



ROTEIRO DO PROJETO: DIMENSIONAMENTO DE UM TROCADOR DE CALOR

1. OBJETIVOS DO PROJETO

- Comparar a área de troca térmica obtida a partir do dimensionamento usando a equação de projeto ($q = U \cdot A \cdot \Delta T_m \cdot F_{MLDT}$) com a área real (exemplo para trocador a placas: $A_{ftotal} = n^{\circ}_{placas} \cdot A_{fplaca}$) da empresa. A partir da comparação entre as áreas totais de troca de calor, pode-se discutir possíveis diferenças relacionadas à dissipação de calor e às incrustações do trocador de calor.
- Visualizar um trocador de calor em funcionamento dentro de empresas para que o contato entre a graduação e a indústria seja estreitado, além de colocar em prática o aprendizado vivenciado em sala de aula.

2. DADOS E QUESTÕES RELEVANTES

- a. Propriedades do alimento escolhido
- b. Fluxograma do processamento
- c. Quais as temperaturas de entrada e saída dos fluidos?
- d. Quais as vazões dos fluidos?
- e. Qual a área efetiva de cada placa térmica/tubo? (Pode ser obtida no catálogo do trocador de calor)
- f. Qual a quantidade de placas térmicas/tubos?
- g. Quais os números de passes dos fluidos?
- h. Qual a condutividade da placa térmica/tubo?
- i. De onde o produto é bombeado e por quantas placas ele passa?
- j. De quanto em quanto tempo realiza-se a limpeza do trocador de calor? Como é esse processo? A limpeza realizada é suficiente para retirar as incrustações?
- k. Tirar uma foto do trocador de calor

Se trocador a placas:

- l. Qual o fator de alargamento da área da placa (f_{AP})?
- m. Qual a largura entre as gaxetas da placa (w_g)?



- n. Qual a espessura da placa (e_p)?
- o. Quais os números de canais?
- p. Qual a espessura do canal (e_c)? (Necessário para calcular velocidade)

Se trocador casco e tubo:

- q. Qual o diâmetro do casco?
- r. Qual o diâmetro do tubo (interno e externo)?
- s. Quais os passos entre as chicanas (se aplicável) e os passos entre os centros do tubo?
- t. Qual a área de escoamento na janela (se aplicável)?

3. CÁLCULO DA ÁREA EFETIVA DE TROCA TÉRMICA TEÓRICA

I) Trocador de calor a placas

a. Cálculo da velocidade

Primeiramente, é necessário realizar o cálculo do diâmetro hidráulico, conforme Equação 1.

$$D_h = \frac{2e_c}{f_{AP}} \quad \text{Equação 1.}$$

Em seguida, deve ser realizado o cálculo da área de seção transversal, conforme Equação 2.

$$A_s = e_c \cdot w_g \quad \text{Equação 2.}$$

Para calcular a velocidade de cada fluido deve ser utilizada a Equação 3, na qual Q é a vazão volumétrica de cada fluido, n_c é o número de canais totais e n_p é o número de passes.

$$v = \frac{Q}{\frac{n_c}{n_p} A_s} \quad \text{Equação 3.}$$

b. Cálculo dos números adimensionais

Para o cálculo do número de Reynolds utiliza-se a Equação 4 e para o cálculo do número de Prandtl utiliza-se a Equação 5.

Equação 4.



$$N_{Re} = \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu}$$

$$Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{k} \quad \text{Equação 5.}$$

Para o cálculo de Nusselt utiliza-se a Equação 6 e para encontrar o valor do coeficiente convectivo de troca térmica utiliza-se a Equação 7. Os valores b_1 e b_2 podem ser encontrados na tabela 10.3. sendo que esses são valores dependentes do número de Reynolds e do ângulo da placa térmica.

$$Nu = b_1 Re^{b_2} Pr^{0,33} (\mu/\mu_p)^{0,14} \quad \text{Equação 6.}$$

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} \quad \text{Equação 7.}$$

Tabela 10.3 Parâmetros de troca térmica para um trocador de calor de placas com padrão espinha de peixe

ϕ	N_{Re}	b_1	b_2
$\leq 30^\circ$	≤ 10	0,718	0,349
	> 10	0,348	0,663
45°	< 10	0,718	0,349
	10 – 100	0,400	0,598
	> 100	0,300	0,663
50°	< 20	0,630	0,333
	20 – 300	0,291	0,591
	> 300	0,130	0,732
60°	< 20	0,562	0,326
	20 – 400	0,306	0,529
	> 400	0,108	0,703
$\geq 65^\circ$	< 20	0,562	0,326
	20 – 500	0,331	0,503
	> 500	0,087	0,718

