

5.4 EXEMPLO

Dimensionar um trocador de calor para resfriar 110.668 lbm/h de gasolina de 219°F até 100°F com água a 86°F aquecendo até 100°F . A pressão de operação da gasolina é 162 psi e a da água 88 psi.

Solução:

5.4.1 DADOS INICIAIS

Fluido	Vazão (lbm/h)	T_1 ($^\circ\text{C}$)	T_2 ($^\circ\text{C}$)	P_{op} (psi)	ΔP (psi)
Gasolina	110.668	219	100	162	20
Água	?	86	100	88	10

5.4.2 LOCALIZAÇÃO DOS FLUIDOS

água de resfriamento \Rightarrow no lado dos tubos

gasolina \Rightarrow no lado do casco

5.4.3 PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS FLUIDOS

Obs: Como os dados iniciais fornecem as temperaturas de entrada e saída dos dois fluidos é possível determinar a temperatura média de cada fluido e as propriedades, caso contrário seria necessário realizar primeiro o balanço de calor.

Fluido	Gasolina	Água
Temperatura média ($^\circ\text{C}$)	159,6	93
Massa específica (lbm/ft^3)	46,85	62,24
Calor específico ($\text{BTU/lbm.}^\circ\text{F}$)	0,52	0,998
Condutividade térmica ($\text{BTU/h.ft.}^\circ\text{F}$)	0,07	0,34
Viscosidade dinâmica (lbm/ft.h)	0,91 (0,38 cp)	1,69 (0,7 cp)
Fator de incrustação ($\text{h.ft}^2.\text{}^\circ\text{F/BTU}$)	0,003	0,002

5.4.4 BALANÇO DE CALOR

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_c \cdot C_{p_c} \cdot \Delta T_c = \dot{Q}_t = \dot{m}_t \cdot C_{p_t} \cdot \Delta T_t$$

$$\dot{Q}_c = 110668 \times 0,52 \times (219 - 100)$$

$$\dot{Q}_c = 6848136 \text{ BTU/h}$$

$$\dot{m}_t = \frac{\dot{Q}_t}{C_{p_t} \cdot (t_2 - t_1)} = \frac{6848136}{0,998 \times (100 - 86)} = 490132 \text{ lbm/h}$$

5.4.5 PRESSÕES E TEMPERATURAS DE PROJETOCasco

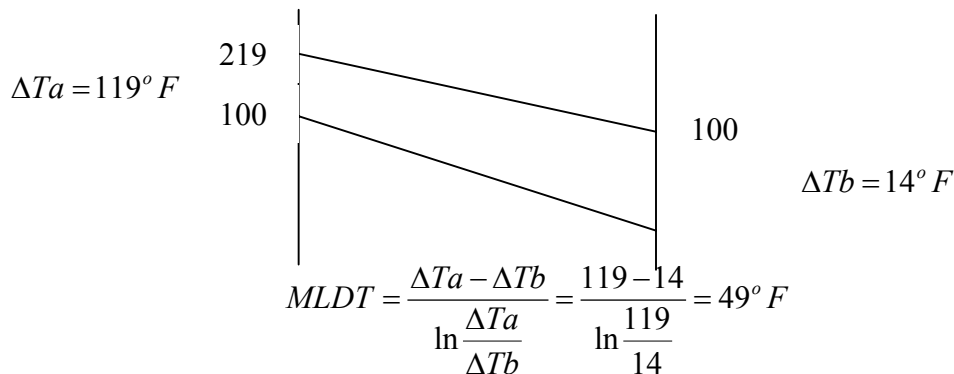
$$P_p = 20\% \text{ maior do que a pressão de operação} = 1,2 \times 162 = 194 \text{ psi}$$

$$T_p = 50^\circ F \text{ maior do que a maior temperatura de operação} = 219 + 50 = 269^\circ F$$

Tubos

$$P_p = 20\% \text{ maior do que a pressão de operação} = 1,2 \times 88 = 105 \text{ psi}$$

$$T_p = 50^\circ F \text{ maior do que a maior temperatura de operação} = 100 + 50 = 150^\circ F$$

5.4.6 CÁLCULO DA ΔT_m **5.4.6.1 Média logarítmica das diferenças de temperatura (MLDT)****5.4.6.2 Escolha do tipo de trocador**

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} = \frac{100 - 86}{219 - 86} = 0,1$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = \frac{219 - 100}{100 - 86} = 8,5$$

Da Figura 5.16, $F = 0,83 \Rightarrow$ 1 trajeto no casco e 2,4,6 ou mais nos tubos.

