

4

a) o estado de referência é aquele para o qual $\hat{H} = 0$. Este estado é: líquido puro a -40°F e 6,878 psia.

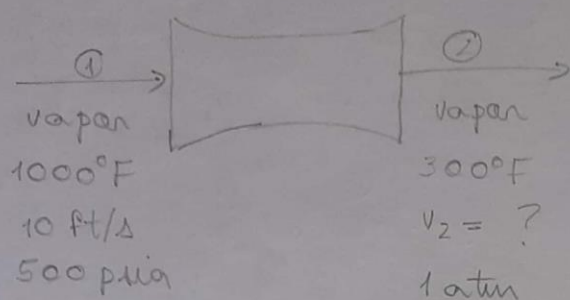
$$\begin{aligned} b) \quad \Delta \hat{H} &= \hat{H}_{\text{vapor saturado CH}_3\text{Cl}, 0^\circ\text{F}} - \hat{H}_{\text{vapor saturado CH}_3\text{Cl}, 50^\circ\text{F}} = \\ &= \hat{H}(0^\circ\text{F}) - \hat{H}(50^\circ\text{F}) = 196,23 - 202,28 \\ \Delta \hat{H} &= -6,05 \text{ Btu/lb} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \hat{H} &= \Delta \hat{U} + \Delta(P\hat{V}) \longrightarrow \Delta \hat{U} = \Delta \hat{H} - \Delta(P\hat{V}) \\ &= \Delta \hat{H} - (P_{\text{final}} \cdot \hat{V}_{\text{final}} - P_{\text{inicial}} \cdot \hat{V}_{\text{inicial}}) \\ &= -6,05 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} - (12,30 \cdot 4,969 - 51,99 \cdot 1,920) \frac{\text{psia} \cdot \text{ft}^3}{\text{lb}} \\ &\quad \cdot \frac{1 \text{ atm}}{14,696 \text{ psia}} \cdot \frac{0,028317 \text{ m}^3}{1 \text{ ft}^3} \cdot \frac{1,01325 \cdot 10^5 \text{ N}}{1 \text{ atm}} \cdot \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ N} \cdot \text{m}} \\ &\quad \cdot \frac{0,7068 \text{ Btu}}{745,7 \text{ J}} = -6,05 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} + 1,09 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} = -4,96 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} \end{aligned}$$

c) $\hat{H}$ foi admitido independente da pressão.
 $\hookrightarrow$ admitido gás ideal

lista II.8-2011

(RK 7.19)



hipóteses: estado estacionário;
local adiabático ($\dot{Q}=0$);
 $\dot{W}_s=0$ (não há partes móveis);
 $\Delta E_{pot}=0$

Do BE: vo (ent. entrec.)

$$\frac{d}{dt} [\dot{U} + g z + \frac{1}{2} v^2] \cdot m = \dot{m}_1 \left(\hat{H}_1 + g z_1 + \frac{1}{2} v_1^2 \right) - \dot{m}_2 \left(\hat{H}_2 + g z_2 + \frac{1}{2} v_2^2 \right) + \dot{Q} - \dot{W}_s$$

0 (adiabático)

$$\dot{m}_1 \left(\hat{H}_1 + \frac{1}{2} v_1^2 \right) - \dot{m}_2 \left(\hat{H}_2 + \frac{1}{2} v_2^2 \right) = 0 ; \dot{m}_1 = \dot{m}_2 \therefore$$

$$(\hat{H}_2 - \hat{H}_1) + \frac{1}{2} (v_2^2 - v_1^2) = 0 \longrightarrow$$

$$v_2^2 = 2(\hat{H}_1 - \hat{H}_2) + v_1^2$$

na entrada (1):

$$T_1 = 1000^\circ\text{F} = 537,8^\circ\text{C}$$

$$P_1 = 500 \text{ psia} \cdot \frac{1 \text{ bar}}{14,5038 \text{ psia}} = 34,5 \text{ bar}$$

vapor
super-
aquecido

	500°C	537,8°C	550°C
20 bar	3467 KJ/Kg		3578 KJ/Kg
34,5 bar		$\hat{H}_1$	
40 bar	3445 KJ/Kg		3559 KJ/Kg