Fonte: Saunders (1988).



c. Cálculo do coeficiente global de troca térmica

Após o cálculo dos coeficientes convectivos de troca térmica frio e quente, deve ser realizado o cálculo do coeficiente global de troca térmica limpo conforme a Equação 8. Para realizar o cálculo do coeficiente global de troca térmica sujo deve-se pesquisar na teoria (tabelas ou exercícios fornecidos em sala de aula) os valores das resistências para os fluidos utilizados na indústria em questão. Prosseguir com o cálculo do U_{sujo} conforme a Equação 9.

$$\frac{1}{U \cdot A} = \frac{1}{h_f \cdot A_f} + \frac{e}{k \cdot A} + \frac{1}{h_q \cdot A_q} \quad \text{Equação 8.}$$

$$\frac{1}{U \cdot A} = \frac{1}{h_f \cdot A_f} + \frac{e}{k \cdot A} + \frac{1}{h_q \cdot A_q} + \frac{R_{incf}}{A_f} + \frac{R_{incq}}{A_q} \quad \text{Equação 9.}$$

d. Cálculo da temperatura média logarítmica

A partir da Equação 10 o cálculo de ΔT_m deverá ser realizado, levando em conta a conformação do trocador de calor: contracorrente ou concorrente.

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)} \quad \text{Equação 10.}$$

e. Cálculo da área efetiva de troca térmica

Para o cálculo da área efetiva de troca térmica, deverá ser calculado a carga térmica (q), conforme a Equação 11. Lembrando que a Equação 11 vale tanto para os dados do fluido quente quanto para o fluido frio, já que teoricamente eles são iguais: $q_q = q_f$.

$$q_q = m_q C_{p,q} \Delta T_q \quad \text{Equação 11.}$$

Para proceder com o cálculo da área efetiva de troca térmica da placa deverá ser utilizada a Equação 12 (equação de projeto) tanto para U_{limpo} quanto para U_{sujo} . F_{MLDT} deverá ser obtido a partir dos gráficos disponibilizados nos arquivos dados em aula.

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T_m F_{MLDT} \quad \text{Equação 12.}$$



II) Trocador de calor casco e tubo

a. Cálculo da velocidade

Para o cálculo da velocidade é necessário primeiramente calcular as áreas de seção transversal do escoamento do tubo e do escoamento do casco, sendo que a área da seção transversal do casco deve ser calculada conforme a Equação 13.

$$A_s = \sqrt{A_{c1} \cdot A_{c2}} \quad \text{Equação 13.}$$

Sendo que A_{c1} deve ser calculada conforme a Equação 14 e A_{c2} conforme a Equação 15, em que D_c é o diâmetro do casco, D_{ext} é o diâmetro externo do tubo, S_c é o passo entre as chicanas, S_t é o passo entre o centro dos tubos e A_{janela} é a área da janela do casco (sem as chicanas).

$$A_{c1} = A_{janela} - n^{\circ}_{tubos} \cdot \pi \cdot \frac{D_{ext}^2}{4} \quad \text{Equação 14.}$$

$$A_{c2} = S_c \cdot D_c \cdot (1 - D_{ext}/S_t) \quad \text{Equação 15.}$$

A área da seção transversal do tubo deve ser calculada conforme a Equação 16, em que D_{int} é o diâmetro interno do tubo.

$$A_s = \pi \cdot \frac{D_{int}^2}{4} \cdot n^{\circ}_{tubos} \quad \text{Equação 16.}$$

Para calcular a velocidade deve ser utilizada a Equação 17, em que Q é a vazão volumétrica do fluido.

$$v = \frac{Q}{A_s} \quad \text{Equação 17.}$$

b. Cálculo dos números adimensionais

Para o cálculo do número de Reynolds utiliza-se a Equação 4 e para o cálculo do número de Prandtl utiliza-se a Equação 5, exibidas anteriormente.

Para o cálculo de Nusselt existem diversas correlações que podem ser visualizadas na Tabela 8.4. A sua utilização vai depender dos valores dos números adimensionais Reynolds e Prandtl. Para o cálculo do coeficiente convectivo de troca térmica, utiliza-se a Equação 7 exibida anteriormente.