5.4.6.3 Cálculo da diferença de temperatura média ΔT_m

$$\Delta T_m = F \times MLDT = 0,83 \times 49 = 40,7^\circ F$$

5.4.6.4 Verificação da necessidade de cabeçote flutuante

$T_c - \frac{T_t + T_c}{2} = 159,6 - \frac{93 + 159,6}{2} = 33,3^\circ F < 50^\circ F \Rightarrow$ não é necessário o uso de cabeçote flutuante devido à diferença de temperatura, mas como $R_{de} > 0,002$, então usar cabeçote flutuante

Tipo construtivo AES

5.4.7 DIMENSIONAMENTO DOS BOCAIS

Tubos

$$D_{b\ min} = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{m}_t}{\rho_t \cdot \pi \cdot V_{m\acute{a}x}}} = \sqrt{\frac{4 \times 490132}{62,24 \times \pi \times 10 \times 3600}} = 0,528\ p\acute{e}s = 6,33\ pol$$

$$V_{m\acute{a}x} = 10\ \frac{ft}{s}$$

$$D_{bt1} = D_{bt2} = 10\ pol$$

Casco

$$V_{m\acute{a}x} = \sqrt{\frac{3000}{\rho_c}} = \sqrt{\frac{3000}{46,85}} = 8\ p\acute{e}s/s$$

$$D_{b\ min} = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{m}_c}{\rho_c \cdot \pi \cdot V_{m\acute{a}x}}} = \sqrt{\frac{4 \times 110668}{46,85 \times \pi \times 8 \times 3600}} = 0,32\ p\acute{e}s = 3,88\ pol$$

$$D_{bc1} = D_{bc2} = 6\ pol$$

5.4.8 ESTIMATIVA DA ÁREA DE TROCA TÉRMICA**5.4.8.1 U estimado**

O valor de U é estimado de acordo com a Tabela 5.7.

Líquido orgânico leve e água $\Rightarrow U = 125$ a $175\ \frac{BTU}{h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F}$ e $\sum R_d = 0,0015\ \frac{h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F}{BTU}$

$$U = 125 = \frac{1}{\frac{1}{U_i} + 0,0015} \Rightarrow U_i = 153,84$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{153,84} + 0,003 + 0,002} = 87\ \frac{BTU}{h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F}$$

5.4.8.2 Área estimada

$$A = \frac{\dot{Q}}{U \cdot \Delta T_m} = \frac{6848136}{87 \times 40,7} = 1934\ p\acute{e}^2$$

5.4.8.3 Geometria adotada para o lado dos tubos

$$L = 20 \text{ pés} \quad de = \frac{3}{4} = 0,75 \text{ pol} \quad \text{BWG 14} \quad di = 0,584 \text{ pol}$$

como $R_{de} > 0,002$ usar arranjo □ (quadrado) com passo $s = 1 \text{ pol}$

Material dos tubos = latão.

5.4.8.4 Número de tubos

$$n = \frac{A}{\pi \cdot de \cdot (L - 2e)} = \frac{1934}{\pi \cdot \frac{0,75}{12} \left(20 - \frac{2 \cdot 2}{12} \right)} = 500 \text{ tubos}$$

Obs: e = espessura dos espelhos, foi estimado 2 pol e deve ser verificado no projeto mecânico.