Fazendo duas interpolações: $\hat{H}_1 = 3537 \text{ KJ/Kg}$

$$v_1 = \frac{10 \text{ ft}}{\text{s}} \cdot \frac{1 \text{ m}}{3,2808 \text{ ft}} = 3,05 \text{ m/s}$$

na saída (2): $T_2 = 300^\circ\text{F} = 148,9^\circ\text{C}$

$$P_2 = 1 \text{ atm} \cdot \frac{1 \text{ bar}}{0,987 \text{ atm}}$$

$$= 1,013 \text{ bar} \approx 1 \text{ bar}$$

vapor
superaquecido

	100°C	$148,9^\circ\text{C}$	150°C
1 bar	2676 kJ/kg	$\hat{H}_2$	2776 kJ/kg

Por interpolação: $\hat{H}_2 \approx 2773,8 \text{ kJ/kg}$

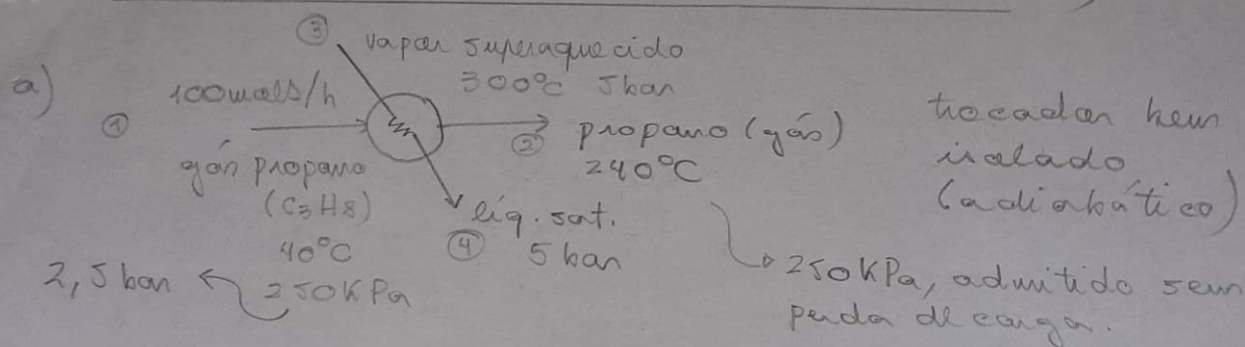
Assim:

$$v_2^2 = v_1^2 + 2(\hat{H}_1 - \hat{H}_2)$$

$$v_2^2 = (3,05)^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} + 2 \cdot (3537 - 2773,8) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$v_2^2 = 9,303 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} + 1526,4 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \quad \text{--- } 0 \equiv \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$v_2 \approx 1236 \text{ m/s} //$$



base 1 bar; propano admitido como gás ideal

$$PV = nRT \rightarrow V = \frac{nRT}{P} = 100 \text{ mol} \cdot \frac{8,314 \text{ J/mol} \cdot \text{K} \cdot (40 + 273,15) \text{ K}}{250 \cdot 10^3 \text{ Pa}}$$

$$V = \frac{1}{250 \cdot 10^3 \text{ Pa}} = 1,042 \text{ m}^3$$

vapor na alimentação
(superaquecido, 300°C, 5 bar)

$$\hat{H}_3 = 3065 \text{ KJ/Kg}$$

$$\hat{V}_3 = 0,522 \text{ m}^3/\text{Kg}$$

vapor na saída
(líq. saturado, 5 bar)

$$\hat{H}_4 = 640,1 \text{ KJ/Kg}$$

$$T_4 = 15,8^\circ\text{C}$$

$$\hat{V}_4 = 0,001093 \text{ m}^3/\text{Kg}$$

b) referências: $H_2O(l; 0,01^\circ\text{C})$ (ref. da tabela 8A-80)
 $C_3H_8(g; 40^\circ\text{C})$ Reklaitis

espécie	n entrada	$\hat{H}_{\text{entrada}}$	n saída	$\hat{H}_{\text{saída}}$
C_3H_8	100 mol	$\hat{H}_a$ (KJ/mol)	100 mol	$\hat{H}_c$ (KJ/mol)
H_2O	m_w (Kg)	$\hat{H}_b$ (KJ/Kg)	m_w (Kg)	$\hat{H}_d$ (KJ/Kg)

