

## 8.5. EXEMPLO: PROJETO TÉRMICO DE UM EVAPORADOR

Um refeedor com termosifão vertical deve proporcionar  $40800 \text{ lbm}/\text{h}$  de vapor que é constituído quase que totalmente por butano puro, em um dispositivo como mostra a Figura 8.37. A coluna opera a uma pressão de  $275 \text{ psig}$  e o calor será fornecido por vapor d'água saturado a  $85 \text{ psig}$ . Devemos usar uma razão de recirculação maior ou igual a 4:1.

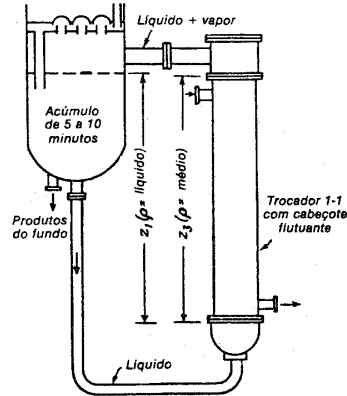


Figura 8.37 – Refeedor com termosifão vertical do exemplo 8.5

Obs: Espelho superior colocado próximo ao nível dos produtos do fundo.

Solução:

### 8.5.1 DADOS INICIAIS

Fluido	Vazão ( $\text{lbm}/\text{h}$ )	$T_1$ ( $^{\circ}\text{F}$ )	$T_2$ ( $^{\circ}\text{F}$ )	$P_{op}$ ( $\text{psia}$ )	$\Delta P$ ( $\text{psi}$ )
Butano	40.800	?	?	290	?
Água	?	?	?	100	2

### 8.5.2 LOCALIZAÇÃO DOS FLUIDOS

butano  $\Rightarrow$  no lado dos tubos

vapor d'água  $\Rightarrow$  no lado do casco

### 8.5.3 TEMPERATURAS MÉDIAS

A pressão de saturação do butano  $p_{sat} = 290 \text{ psia}$  corresponde a uma temperatura de saturação  $T_{sat} = 230^{\circ}\text{F}$ .

A pressão de saturação do vapor d'água  $p_{sat} = 100 \text{ psia}$  corresponde a uma temperatura de saturação  $T_{sat} = 327,8^{\circ}\text{F}$ .

Temperaturas médias:

$$T_{mc} = 327,8^{\circ}\text{F} \quad T_{mt} = 230^{\circ}\text{F}$$

**8.5.4 PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS FLUIDOS**

Fluido	Butano	Vapor d'água
Temperatura de saturação ( $^{\circ}F$ )	230	327,8
Pressão de saturação ( $psia$ )	290	100
Massa molecular	58,1	
Massa específica do líquido ( $lbm/ft^3$ )	29,95	56,36
Calor específico do líquido ( $BTU/lbm.^{\circ}F$ )	0,7	
Condutividade térmica do líquido ( $BTU/h.ft.^{\circ}F$ )	0,064	
Viscosidade dinâmica do líquido ( $lbm/ft.h$ )	0,242 (0,1 $cp$ )	0,242 (0,1 $cp$ )
Massa específica do vapor ( $lbm/ft^3$ )	2,27	0,2256
Calor específico do vapor ( $BTU/lbm.^{\circ}F$ )		
Condutividade térmica do vapor ( $BTU/h.ft.^{\circ}F$ )		
Viscosidade dinâmica do vapor ( $lbm/ft.h$ )		0,0363 (0,015 $cp$ )
Calor latente ( $BTU/lbm$ )		888,8
Entalpia do líquido ( $BTU/lbm$ )	245	298,4
Entalpia do vapor ( $BTU/lbm$ )	340	1187,2
Fator de incrustação ( $h.ft^2.^{\circ}F/BTU$ )	0.003	0,001

**8.5.5 BALANÇO DE ENERGIA**

$$\dot{Q} = \dot{m}_l (\lambda_v - \lambda_l)$$

$$\dot{Q} = 40800 \cdot (340 - 245) = 3876000 \text{ BTU/h}$$

Vazão de água:

$$\dot{Q}_{\text{água}} = \dot{m}_c \cdot \lambda_{lv}$$

$$\dot{m}_{\text{água}} = \frac{\dot{Q}}{\lambda_{lv}} = \frac{3876000}{288,8} = 4361 \text{ lbm/h}$$

### 8.5.6 DIFERENÇA MÉDIA DE TEMPERATURA

$$\Delta T_m = T_{\text{sat}(\text{vapor d'água})} - T_{\text{sat}(\text{bu tan o})} = 327,8 - 230^\circ F$$

$$\Delta T_m = 97,8^\circ F$$

Fator de correção da MLDT

$$P = \frac{T'_{t2} - T_{t1}}{T_{c1} - T_{t1}} = \frac{230 - 230}{327,8 - 230} = 0$$

$$R = \frac{T_{c1} - T_{c2}}{T'_{t2} - T_{t1}} = \frac{327,8 - 327,8}{230 - 230} = \text{indeterminado}$$

Logo:  $F = 1$  e  $\Delta T_m = 97,8^\circ F$

### 8.5.7 TEMPERATURA E PRESSÃO DE PROJETO

Casco:  $T_{\text{projeto}} = 328 + 50 = 378^\circ F$

$$p_{\text{projeto}} = 100 \times 1,2 = 120 \text{ psi}$$

Tubos:  $T_{\text{projeto}} = 230 + 50 = 280^\circ F$

$$p_{\text{projeto}} = 290 \times 1,2 = 348 \text{ psi}$$

### 8.5.8 CARACTERÍSTICAS DO PROJETO MECÂNICO

$$T_m = \frac{T_{mc} + T_{mt}}{2} = \frac{328 + 230}{2} = 279^\circ F$$

$$\Delta T = T_{mc} - T_m = 328 - 279 = 49^\circ F < 50^\circ F$$

Permite uso de espelhos fixos. Tipo construtivo AEL.