5.4.8.5 Número de tubos adotado e área disponível

Adotando, inicialmente, um trocador com um número de trajetos nos tubos igual a 2 ($N_t = 2$), da tabela de distribuição de tubos de Perry (1980), obtém-se para $de = 0,75 \text{ pol}$, $s = 1 \text{ pol}$ □, cabeçote TEMA S, $N_t = 2$, resulta $n = 532 \text{ tubos}$ e $Di = 29 \text{ pol}$

$$A = n \cdot \pi \cdot de \cdot (L - 2e) = 532 \cdot \pi \cdot \frac{0,75}{12} \left(20 - \frac{2 \cdot 2}{12} \right) = 2054 \text{ pés}^2$$

VERIFICAÇÃO DA GEOMETRIA PROPOSTA**5.4.9 COEFICIENTE DE PELÍCULA DENTRO DOS TUBOS**

$$V_t = \frac{\dot{m}_t}{\rho_t \frac{n}{N_t} \frac{\pi \cdot di^2}{4}} = \frac{490132}{62,24 \frac{532}{2} \frac{\pi (0,584)^2}{4 \cdot 144}} = 4,42 \text{ pés/s}$$

$$Re_t = \frac{\rho_t \cdot V_t \cdot di}{\mu_t} = \frac{62,24 \cdot 4,42 \cdot 0,584 \cdot 3600}{1,69 \cdot 12} = 28519 \Rightarrow \text{escoamento turbulento}$$

para o coeficiente de película interno ao tubo será utilizada a equação de Dittus-Boelter.

$$Pr_t = \frac{\mu_t \cdot Cp_t}{k_t} = \frac{1,69 \cdot 0,998}{0,34} = 4,96$$

$$Nu_t = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} = 0,023 \cdot (28519)^{0,8} (4,96)^{0,4} = 160$$

$$hi = \frac{Nu_t \cdot k_t}{di} = \frac{160 \cdot 0,34 \cdot 12}{0,584} = 1117,8 \text{ BTU/h.ft}^2 \cdot ^\circ F$$

5.4.10 PERDA DE CARGA NO LADO DOS TUBOS**5.4.10.1 ΔP nos bocais**

$$V_{bt} = \frac{4 \cdot \dot{m}_t}{\rho_t \cdot \pi \cdot D_{bt}^2} = \frac{4 \cdot 490132 \cdot 144}{62,24 \cdot \pi \cdot 10^2} = 4,01 \text{ pés}$$

$$\Delta P_{bt} = 1,8 \frac{\rho_t \cdot V_{bt}^2}{2} = 1,8 \frac{62,24 \cdot 4,01^2}{2 \cdot 32,2 \cdot 144} = 0,193 \text{ psi}$$

5.4.10.2 ΔP na contração, expansão e retorno no cabeçote

$$\Delta P_{cer} = 1,6 \frac{N_t \cdot \rho_t \cdot V_t^2}{2} = 1,6 \frac{2 \cdot 62,24 \cdot 4,42^2}{2 \cdot 32,2 \cdot 144} = 0,419 \text{ psi}$$

5.4.10.3 ΔP linear

Obs: Tubos de cobre e ligas $\Rightarrow E=0,000005$ pé

Fator de atrito de Churchill

$$A = \left(2,457 \ln \left(\frac{1}{\left(\frac{7}{Re} \right)^{0,9} + \frac{0,27 E}{di}} \right) \right)^{16} = \left(2,457 \ln \left(\frac{1}{\left(\frac{7}{28519} \right)^{0,9} + \frac{0,27 \cdot 0,000005}{0,584/12}} \right) \right)^{16} = 1,532 \cdot 10^{20}$$

$$B = \left(\frac{37530}{Re} \right)^{16} = \left(\frac{37530}{28519} \right)^{16} = 80,89$$

$$f_c = \left(\left(\frac{8}{Re} \right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^{3/2}} \right)^{1/2} = \left(\left(\frac{8}{28519} \right)^{12} + \frac{1}{(1,532 \cdot 10^{20} + 80,89)^{3/2}} \right)^{1/2} = 0,003$$