Como a ref. p/ o gás é 40°C e o estado é gasoso
 $\hat{H}_a = 0$

Para o vapor, entrada: $\hat{H}_b = \hat{H}_3 = 3065 \text{ KJ/Kg}$

Para o condensado, saída: $\hat{H}_d = \hat{H}_4 = 640,1 \text{ KJ/Kg}$

Para o C_3H_8 na saída:

$$\Delta \tilde{H} = \tilde{H}_2 - \tilde{H}_1 = \int_{T_1}^{T_2} \tilde{C}_p dT \rightarrow \tilde{H}_2 = \int_{313,16 \text{ K}}^{513,16 \text{ K}} \tilde{C}_p dT$$

$\checkmark 241^\circ\text{C} = 513,16 \text{ K}$
 $\checkmark 40^\circ\text{C} = 313,16 \text{ K}$

(expressões exatas para gás ideal)

Do tabelar 8, p. 643:

$$\tilde{C}_p(T) = 47,2639 - 1,31463 \cdot 10^{-4} T + 1,1700 \cdot 10^{-7} T^2 - 1,69695 \cdot 10^{-6} T^3 + 8,18910 \cdot 10^{-10} T^4$$

$\downarrow$
 K
 $\frac{\text{J}}{\text{mol K}}$

$$\therefore \tilde{H}_2 = 19310,22 \frac{\text{J}}{\text{mol}} = 19,31 \text{ kJ/mol} = \tilde{H}_c$$

c) BE:

$$\frac{d}{dt} [m(\hat{U} + gz + 1/2 v^2)] = \sum_{j=1}^J \dot{m}_j (\hat{H} + gz + 1/2 v^2)_j$$

$\checkmark$ entradas
 $\checkmark$ saídas
 $\checkmark$ (est. estac.)
 $\checkmark$ (adiabático)

$$= \sum_{k=1}^K \dot{m}_k (\hat{H} + gz + 1/2 v^2)_k + \dot{Q} - \dot{W}_s$$

$$\therefore \sum_{k=1}^K \dot{m}_k \hat{H}_k - \sum_{j=1}^J \dot{m}_j \hat{H}_j = 0$$

mas, no est. estacionário: $\dot{m}_{C_2H_2,1} = \dot{m}_{C_2H_2,2} = \dot{m}_{C_2H_2}$
 $\dot{m}_{\text{vap},3} = \dot{m}_{\text{cond},4} = \dot{m}_v$

p/ 5 espécies:

$$\sum_{\lambda=1}^5 \left[\sum_{k=1}^K \dot{m}_{\lambda,k} \hat{H}_{\lambda,k}(T_k) - \sum_{j=1}^J \dot{m}_{\lambda,j} \hat{H}_{\lambda,j}(T_j) \right] = 0$$

Escrevendo p/o problema, com $\dot{m}_{\lambda,k} = \dot{m}_{\lambda,j}$, vem:

$$\dot{m}_{C_3H_8} \cdot [\hat{H}_{C_3H_8,2}(T_2) - \hat{H}_{C_3H_8,1}(T_1)]$$

$$= \dot{m}_v \cdot [\hat{H}_{H_2O,3}(T_3) - \hat{H}_{H_2O,4}(T_4)] \quad \text{ou}$$

$$\dot{m}_{C_3H_8} \cdot [\hat{H}_{C_3H_8}(\text{gás}; 240^\circ\text{C}; 250\text{ kPa}) - \hat{H}_{C_3H_8}(\text{gás}; 40^\circ\text{C}; 250\text{ kPa})]$$