### 8.5.9 CÁLCULO DA ÁREA DE TROCA TÉRMICA

1ª tentativa: Quando estabelecemos a área do refeedor, a primeira tentativa deve ser feita para o fluxo máximo, neste caso (Kern 1980):

$$\frac{\dot{Q}}{A_{\text{máx}}} = 12000 \text{ BTU/h.ft}^2$$

$$A = \frac{\dot{Q}}{\frac{\dot{Q}}{A_{\text{máx}}}} = \frac{3876000}{12000} = 323 \text{ ft}^2$$

Escolha do tubo:

espessura:  $p_{projeto} = 348 \text{ psi}$

tensão admissível do aço-carbono (ASTM A-179) na  $T = 328^\circ F$ ,  $\sigma = 81 \text{ MPa} = 11900 \text{ psi}$

$$\text{A espessura é estimada por: } e = \frac{p \cdot d}{2 \cdot \sigma} + C = \frac{328 \cdot 0,75}{2 \cdot 11900} + 0,04 = 0,05 \text{ in}$$

Empregaremos tubos BWG 16, com  $de = \frac{3}{4}''$  (deve ser verificado, no projeto mecânico, a resistência à pressão externa e a rigidez)

Espessura da parede = 0,065"

Diâmetro externo = 0,75"

Diâmetro interno = 0,62"

Material = aço

Arranjo triangular com passo de 1"

Número de trajetos nos tubos,  $N_t = 1$

Comprimento dos tubos = 16 ft (Obs: Tubos longos reduzem o diâmetro do casco, barateando o trocador. Em contrapartida a coluna deverá ser montada mais alta).

Espessura dos espelhos = 2" (estimada)

Número de tubos:

$$n = \frac{A}{\pi \cdot de \cdot (L - 2e)} = \frac{323}{\pi \cdot \left(\frac{0,75}{12}\right) \left(16 - \frac{2 \cdot 2}{12}\right)} = 105$$

Contagem de tubos no espelho, para tipo L, 1 passagem,  $n = 109$ , e  $Di = 13 \frac{1}{4}''$

**8.5.10 VERIFICAÇÃO DA RAZÃO DE RECIRCULAÇÃO**

Razão de recirculação 4:1 ou maior.

**8.5.10.1 Pressão estática no ramo de ligação do refeededor**

$$\frac{Z_3 \rho_{méd}}{144} = \frac{L}{144 \cdot (v_2 - v_1)} \ln \left( \frac{v_2}{v_1} \right)$$

Massa específica do vapor de butano

$$\rho_{vap} = \frac{p \cdot M}{R \cdot T} = \frac{290 \text{ psia} \cdot 58,1 \text{ lb/lbmol}}{0,73 \text{ ft}^3 \text{ atm/lbmol} \cdot R \cdot 14,7 \text{ psia/atm} \cdot (230 + 460) R} = 2,27 \text{ lb/ft}^3$$

Volume específico do vapor de butano

$$v_{vap} = \frac{1}{\rho_{vap}} = \frac{1}{2,27} = 0,44 \text{ ft}^3/\text{lb}$$

Massa específica do butano líquido

Densidade  $\rightarrow d = 0,48$

$$\rho_{\text{butano líq}} = d \cdot \rho_{H_2O} = 0,48 \cdot 62,4 = 29,95 \text{ lb/ft}^3$$

Volume específico do butano líquido

$$v_{\text{liq}} = \frac{1}{\rho_{\text{liq}}} = \frac{1}{29,95} = 0,033 \text{ ft}^3/\text{lb}$$

Na entrada,  $v_1 = v_{\text{liq}} = 0,033 \text{ ft}^3/\text{lb}$

Na saída:

Vazão de líquido recirculando = 4:1 =  $4 \times 40800 = 163200 \text{ lb/h}$

Vazão total, em volume, na saída do refervedor

$$\text{Líquido} = 163200 \text{ lb/h} \times 0,033 \text{ ft}^3/\text{lb} = 5450,88 \text{ ft}^3/\text{h}$$

$$\text{Vapor} = 40800 \text{ lb/h} \times 0,44 \text{ ft}^3/\text{lb} = 17952,00 \text{ ft}^3/\text{h}$$

$$\text{Total} = 23402,88 \text{ ft}^3/\text{h}$$

$$v_2 = \frac{23402,88}{163200 + 40800} = 0,1147 \text{ ft}^3/\text{lb}$$

Pressão estática no ramo de ligação do refervedor devido ao peso da mistura na coluna (vapor+líquido)

$$\frac{Z_3 \rho_{\text{méd}}}{144} = \frac{16}{144(0,1147 - 0,033)} \ln\left(\frac{0,1147}{0,033}\right) = 1,684 \text{ psi}$$