5.4.10.3.1 Correção do fator de atrito devido ao escoamento não isotérmico

$$T_{ii} = T_t + U \left(R_{di} + \frac{1}{hi} \right) \frac{de}{di} (T_c - T_t) = 93 + 87 \left(0,002 + \frac{1}{1117,8} \right) \frac{0,75}{0,584} (159,5 - 93) = 114,5^\circ F$$

5.4.10.3.2 Viscosidade da água na $T_{ii} \Rightarrow \mu_{ii} = 0,97$

$$\alpha = \left(\frac{\mu_{ii}}{\mu_t} \right)^{0,14} = \left(\frac{0,97}{1,69} \right)^{0,14} = 0,925$$

5.4.10.3.3 Fator de atrito corrigido

$$f' = \alpha \cdot f = 0,925 \cdot 0,003 = 0,00278$$

5.4.10.3.4 Cálculo da perda de carga linear

$$\Delta P_l = f_D \frac{L}{di} \frac{\rho_t V_t^2}{2} N_t = (8 \cdot 0,00278) \frac{20 \cdot 12}{0,584} \frac{62,24 \cdot 4,42^2}{2 \cdot 32,2 \cdot 144} = 2,4 \text{ psi}$$

5.4.10.3.5 Correção da perda de carga devido à formação de depósitos (Tabela 5.11)

$$\Delta P_l = 1,20 \cdot 2,40 = 2,88 \text{ psi}$$

5.4.10.3.6 Perda de carga total nos tubos

$$\Delta P_t = N_c (\Delta P_{bocais} + \Delta P_{contr,exp,cabeç} + \Delta P_f) = 0,193 + 0,419 + 2,88$$

$$\Delta P_t = 3,49$$

Obs: neste ponto deveria ser alterada a geometria no lado dos tubos para elevar o valor da perda de carga que tem como limite o valor de 10 psi. Mas como o coeficiente de película nos tubos está elevado, prosseguiremos o cálculo.

5.4.11 GEOMETRIA DO LADO DO CASCO

$Di = 29$ pol $de = 0,75$ pol $s_{\square} = 1$ pol TEMA – AES

A relação $\frac{L}{Di} = \frac{20 \cdot 12}{29} = 8,3 : 1$ próximo aos valores recomendados.

5.4.11.1 Número aproximado de tubos na fileira central

$$n_c = 1,19\sqrt{n} = 1,19 \cdot \sqrt{532} = 27,45$$

5.4.11.2 Diâmetro do feixe de tubos D_f

$$D_f = (n_c - 1)s + de = (27,45 - 1) \cdot 1 + 0,75 = 27,2 \text{ pol}$$

5.4.11.3 Espaçamento das chicanas na entrada e saída (Figuras 5.17 e 5.18)

$l_{1f} = 7,3 \text{ pol}$ e $l_{2f} = 12 \text{ pol}$

$$l_{1min} = D_{bc1} + l_{1f} = 6 + 7,3 = 13,3 \text{ pol}$$

$$l_{2min} = D_{bc2} + l_{2f} = 6 + 12 = 18 \text{ pol}$$

5.4.11.4 Corte da chicana

Escolhendo o corte da chicana $\frac{H}{Di} = 25\% \Rightarrow$ corresponde a $\frac{Di}{l} = 2$, logo:

$$l = \frac{Di}{2} = \frac{29}{2} = 14,5 \text{ pol}$$

5.4.11.5 Número de chicanas

Adotando $l_1 = 14 \text{ pol}$ e $l_2 = 19 \text{ pol}$, para que o número de chicanas resulte um número inteiro.

$$N_B = \frac{L - l_1 - l_2}{l} + 1 = \frac{(20 \cdot 12 - 2 \cdot 2) - 14 - 19}{14,5} + 1 = 15$$

5.4.12 CÁLCULO DA PERDA DE CARGA DO LADO DO CASCO

5.4.12.1 Variáveis auxiliares

Da Figura 5.14, com $\frac{H}{Di} = 25\%$ e $\frac{s}{de} = \frac{1}{0,75} = 1,33$, se obtém: $Y = 5,1$ e $N_p = 0,23$