$\swarrow 513,16\text{ K}$
 $\swarrow 313,16\text{ K}$

$$= \dot{m}_v \cdot [\hat{H}_{H_2O}(\text{vap. superaq.}; 300^\circ\text{C}; 5\text{ bar}) - \hat{H}_{H_2O}(\text{liq. sat.}; 5\text{ bar})]$$

$$\dot{m}_{C_3H_8} \cdot \int_{313,16}^{513,16} \hat{C}_{pC_3H_8}(T) dT = \dot{m}_v \cdot [\hat{H}_{H_2O}(\text{vap. superaq.}; 300^\circ\text{C}; 5\text{ bar}) - \hat{H}_{H_2O}(\text{liq. sat.}; 5\text{ bar})]$$

ou

$$F_{C_3H_8} \cdot \int_{313,16}^{513,16} \tilde{C}_{pC_3H_8}(T) dT = \dot{m}_v \cdot [\hat{H}_{H_2O}(\text{vap. superaq.}; 300^\circ\text{C}; 5\text{ bar}) - \hat{H}_{H_2O}(\text{liq. sat.}; 5\text{ bar})]$$

ou

$$100\text{ mol} \cdot 19,31 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} = \dot{m}_v (\text{kg}) \cdot [3065 - 640,1] \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{m}_v = 0,796 \text{ kg}$$

A razão volumétrica entre as alimentações das correntes de entrada é dada por:

$$0,796 \text{ Kg vapor} \cdot 0,522 \frac{\text{m}^3 \text{ vapor}}{\text{Kg vapor}} \cdot \frac{1}{1,042 \text{ m}^3 \text{ C}_3\text{H}_8} =$$

$$\approx 0,4 \text{ m}^3 \text{ vapor} / \text{m}^3 \text{ C}_3\text{H}_8$$

d) o calor transferido entre os elementos, em KJ/m^3 propano alimentado é:

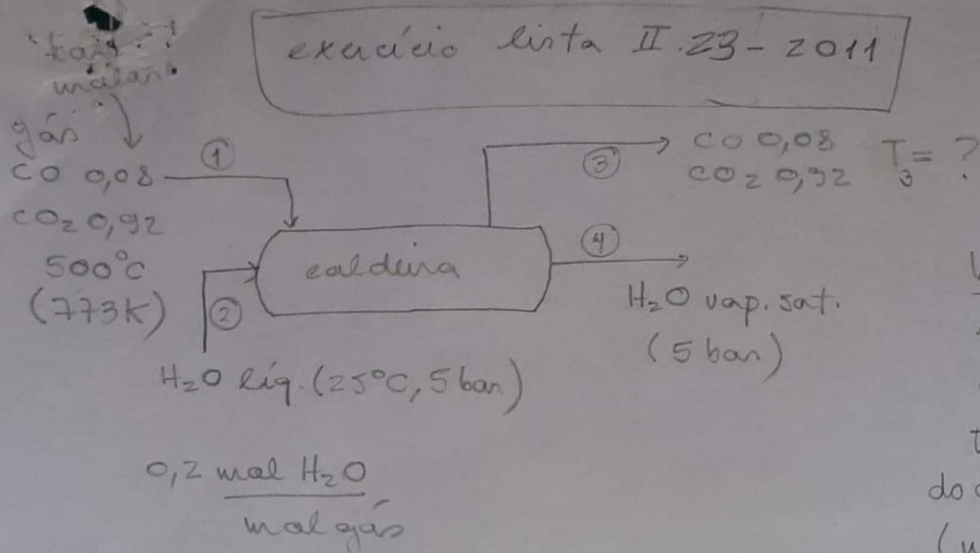
$$\frac{\dot{Q}}{F_{\text{C}_3\text{H}_8}} = \int_{313,16}^{513,16} \tilde{C}_{p\text{C}_3\text{H}_8}(T) dT = 19,31 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}}$$

$$\therefore 19,31 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}} \cdot \frac{100 \text{ mol}}{1,042 \text{ m}^3} \approx 1853 \text{ KJ/m}^3 \text{ C}_3\text{H}_8$$

$$\text{ou } \dot{Q} = 0,796 \text{ Kg vapor} \cdot (3065 - 649,1) \frac{\text{KJ}}{\text{Kg vapor}} = 1930,22 \text{ KJ}$$

$$\frac{1930,22 \text{ KJ}}{1,042 \text{ m}^3 \text{ C}_3\text{H}_8} = 1853 \text{ KJ/m}^3 \text{ C}_3\text{H}_8$$

e) espera-se menor temperatura de saída do C_3H_8 e maior temperatura de saída do vapor.