#### 8.5.10.2 Queda de pressão por atrito no escoamento

$$a = \frac{\pi \cdot di^2}{4} = \frac{\pi \cdot (0,62)^2}{4} = 0,302 \text{ in}^2 = 0,002097 \text{ ft}^2$$

$$G_t = \frac{\dot{m}_t}{\frac{n}{N_t} \cdot a} = \frac{163200 + 40800}{\frac{109}{1} \cdot 0,002097} = 892494 \text{ lbm/h.ft}^2$$

$$Re_t = \frac{G_t \cdot di}{\mu_t} = \frac{892494 \cdot 0,62}{0,242 \cdot 12} = 190546 \Rightarrow \text{escoamento turbulento.}$$

Massa específica da mistura:

$$\rho_{\text{méd}} = \frac{1}{v_{\text{méd}}} \rightarrow v_{\text{méd}} = \frac{v_1 + v_2}{2} \rightarrow \rho_{\text{méd}} = \frac{2 \cdot \rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_1 + \rho_2}$$

$$\rho_2 = \frac{1}{v_2} = \frac{1}{0,1147} = 8,72 \text{ lb/ft}^3$$

$$\rho_{\text{méd}} = \frac{2 \cdot 29,95 \cdot 8,72}{29,95 + 8,72} = 13,54 \text{ lb/ft}^3$$

Fator de atrito - Churchill

Material do tubo = aço  $\Rightarrow$  rugosidade  $E = 8,5 \times 10^{-4} \text{ ft}$

Fator de atrito de Churchill

$$A = \left( 2,457 \ln \left( \frac{1}{\left( \frac{7}{Re} \right)^{0,9} + \frac{0,27 \cdot E}{di}} \right) \right)^{16} = \left( 2,457 \ln \left( \frac{1}{\left( \frac{7}{190546} \right)^{0,9} + \frac{0,27 \cdot 8,5 \times 10^{-4} \cdot 12}{0,62}} \right) \right)^{16}$$

$$A = 5,77 \times 10^{17}$$

$$B = \left( \frac{37530}{Re} \right)^{16} = \left( \frac{37530}{190546} \right)^{16} = 5,13 \times 10^{-12}$$

$$f = \left( \left( \frac{8}{Re} \right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^{1,5}} \right)^{1/12} = \left( \left( \frac{8}{190546} \right)^{12} + \frac{1}{(5,77 \times 10^{17} + 5,13 \times 10^{-12})^{1,5}} \right)^{1/12} = 0,006$$

Velocidade nos tubos

$$V_t = \frac{G}{\rho_{méd}} = \frac{892494}{13,54 \cdot 3600} = 18,31 \text{ ft/s}$$

Perda de carga linear nos tubos:

$$\Delta p_l = 8 \cdot f' \cdot \frac{L}{di} \cdot \frac{\rho_t \cdot V_t^2}{2g} \cdot N_t$$

$$\Delta p_l = 8 \cdot 0,006 \cdot \frac{16 \cdot 12}{0,62} \cdot \frac{13,54 \cdot 18,31^2}{2 \cdot 32,2 \cdot 144} = 7,28 \text{ psi}$$

Desprezando a perda na tubulação que liga o trocador à coluna e a perda nos bocais, devido a  $\rho_{méd}$  determinado pelo método aproximado ser menor do que o real.

Perda de carga total nos tubos:

$$\Delta p_{total} = \frac{Z_3 \rho_{méd}}{144} + \Delta p_l$$

$$\Delta p_{total} = 1,684 + 7,28 = 8,96 \text{ psi}$$

### 8.5.10.3 Força motriz disponível

$$\frac{Z_1 \rho_{liq}}{144} = \frac{16 \cdot 29,95}{144} = 3,33 \text{ psi} < 8,96 \text{ psi}$$

As resistências são maiores do que a energia disponível, portanto a razão de recirculação será menor do que 4:1

A queda de pressão pode ser reduzida pelo quadrado da velocidade se os tubos se encurtarem, o que provoca aumento na área de escoamento. Outra alternativa é elevar o nível do líquido na coluna até acima do espelho superior.

2ª tentativa:  $A = 323 \text{ ft}^2$

Escolha do tubo:

Empregaremos tubos BWG 16, com  $de = \frac{3}{4}''$  (deve ser verificado, no projeto mecânico, a resistência à pressão externa e a rigidez)

Espessura da parede = 0,065"

Diâmetro externo = 0,75"

Diâmetro interno = 0,62"

Material = aço

Arranjo triangular com passo de 1"

Número de trajetos nos tubos,  $N_t = 1$

Comprimento dos tubos = 12 ft

Número de tubos:

$$n = \frac{A}{\pi \cdot de \cdot (L - 2e)} = \frac{323}{\pi \cdot \left(\frac{0,75}{12}\right) \left(12 - \frac{2 \cdot 2}{12}\right)} = 141$$

Contagem de tubos no espelho, para tipo L, 1 passagem,  $n = 151$ , e  $Di = 15 \frac{1}{4}''$

### 8.5.10.a. VERIFICAÇÃO DA RAZÃO DE RECIRCULAÇÃO

Razão de recirculação 4:1 ou maior.

