canais alternados. É desejável que o conjunto tenha a forma cúbica, com uma dimensão característica externa igual a  $L$ . Determine as dimensões externas do trocador de calor como uma função do número de canais entre as placas, sendo as vazões, as temperaturas de entrada e a temperatura de saída do óleo desejada as mesmas do exemplo anterior. Compare as quedas de pressão nas correntes de óleo e de água no trocador de calor tipo placas com as quedas de pressão nas correntes do exemplo anterior, se forem especificados 60 canais entre placas.