Da Tabela 5.10, $C_x = 1,0$, $C_b = 0,97$ (seção 5.3.2.1)

$$C_a = C_b \frac{s - de}{s} = 0,97 \frac{1 - 0,75}{1} = 0,2425$$

$$S_c = C_a l D_f = 0,2425 \cdot 14,5 \cdot 27,2 = 95,64 \text{ pol}^2$$

$$F_p = \frac{1}{0,8 + N_p \sqrt{\frac{D_i}{s}}} = \frac{1}{0,8 + 0,23 \sqrt{\frac{29}{1}}} = 0,49$$

5.4.12.2 Área de escoamento no casco

$$S_{cf} = \frac{S_c}{F_p} = \frac{95,64}{0,49} = 195,19 \text{ pol}^2$$

5.4.12.3 Vazão mássica no casco

$$G_{cf} = \frac{\dot{m}_c}{S_{cf}} = \frac{110668 \cdot 144}{195,19} = 81644,5 \text{ lbm/h.pé}^2$$

5.4.12.4 Número de Reynolds no casco

$$Re_p = \frac{G_{cf} de}{\mu_c} = \frac{81644,5 \cdot 0,75}{0,91 \cdot 12} = 5607,4$$

5.4.12.5 Fator de atrito no casco

Da Figura 5.14, em função de Re e s/de , $f_c = 0,47$

5.4.12.6 Correção do fator de atrito no casco para escoamento não isotérmico.

Considerando a temperatura da parede interna do tubo aproximadamente igual a temperatura da superfície externa $T_{te} = 114,5^\circ F$

$$\left(\frac{\mu_{te}}{\mu_c}\right)^{0,14} = \left(\frac{1,1}{0,91}\right)^{0,14} = 1,027$$

5.4.12.7 Perda de carga no casco

$$\Delta P_c = 4f_c \frac{G_{cf}^2}{2\rho_c} Cx \left(1 - \frac{H}{Di}\right) \frac{Di}{s} N_B \left(1 + \frac{Ys}{Di}\right) \left(\frac{\mu_{te}}{\mu_c}\right)^{0,14}$$

$$\Delta P_c = 4 \cdot 0,47 \frac{81644,5^2}{2 \cdot 46,85 \cdot 32,2 \cdot 144 \cdot 3600^2} 1 \cdot (1 - 0,25) \frac{29}{1} (15 + 1) \left(1 + \frac{5,1 \cdot 1}{29}\right) 1,027 = 0,94 \text{ psi}$$

5.4.12.8 Perda de carga nos bocais do casco

$$V_{bc} = \frac{\dot{m}_c}{\rho_c \frac{\pi D_c^2}{4}} = \frac{4 \cdot 110668}{46,85 \cdot \pi \cdot \left(\frac{6}{12}\right)^2 \cdot 3600} = 3,34 \text{ pé/s}$$

$$\frac{\mu_c}{\rho_c \cdot D_{bc}} = \frac{0,91}{46,85 \cdot 6} = 0,0013 \cong 0$$

da figura 5.22, obtém-se $Z = 0,34$

$$\Delta P_{bocal} = \rho_c g Z = \frac{46,85 \cdot 32,2 \cdot 0,34}{32,2 \cdot 144} = 0,111 \text{ psi}$$

5.4.12.9 Perda de carga total no casco

$$\Delta P_{c_{total}} = (\Delta P_c + \Delta P_{b1} + \Delta P_{b2}) N_c = (0,94 + 0,111 + 0,111) \cdot 1 = 1,162$$

Obs: A perda de carga está muito abaixo da permitida (20 psi). Devemos alterar a geometria do casco. Continuaremos o cálculo e faremos as alterações necessárias na segunda iteração.