8.5.10.1.a. Pressão estática no ramo de ligação do refervedor

$$\frac{Z_3 \rho_{méd}}{144} = \frac{L}{144 \cdot (v_2 - v_1)} \ln \left( \frac{v_2}{v_1} \right)$$

Na entrada,  $v_1 = v_{liq} = 0,033 \text{ ft}^3 / \text{lb}$

Na saída:  $v_2 = 0,1147 \text{ ft}^3 / \text{lb}$

Pressão estática no ramo de ligação do refervedor devido ao peso da mistura na coluna (vapor+líquido)

$$\frac{Z_3 \rho_{méd}}{144} = \frac{12}{144(0,1147 - 0,033)} \ln \left( \frac{0,1147}{0,033} \right) = 1,26 \text{ psi}$$

8.5.10.2.a Queda de pressão por atrito no escoamento

$$a = \frac{\pi \cdot di^2}{4} = \frac{\pi \cdot (0,62)^2}{4} = 0,302 \text{ in}^2 = 0,002097 \text{ ft}^2$$

$$G_t = \frac{\dot{m}_t}{\frac{n}{N_t} \cdot a} = \frac{163200 + 40800}{\frac{151}{1} \cdot 0,002097} = 644250 \text{ lbm/h.ft}^2$$

$$Re_t = \frac{G_t \cdot di}{\mu_t} = \frac{644250 \cdot 0,62}{0,242 \cdot 12} = 137828 \Rightarrow \text{escoamento turbulento.}$$

Massa específica da mistura:  $\rho_{méd} = 13,54 \text{ lb/ft}^3$

Fator de atrito - Churchill

Material do tubo = aço  $\Rightarrow$  rugosidade  $E = 8,5 \times 10^{-4} \text{ ft}$

Fator de atrito de Churchill

$$A = \left( 2,457 \ln \left( \frac{1}{\left( \frac{7}{Re} \right)^{0,9} + \frac{0,27 \cdot E}{di}} \right) \right)^{16} = \left( 2,457 \ln \left( \frac{1}{\left( \frac{7}{137828} \right)^{0,9} + \frac{0,27 \cdot 8,5 \times 10^{-4} \cdot 12}{0,62}} \right) \right)^{16}$$

$$A = 8,85 \times 10^{17}$$

$$B = \left( \frac{37530}{Re} \right)^{16} = \left( \frac{37530}{137828} \right)^{16} = 9,1 \times 10^{-10}$$

$$f = \left( \left( \frac{8}{Re} \right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^{1,5}} \right)^{1/12} = \left( \left( \frac{8}{137828} \right)^{12} + \frac{1}{(8,85 \times 10^{17} + 9,1 \times 10^{-10})^{1,5}} \right)^{1/12} = 0,0057$$

Velocidade nos tubos

$$V_t = \frac{G}{\rho_{méd}} = \frac{644250}{13,54 \cdot 3600} = 13,22 \text{ ft/s}$$

Perda de carga linear nos tubos:

$$\Delta p_l = 8 \cdot f' \cdot \frac{L}{di} \cdot \frac{\rho_t \cdot V_t^2}{2g} \cdot N_t$$

$$\Delta p_l = 8 \cdot 0,0057 \cdot \frac{12 \cdot 12}{0,62} \cdot \frac{13,54 \cdot 13,22^2}{2 \cdot 32,2 \cdot 144} = 2,7 \text{ psi}$$

Desprezando a perda na tubulação que liga o trocador à coluna e a perda nos bocais, devido a  $\rho_{méd}$  determinado pelo método aproximado ser menor do que o real.

Perda de carga total nos tubos:

$$\Delta p_{total} = \frac{Z_3 \rho_{méd}}{144} + \Delta p_l$$

$$\Delta p_{total} = 1,26 + 2,7 = 3,96 \text{ psi}$$



## 8.5.10.3.a Força motriz disponível

$$\frac{Z_1 \rho_{liq}}{144} = \frac{12 \cdot 29,95}{144} = 2,5 \text{ psi} < 3,96 \text{ psi}$$

As resistências são maiores do que a energia disponível, portanto a razão de recirculação será menor do que 4:1

A queda de pressão pode ser reduzida aumentando o diâmetro dos tubos.

3ª tentativa:  $A = 323 \text{ ft}^2$

Escolha do tubo:

Empregaremos tubos BWG 16, com  $de = 1''$

Espessura da parede = 0,065''

Diâmetro externo = 1''

Diâmetro interno = 0,87''

Material = aço

Arranjo triangular com passo de 1 1/4''

Número de trajetos nos tubos,  $N_t = 1$

Comprimento dos tubos = 16 ft.