hipóteses: estado estacionário; ΔE_k , ΔE_{pot} desprezíveis; trocador bem isolado do ambiente ($\dot{Q}=0$); $\dot{W}_s=0$ (não há partes móveis); entalpias não dependem da pressão; gás ideal; mistura ideal.

Base de cálculo: 1 kg/mol/h gás

Do BE: (ent. entac.)

$$\frac{d}{dt} \left[(\hat{U} + gz + \frac{1}{2}v^2) \cdot m \right] = \sum_{\lambda=1}^S \left[\sum_{j \text{ ent}} \dot{m}_{\lambda,j} \cdot (\hat{H}_{\lambda,j} + gz_j + \frac{1}{2}v_j^2) - \sum_{k \text{ saídas}} \dot{m}_{\lambda,k} \cdot (\hat{H}_{\lambda,k} + gz_k + \frac{1}{2}v_k^2) \right] + \dot{Q} - \dot{W}_s$$

no (bem isolado)

Logo, já em base molar:

$$\sum_{\lambda=1}^S \left[\sum_{j \text{ ent}} F_{\lambda,j} \cdot \tilde{H}_{\lambda,j}(T_j, P_j, \pi_{\lambda,j}) - \sum_{k \text{ saídas}} F_{\lambda,k} \cdot \tilde{H}_{\lambda,k}(T_k, P_k, \pi_{\lambda,k}) \right] = 0$$

Para a caldeira, tem-se ($S=3$):

$$F_{CO,1} \cdot \tilde{H}_{CO}(T_1, P_1, \text{gás}) - F_{CO,3} \cdot \tilde{H}_{CO}(T_3, P_3, \text{gás}) + \\ + F_{CO_2,1} \cdot \tilde{H}_{CO_2}(T_1, P_1, \text{gás}) - F_{CO_2,3} \cdot \tilde{H}_{CO_2}(T_3, P_3, \text{gás}) + \\ + F_{H_2O,2} \cdot \tilde{H}_{H_2O}(T_2, P_2, \text{liq}) - F_{H_2O,4} \cdot \tilde{H}_{H_2O}(T_4, P_4, \text{vap. sat.}) = 0$$

Do BM, $F_{CO,1} = F_{CO,3} = F_{CO}$; $F_{CO_2,1} = F_{CO_2,3} = F_{CO_2}$
 $F_{H_2O,2} = F_{H_2O,4} = F_{H_2O}$

Reanunhando e agrupando:

$$F_{CO} \cdot [\tilde{H}_{CO}(T_1, P_1, \text{gás}) - \tilde{H}_{CO}(T_3, P_3, \text{gás})] +$$

$$F_{CO_2} \cdot [\tilde{H}_{CO_2}(T_1, P_1, \text{gás}) - \tilde{H}_{CO_2}(T_3, P_3, \text{gás})] +$$

$$+ F_{H_2O} \cdot [\tilde{H}_{H_2O}(T_2, P_2, \text{líq}) - \tilde{H}_{H_2O}(T_4, P_4, \text{vap. sat.})] = 0$$

ou

$$F_{CO} \cdot [\tilde{H}_{CO}(T_1) - \tilde{H}_{CO}(T_3)] + F_{CO_2} \cdot [\tilde{H}_{CO_2}(T_1) - \tilde{H}_{CO_2}(T_3)] +$$

$$+ F_{H_2O} \cdot [\tilde{H}_{H_2O}(T_2, \text{líq}) - \tilde{H}_{H_2O}(P_4, \text{vap. sat.})] = 0$$

$$F_{CO} \cdot \int_{T_3}^{773} \tilde{C}_{P,CO(g)}(T) dT + F_{CO_2} \cdot \int_{T_3}^{773} \tilde{C}_{P,CO_2(g)}(T) dT =$$

$$F_{H_2O} \cdot [\tilde{H}_{H_2O}(5 \text{ bar; vap. sat.}) - \tilde{H}_{H_2O}(25^\circ\text{C, líq})]$$