5.4.13 COEFICIENTE DE PELÍCULA DO LADO DO CASCO

5.4.13.1 Variáveis auxiliares

Em função de $\frac{H}{Di} = 25\%$ e $\frac{s}{de} = \frac{1}{0,75} = 1,333$, se obtém na Figura 5.14 $M = 0,96$ e

$$N_h = 0,41$$

$$F_h = \frac{1}{1 + N_h \sqrt{\frac{Di}{s}}} = \frac{1}{1 + 0,41 \sqrt{\frac{29}{1}}} = 0,311$$

5.4.13.2 Área de escoamento no casco

$$S_{ch} = \frac{S_c M}{F_h} = \frac{95,64 \cdot 0,96}{0,311} = 295,22 \text{ pol}^2$$

5.4.13.3 Vazão mássica no casco

$$G_{ch} = \frac{\dot{m}_c}{S_{ch}} = \frac{110668 \cdot 144}{295,22} = 53980,73 \text{ lbm/h.pé}^2$$

5.4.13.4 Número de Reynolds no casco

$$Re_h = \frac{G_{ch} \cdot de}{\mu_c} = \frac{53980,73 \cdot 0,75}{0,91 \cdot 12} = 3707,5$$

5.4.13.5 Coeficiente de película no casco

Da Figura 5.14

$$j_h = \frac{Nu}{Pr^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu_c}{\mu_{re}}\right)^{0,14}} = 40$$

$$Pr = \frac{\mu_c \cdot Cp_c}{k_c} = \frac{0,91 \cdot 0,52}{0,07} = 6,76$$

$$Nu = 40 \cdot 6,76^{1/3} \cdot \left(\frac{0,91}{1,1}\right)^{0,14} = 73,36$$

$$Nu = \frac{h_{eb} \cdot de}{k_c} \Rightarrow h_{eb} = \frac{Nu \cdot k_c}{de} = \frac{73,36 \cdot 0,07}{0,75/12} = 82,16 \text{ BTU/h.pé}^2 \cdot ^\circ F$$

Fator de correção devido ao efeito de entrada no casco:

$$l_B = l \cdot (N_B - 1) = 14,5(15 - 1) = 203 \text{ pol}$$

$$E_c = \frac{l_B + (L' - l_B) \left(\frac{2l}{L - l_B}\right)^{0,6}}{L'} = \frac{203 + [(20 \cdot 12 - 2 \cdot 2) - 203] \left(\frac{2 \cdot 14,5}{236 - 203}\right)^{0,6}}{236} = 0,989$$

$$h_e = h_{eb} \cdot E_c = 82,16 \cdot 0,989 = 81,26 \text{ BTU/h.pé}^2 \cdot ^\circ F$$

5.4.14 COEFICIENTE GLOBAL DE TROCA TÉRMICA

Considerando a temperatura da parede do tubo na temperatura média entre as temperaturas médias dos fluidos ($t = 126,25^\circ F$), temos $k_t = 40 \text{ BTU/h.pé} \cdot ^\circ F$

$$U = \frac{1}{\frac{de}{h_i \cdot di} + \frac{R_{di} \cdot de}{di} + \frac{de}{2k_t} \ln \frac{de}{di} + \frac{R_{de}}{de} + \frac{1}{h_e}}$$

5.4.15 ÁREA DE TROCA TÉRMICA NECESSÁRIA

$$A' = \frac{\dot{Q}}{U \times \Delta T_m} = \frac{6848136}{53,06 \cdot 40,7} = 3171,1 \text{ pé}^2$$

5.4.16 DESVIO EM RELAÇÃO A ÁREA DISPONÍVEL

$$\text{Desvio}\% = \frac{A' - A}{A} \times 100 = \frac{3171,1 - 2054}{2054} \times 100 = 54,38\%$$

O significado de um desvio positivo é que, em relação à área disponível, falta 54,38% de área de troca térmica, pois em função da geometria adotada o trocador necessita 3171,1 pé² de área de troca térmica e só dispõe de 2054 pé².

Como passo seguinte pode-se modificar a geometria para aumentar a perda de carga, e o coeficiente de película no casco, ou é substituir a área necessário no lugar da estimada no passo 8 e propor nova geometria, até que o desvio seja inferior a 5%.