Espessura dos espelhos = 2'' (estimada)

Número de tubos:

$$n = \frac{A}{\pi \cdot de \cdot (L - 2e)} = \frac{323}{\pi \cdot \left(\frac{1}{12}\right) \cdot \left(16 - \frac{2 \cdot 2}{12}\right)} = 79$$

Contagem de tubos no espelho, para tipo L, 1 passagem,  $n = 91$ , e  $Di = 15 \frac{1}{4}''$

## 8.5.10.b VERIFICAÇÃO DA RAZÃO DE RECIRCULAÇÃO

Razão de recirculação 4:1 ou maior.

8.5.10.1.b Pressão estática no ramo de ligação do refervedor

$$\frac{Z_3 \rho_{méd}}{144} = \frac{L}{144 \cdot (v_2 - v_1)} \ln \left( \frac{v_2}{v_1} \right)$$

Na entrada,  $v_1 = v_{liq} = 0,033 \text{ ft}^3 / \text{lb}$

Na saída:  $v_2 = 0,1147 \text{ ft}^3 / \text{lb}$

Pressão estática no ramo de ligação do refervedor devido ao peso da mistura na coluna (vapor+líquido)

$$\frac{Z_3 \rho_{méd}}{144} = \frac{16}{144(0,1147 - 0,033)} \ln \left( \frac{0,1147}{0,033} \right) = 1,684 \text{ psi}$$

## 8.5.10.2.b Queda de pressão por atrito no escoamento

$$a = \frac{\pi \cdot di^2}{4} = \frac{\pi \cdot (0,87)^2}{4} = 0,594 in^2 = 0,00413 ft^2$$

$$G_t = \frac{\dot{m}_t}{\frac{n}{N_t} \cdot a} = \frac{163200 + 40800}{\frac{91}{1} \cdot 0,00413} = 542799 lbm/h \cdot ft^2$$

$$Re_t = \frac{G_t \cdot di}{\mu_t} = \frac{542799 \cdot 0,87}{0,242 \cdot 12} = 162615 \Rightarrow \text{escoamento turbulento.}$$

Massa específica da mistura:

$$\rho_{méd} = \frac{2 \cdot 29,95 \cdot 8,72}{29,95 + 8,72} = 13,54 lb/ft^3$$

Fator de atrito - Churchill

Material do tubo = aço  $\Rightarrow$  rugosidade  $E = 8,5 \times 10^{-4} ft$

Fator de atrito de Churchill

$$A = \left( 2,457 \ln \left( \frac{1}{\left( \frac{7}{Re} \right)^{0,9} + \frac{0,27 \cdot E}{di}} \right) \right)^{16} = \left( 2,457 \ln \left( \frac{1}{\left( \frac{7}{162615} \right)^{0,9} + \frac{0,27 \cdot 8,5 \times 10^{-4} \cdot 12}{0,87}} \right) \right)^{16}$$

$$A = 2,31 \times 10^{18}$$

$$B = \left( \frac{37530}{Re} \right)^{16} = \left( \frac{37530}{162615} \right)^{16} = 6,48 \times 10^{-11}$$

$$f = \left( \left( \frac{8}{Re} \right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^{1,5}} \right)^{1/12} = \left( \left( \frac{8}{162615} \right)^{12} + \frac{1}{(2,31 \times 10^{18} + 6,48 \times 10^{-11})^{1,5}} \right)^{1/12} = 0,0051$$

Velocidade nos tubos

$$V_t = \frac{G}{\rho_{méd}} = \frac{542799}{13,54 \cdot 3600} = 11,14 ft/s$$

Perda de carga linear nos tubos:

$$\Delta p_l = 8 \cdot f' \cdot \frac{L}{di} \cdot \frac{\rho_t \cdot V_t^2}{2g} \cdot N_t$$

$$\Delta p_l = 8 \cdot 0,0051 \cdot \frac{16 \cdot 12}{0,87} \cdot \frac{13,54 \cdot 11,14^2}{2 \cdot 32,2 \cdot 144} = 1,63 psi$$

Desprezando a perda na tubulação que liga o trocador à coluna e a perda nos bocais, devido a  $\rho_{méd}$  determinado pelo método aproximado ser menor do que o real.

Perda de carga total nos tubos:

$$\Delta p_{total} = \frac{Z_3 \rho_{méd}}{144} + \Delta p_t$$

$$\Delta p_{total} = 1,684 + 1,63 = 3,31 \text{ psi}$$

#### 8.5.10.3.b Força motriz disponível

$$\frac{Z_1 \rho_{liq}}{144} = \frac{16 \cdot 29,95}{144} = 3,33 \text{ psi} > 3,31 \text{ psi}$$

A energia disponível é suficiente para garantir a taxa de recirculação desejada de 4:1

### 8.5.11 VERIFICAÇÃO DA ÁREA DE TROCA TÉRMICA

#### 8.5.11.1 Coeficiente de película do líquido em ebulição no interior dos tubos

Com uma velocidade média de  $11,15 \frac{ft}{s}$  ( $3,4 \frac{m}{s}$ ) o coeficiente de película na ebulição do butano pode ser calculado como no caso da circulação forçada nas condições da entrada.