TABELA 8.4 Resumo das correlações de convecção para escoamento em um tubo circular^{a,b,c}

CORRELAÇÃO		CONDIÇÕES
$f = 64/Re_D$	(8.19)	Laminar, plenamente desenvolvido
$Nu_D = 4,36$	(8.53)	Laminar, plenamente desenvolvido, q_w^* uniforme, $Pr \geq 0,6$
$Nu_D = 3,66$	(8.55)	Laminar, plenamente desenvolvido, T_w uniforme, $Pr \geq 0,6$
$\overline{Nu}_D = 3,66 + \frac{0,0668(D/L)Re_D Pr}{1 + 0,04[(D/L)Re_D Pr]^{1/3}}$	(8.56)	Laminar, comprimento térmico de entrada ($Pr \geq 1$ ou um comprimento inicial não-aquecido), T_w uniforme
ou		
$\overline{Nu}_D = 1,86 \left(\frac{Re_D Pr}{L/D} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0,14}$	(8.57)	Laminar, comprimento de entrada combinado $\{ [Re_D Pr (L/D)^{1/3} (\mu/\mu_s)^{0,14}] \geq 2, T_w$ uniforme, $0,48 < Pr < 16.700, 0,0044 < (\mu/\mu_s) < 9,75$
$f = 0,316 Re_D^{-1/4}$	(8.20a) ^c	Turbulento, plenamente desenvolvido, $Re_D \leq 2 \times 10^4$
$f = 0,184 Re_D^{-1/5}$	(8.20b) ^c	Turbulento, plenamente desenvolvido, $Re_D \geq 2 \times 10^4$
ou		
$f = (0,790 \ln Re_D - 1,64)^{-2}$	(8.21) ^c	Turbulento, plenamente desenvolvido, $3000 \leq Re_D \leq 5 \times 10^6$
$Nu_D = 0,023 Re_D^{1/2} Pr^{1/4}$	(8.60) ^c	Turbulento, plenamente desenvolvido, $0,6 \leq Pr \leq 160, Re_D \geq 10.000, (L/D) \geq 10, n = 0,4$ para $T_w > T_m$ e $n = 0,3$ para $T_w < T_m$
ou		
$Nu_D = 0,027 Re_D^{1/2} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0,14}$	(8.61) ^c	Turbulento, plenamente desenvolvido, $0,7 \leq Pr \leq 16.700, Re_D \geq 10.000, (L/D) \geq 10$
ou		
$Nu_D = \frac{(f/8)(Re_D - 1000)Pr}{1 + 12, \frac{(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)}$	(8.63) ^c	Turbulento, plenamente desenvolvido, $0,5 < Pr < 2000, 3000 \leq Re_D \leq 5 \times 10^6, (L/D) \geq 10$
$Nu_D = 4,82 + 0,0185(Re_D Pr)^{0,827}$	(8.65)	Metais líquidos, turbulento, plenamente desenvolvido, q_w^* uniforme, $3,6 \times 10^3 < Re_D < 9,05 \times 10^5, 10^2 < Pr < 10^6$
$Nu_D = 5,0 + 0,025(Re_D Pr)^{0,827}$	(8.66)	Metais líquidos, turbulento, plenamente desenvolvido, T_w uniforme, $Pr > 100$

c. Cálculo do coeficiente global de troca térmica

Após o cálculo dos coeficientes convectivos de troca térmica frio e quente, deve ser realizado o cálculo do coeficiente global de troca térmica conforme a Equação 18. Para realizar o cálculo do coeficiente global de troca térmica sujo deve-se pesquisar na teoria (tabelas ou exercícios fornecidos em sala de aula) os valores das resistências para os fluidos utilizados na indústria em questão. Prosseguir com o cálculo do U_{sujo} conforme a Equação 19, na qual A_{\ln} é a área média logarítmica.

$$\frac{1}{U \cdot A} = \frac{1}{h_q \cdot A_q} + \frac{e}{k \cdot A_{\ln}} + \frac{1}{h_f \cdot A_f} \quad \text{Equação 18.}$$

$$\frac{1}{U \cdot A} = \frac{1}{h_q \cdot A_q} + \frac{e}{k \cdot A_{\ln}} + \frac{1}{h_f \cdot A_f} + \frac{R_{\text{inc}f}}{A_f} + \frac{R_{\text{inc}q}}{A_q} \quad \text{Equação 19.}$$



d. Cálculo da temperatura média logarítmica

A partir da Equação 10 o cálculo de ΔT_m deverá ser realizado, levando em conta a conformação do trocador de calor.

e. Cálculo da área efetiva de troca térmica

Para o cálculo da área efetiva de troca térmica, deverá ser calculado a carga térmica (q), conforme a Equação 11. Lembrando que a Equação 11 vale tanto para os dados do fluido quente quanto para o fluido frio, já que teoricamente eles são iguais: $q_q = q_f$. Para proceder com o cálculo da área efetiva de troca térmica da placa deverá ser utilizada a Equação 12, tanto para U_{suj} quanto para o U_{limpo} . Lembrando que F_{MLDT} deverá ser obtido a partir dos gráficos disponibilizados nos arquivos dados em aula.