Kg/mol/h Para os gases, $\tilde{C}_{P,s(g)}(T) = a_s + b_s T + c_s T^2 + d_s T^3 + e_s T^4$
 (tabela 3A, p. 641-644) ($\tilde{C}_p$ em $\frac{J}{\text{mol} \cdot K}$ e $T(K)$)

s	F_s	a_s	b_s	c_s	d_s	e_s
CO	0,28	23,0063	$2,49235 \cdot 10^{-3}$	$-1,8644 \cdot 10^{-5}$	$4,73892 \cdot 10^{-8}$	$-2,87266 \cdot 10^{-11}$
CO ₂	0,32	19,0223	$7,36291 \cdot 10^{-2}$	$-7,37067 \cdot 10^{-5}$	$3,74572 \cdot 10^{-8}$	$-8,13304 \cdot 10^{-12}$

A integração do lado esquerdo resulta:

$$(773 - T_3) \cdot \sum_{s=1}^2 F_s \cdot a_s + \frac{(773^2 - T_3^2)}{2} \cdot \sum_{s=1}^2 F_s \cdot b_s + \frac{(773^3 - T_3^3)}{3} \cdot \sum_{s=1}^2 F_s \cdot c_s$$

$$+ \frac{(773^4 - T_3^4)}{4} \cdot \sum_{s=1}^2 F_s \cdot d_s + \frac{(773^5 - T_3^5)}{5} \cdot \sum_{s=1}^2 F_s \cdot e_s =$$

$$F_{H_2O} \cdot [\tilde{H}_{H_2O}(5 \text{ bar; vap. sat.}) - \tilde{H}_{H_2O}(25^\circ\text{C, líq.})]$$

Assim:

$$(773 - T_3) \cdot (19,82102) + \frac{(773^2 - T_3^2)}{2} \cdot (0,073458) + \frac{(773^3 - T_3^3)}{3} \cdot (-6,9302 \cdot 10^{-5}) \\ + \frac{(773^4 - T_3^4)}{4} \cdot (3,82998 \cdot 10^{-8}) + \frac{(773^5 - T_3^5)}{5} \cdot (-9,9443 \cdot 10^{-12}) =$$

$$= 0,2 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \cdot \left[\tilde{H}_{\text{H}_2\text{O}}(5 \text{ bar; vap. sat.}) - \tilde{H}_{\text{H}_2\text{O}}(25^\circ\text{C; lq.}) \right]$$

obs: o efeito de P sobre $\hat{H}$ é desprezado, no caso de $\hat{H}_L$

$$\tilde{H}_V = 2747,5 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} \cdot \frac{18 \text{ kg}}{\text{kgmol}} \\ (\text{tab. 8B, p. 668})$$

$$\tilde{H}_L = 104,8 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} \cdot \frac{18 \text{ kg}}{\text{kgmol}} \\ (\text{tab. 8A, p. 665})$$

O valor de T_3 vem da solução da eq. acima, que pode ser obtida numericamente, graficamente ou por tentativas. Obtém-se (c/ solver do excel):

$$T_3 = 299,4^\circ\text{C} //$$

análise GL

método simplif. P/TCS

nº variáveis de processo
nº eqs. balanço
nº espec. independentes
nº restrições
BC

(BM) + BE

$$(3) + 4(\text{entalpias exógenas}) + 2(\dot{Q}; \dot{W}_s) \\ 1(\text{BE}) \\ (1) + 3(T_1; \hat{H}_2; \hat{H}_3) + 2(\dot{Q}=0; \dot{W}_s=0)$$

(1)

(1)

$$GL = 0 \quad 0$$