$$V_{ent} = \frac{G}{\rho_1} = \frac{542799}{29,95 \cdot 3600} = 5 \frac{ft}{s}$$

$$Re_t = \frac{G_t \cdot di}{\mu_t} = \frac{542799 \cdot 0,87}{0,242 \cdot 12} = 162615 \Rightarrow \text{escoamento turbulento.}$$

$$Pr = \frac{\mu_t \cdot Cp_t}{k_t} = \frac{0,242 \cdot 0,7}{0,064} = 2,65$$

Equação de Dittus-Boelter modificada para ebulição:

$$Nu_t = 0,0278 Re^{0,8} Pr^{0,4} = 0,0278 (162615)^{0,8} (2,65)^{0,4} = 605,72$$

$$h_i = \frac{Nu_t \cdot k_t}{di} = \frac{605,72 \cdot 0,064 \cdot 12}{0,87} = 534,7 \text{ BTU} / \text{h.ft}^2 \cdot ^\circ F$$

$h_i = 534,7 \text{ BTU} / \text{h.ft}^2 \cdot ^\circ F$  é maior que o limite para o fluxo de calor máximo. Usaremos

$$h_i = h_{máx} = 300 \text{ BTU} / \text{h.ft}^2 \cdot ^\circ F$$

#### 8.5.11.2 Coeficiente de película do fluido de aquecimento

Fluido quente = vapor de água, saturado, no casco.

1ª iteração: Arbitrando  $h_e = 1200 \text{ BTU} / \text{h.ft}^2 \cdot ^\circ F$

$$T_p = T_t + \frac{h_e}{h_e + h_i^*} (T_c - T_t) = 230 + \frac{1200}{1200 + \frac{300 \cdot 0,87}{1}} (327,8 - 230) = 310,3^\circ F$$

$$T_f = \frac{T_c + T_p}{2} = \frac{327,8 + 310,3}{2} = 319^\circ F$$

Fluido	Vapor d'água
Temperatura da película ( $^{\circ}F$ )	317,7
Pressão de saturação ( $psia$ )	100
Massa específica do líquido ( $lbm/ft^3$ )	56,7
Calor latente ( $BTU/lbm$ )	888,8
Condutividade térmica do líquido ( $BTU/h.ft.^{\circ}F$ )	0,394
Viscosidade dinâmica do líquido ( $lbm/ft.h$ )	0,427
Viscosidade cinemática do líquido ( $ft^2/s$ )	$2,09 \times 10^{-6}$

Vazão mássica:

$$G' = \frac{\dot{m}}{\pi \cdot De \cdot Nt} = \frac{4361}{\pi \cdot \frac{1}{12} \cdot 91} = 183,05 \text{ lb/h.ft}$$

$$Re_{\delta} = \frac{4 \cdot G'}{\mu} = \frac{4 \cdot 183,05}{0,427} = 1714,8 \Rightarrow \text{escoamento em película laminar.}$$

$$\frac{\bar{h}_L (v_i^2/g)^{1/3}}{k_l} = \frac{Re_{\delta}}{1,08 \cdot Re_{\delta}^{1,22} - 5,2} \quad 30 < Re_{\delta} < 1800$$

$$\bar{h}_L = \frac{Re_{\delta} \cdot k_l}{(1,08 \cdot Re_{\delta}^{1,22} - 5,2) (v_i^2/g)^{1/3}} = \frac{1714,8 \cdot 0,394}{(1,08 \cdot 1714,8^{1,22} - 5,2) ((2,09 \times 10^{-6})^2 / 32,2)^{1/3}}$$

$$\bar{h}_L = 1380,3 \text{ BTU/h.ft}^2 \cdot ^{\circ}F$$

Recalculando a temperatura da parede:

$$T_p = T_t + \frac{h_e}{h_e + h_i^*} (T_c - T_t) = 230 + \frac{1380,3}{1380,3 + \frac{300 \cdot 0,87}{1}} (327,8 - 230) = 312,2^{\circ}F$$

$$T_f = \frac{T_c + T_p}{2} = \frac{327,8 + 312,2}{2} = 320^{\circ}F$$

Não há variação significativa nas propriedades.

### 8.5.11.3 Coeficiente global de troca térmica

$$U = \frac{1}{\frac{de}{hi \cdot di} + \frac{Rdi \cdot de}{di} + \frac{de}{2k_t} \ln\left(\frac{de}{di}\right) + Rde + \frac{1}{he}}$$

Condutividade térmica do aço na  $T_p = 312^\circ F \Rightarrow k_{aço} = 25,4 \text{ BTU} / \text{h.ft.}^\circ F$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{300 \cdot 0,87} + \frac{0,003 \cdot 1}{0,87} + \frac{1}{2 \cdot 12 \cdot 25,4} \ln\left(\frac{1}{0,87}\right) + 0,001 + \frac{1}{1380,3}}$$

$$U = 108,3 \text{ BTU} / \text{h.ft}^2 \cdot ^\circ F$$

#### 8.5.11.4 Verificação da área de troca de térmica

a) Área necessária:

$$A = \frac{\dot{Q}}{U \cdot \Delta T_m} = \frac{3876000}{108,3 \cdot 97,8} = 366 \text{ ft}^2$$

b) Área disponível:

$$A_d = n \cdot \pi \cdot d_e \cdot L'$$

$$A_d = 91 \cdot \pi \cdot \frac{1}{12} \left(16 - \frac{2 \cdot 2}{12}\right) = 373,2 \text{ ft}^2$$

c) Diferença de área:

$$\text{Erro} = \frac{A_d - A}{A} \times 100 = \frac{373,2 - 366}{366} \times 100 = 2\%$$

### 8.5.12 DIMENSIONAMENTO DOS BOCAIS

a) Bocal 1 – carcaça (vapor de água)

$$V_{\text{máx}} = 16,1 \sqrt{\frac{p}{\rho_{\text{vapor}}}} = 16,1 \sqrt{\frac{100}{0,2256}} = 339 \text{ ft/s}$$

$$D_{bc1} = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{m}_c}{\pi \cdot \rho \cdot V_{\text{máx}}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4361}{\pi \cdot 0,2256 \cdot 339 \cdot 3600}} = 0,142 \text{ ft} = 1,7 \text{ in}$$

Adotaremos  $D_{bc1} = 3''$

b) Bocal 2 – carcaça (líquido)

$$V_{\text{máx}} = \sqrt{\frac{3000}{\rho_{\text{líquido}}}} = \sqrt{\frac{3000}{56,36}} = 7,29 \text{ ft/s}$$

$$D_{bc2} = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{m}_c}{\pi \cdot \rho \cdot V_{\text{máx}}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4361}{\pi \cdot 56,36 \cdot 7,29 \cdot 3600}} = 0,061 \text{ ft} = 0,74 \text{ in}$$

Adotaremos  $D_{bc2} = 3''$

c) Bocal 1 dos tubos (líquido)

$$V_{\text{máx}} = 10 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$$

$$D_{bt} = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{m}_t}{\pi \cdot \rho_1 \cdot V_{\text{máx}}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 204000}{\pi \cdot 29,95 \cdot 10 \cdot 3600}} = 0,49 \text{ ft} = 5,89 \text{ in}$$

Adotaremos  $D_{bt} = 6''$

d) Bocal 2 dos tubos (líquido + vapor)

$$V_{\text{máx}} = 16,1 \sqrt{\frac{p}{\rho_{\text{vapor}}}} = 16,1 \sqrt{\frac{290}{8,72}} = 92,8 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$$

$$D_{bt} = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{m}_t}{\pi \cdot \rho_1 \cdot V_{\text{máx}}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 204000}{\pi \cdot 8,72 \cdot 92,8 \cdot 3600}} = 0,3 \text{ ft} = 3,6 \text{ in}$$

Adotaremos  $D_{bt} = 6''$

### 8.5.13 GEOMETRIA DO CASCO

#### 8.5.13.1 Diâmetro do feixe de tubos

Número de tubos na fileira central:  $n_c = 1,1\sqrt{n} = 1,1\sqrt{91} = 17,67 \approx 11$

Diâmetro do feixe de tubos:  $D_f = (n_c - 1)s + de = (11 - 1)1,25 + 1 = 13,5 \text{ in}$

Diâmetro interno do casco:  $D_i = 15,25 \text{ in}$

#### 8.5.13.2 Número de chicanas

a) Corte da chicana:  $\frac{H}{D_i} = 46\%$  (arbitrado)

b) Espaçamento entre chicanas adjacentes:  $\frac{D_i}{l} = 1 \Rightarrow l = D_i = 15,25 \text{ in}$

c) Comprimento de tubo entre o espelho e a chicana de entrada

Com  $D_i = 15,25 \text{ in}$  e  $p = 100 \text{ psi} \Rightarrow$  Figura 5.17  $\rightarrow l_{1f} = 5,56 \text{ in}$

Bocal com diâmetro nominal de 3", Sch 40  $\Rightarrow de = 3,5 \text{ in}$  e  $di = 3,068 \text{ in}$ .

$$l_{1min} = D_{bc1} + l_{1f} = 3,068 + 5,5 = 8,868 \text{ in} \text{ adotado: } l_1 = 17,75 \text{ in}$$

d) Comprimento de tubo entre o espelho e a chicana de saída

Com  $D_i = 15,25 \text{ in}$  e  $p = 100 \text{ psi} \Rightarrow$  Figura 5.18  $\rightarrow l_{2f} = 10,25 \text{ in}$

Bocal com diâmetro nominal de 3", Sch 40  $\Rightarrow de = 3,5 \text{ in}$  e  $di = 3,068 \text{ in}$ .

$$l_{2min} = D_{bc2} + l_{2f} = 3,068 + 10,25 = 13,32 \text{ in} \text{ adotado: } l_2 = 17,75 \text{ in}$$

e) Número de chicanas

$$N_b = \frac{(L - l_1 - l_2)}{l} + 1 = \frac{((16 \cdot 12 - 2 \cdot 2) - 17,75 - 17,75)}{15,25} + 1 = 11$$

**8.5.14 PERDA DE CARGA NO CASCO**

a) Fluxo de massa:

$$\frac{s}{de} = 1,25 \quad \Rightarrow \quad \begin{array}{l} \text{Fig 5.13} \\ Np = 0,25 \\ Y = 6,5 \end{array}$$

$$\frac{Di}{l} = 1$$

$$Fp = \frac{1}{0,8 + Np \sqrt{\frac{Di}{s}}} = \frac{1}{0,8 + 0,25 \sqrt{\frac{15,25}{1,25}}} = 0,60$$

$$C_b = 0,97$$

$$C_a = C_b \frac{s - de}{s} = 0,97 \frac{1,25 - 1}{1,25} = 0,194$$

$$S_c = C_a \cdot l \cdot D_f = 0,194 \cdot 15,25 \cdot 13,5 = 39,94 \text{ in}^2 = 0,28 \text{ ft}^2$$

$$S_{cf} = \frac{S_c}{Fp} = \frac{0,28}{0,6} = 0,46 \text{ ft}^2$$

$$G_{cf} = \frac{\dot{m}_c}{S_{cf}} = \frac{4361}{0,46} = 9480 \text{ lbm/h.ft}^2$$

b) Número de Reynolds

$$Re = \frac{G_{cf} \cdot de}{\mu_{liq}} = \frac{9480 \cdot 1}{0,427 \cdot 12} = 1850$$

c) Coeficiente de atrito no casco:

$$\frac{s}{de} = 1,25 \quad \Rightarrow \quad \begin{array}{l} \text{Fig 5.13} \\ f_c = 0,7 \end{array}$$

$$Re = 1850$$

d) Fator  $C_x$ , Tabela 5.10  $\Rightarrow C_x = 1,154$ 

e) Massa específica média:

$$\rho_{médio} = \frac{2 \cdot \rho_{liq} \cdot \rho_{vap}}{\rho_{liq} + \rho_{vap}} = \frac{2 \cdot 56,36 \cdot 0,2256}{56,36 + 0,2256} = 0,45 \text{ lbm/ft}^3$$

f) Perda de carga para o escoamento através do casco:

$$\Delta P_c = 4 f_c \frac{G_{cf}^2}{2 \rho_c} C_x \left(1 - \frac{H}{Di}\right) \frac{Di}{s} N'_B \left(1 + \frac{Y s}{Di}\right) \left(\frac{\mu_{te}}{\mu_c}\right)^{0,14}$$

$$\Delta P_c = 4 \cdot 0,7 \frac{(9480)^2}{2 \cdot 0,45} 1,154(1-0,46) \frac{15,25}{1,25} (11+1) \left(1 + \frac{6,5 \cdot 1,25}{15,25}\right) \left(\frac{0,43}{0,427}\right)^{0,14} \frac{1}{32,2 \cdot (3600)^2 \cdot 144}$$

$$\Delta P_c = 0,65 \text{ psi}$$

f) Perda de carga no bocal de entrada (vapor):

Bocal com diâmetro nominal de 3", Sch 40  $\Rightarrow de = 3,5 \text{ in}$  e  $di = 3,068 \text{ in}$ .

$$V_{bc} = \frac{\dot{m}_c}{\rho_{vap} \left(\frac{\pi D_{bc}^2}{4}\right)} = \frac{4361}{0,2256 \left(\frac{\pi(3,068)^2}{4}\right)} \cdot \frac{144}{3600} = 104,6 \text{ ft/s}$$

parâmetro  $\frac{\mu/\rho}{D_{bc}} = \frac{0,015/0,2256}{3,068} = 0,022$

$\mu$ em centipoise	0,015
$\rho$ em $lbm/ft^3$	0,2256
$D_{bc}$ em polegadas	3,068

$$\frac{\mu/\rho}{D_{bc}} = 0,022 \quad \Rightarrow \quad \begin{array}{l} \text{Fig 5.22} \\ Z=300ft \end{array}$$

$$V_{bc} = 104,6$$

$$\Delta P_{bc1} = \rho_{vap} \cdot g \cdot Z = \frac{0,2256 \cdot 32,2 \cdot 300}{144 \cdot 32,2} = 0,47 \text{ psi}$$

g) Perda de carga no bocal de saída (líquido):

Bocal com diâmetro nominal de 3", Sch 40  $\Rightarrow de = 3,5 \text{ in}$  e  $di = 3,068 \text{ in}$ .

$$V_{bc} = \frac{\dot{m}_c}{\rho_{liq} \left(\frac{\pi D_{bc}^2}{4}\right)} = \frac{4361}{56,36 \left(\frac{\pi(3,068)^2}{4}\right)} \cdot \frac{144}{3600} = 0,06 \text{ ft/s}$$

parâmetro  $\frac{\mu/\rho}{D_{bc}} = \frac{0,1/56,36}{3,068} = 0,0006$

$\mu$ em centipoise	0,1
$\rho$ em $lbm/ft^3$	56,36
$D_{bc}$ em polegadas	3,068



$$\frac{\mu/\rho}{D_{bc}} = 0,0006 \quad \Rightarrow \quad \begin{array}{l} \text{Fig 5.22} \\ Z \approx 0 \text{ ft} \end{array}$$

$$V_{bc} = 0,06$$

$$\Delta P_{bc1} = \rho_{liq} \cdot g \cdot Z \approx 0 \text{ psi}$$

h) Perda de carga total no casco

$$\Delta P_{c \text{ total}} = \Delta P_c + \Delta P_{bc1} + \Delta P_{bc2}$$

$$\Delta P_{c \text{ total}} = 0,65 + 0,47 + 0$$

$$\Delta P_{c \text{ total}} = 1,12 \text{ psi}$$