



Transporte Simultâneo de Calor e Massa –FT III - Lista 10 ex 1e 2

Prof. Dr. José Luis de Paiva
EPUSP

PQI – 3303 – Fenômenos dos Transportes III – 2020
10ª lista de exercícios

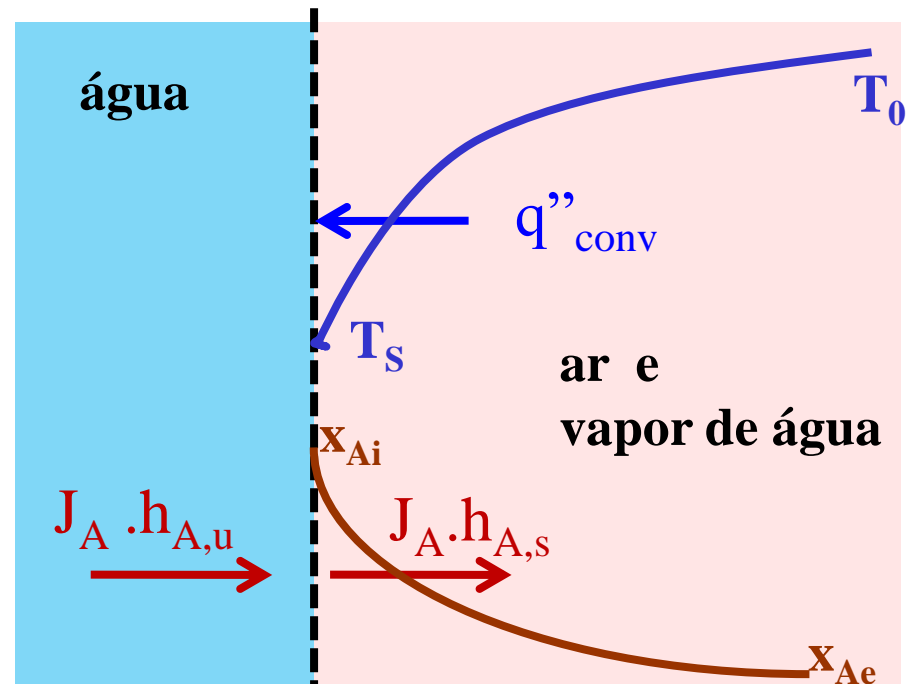
- 1) Qual a umidade relativa (%) e a umidade absoluta de uma corrente de ar nas seguintes condições: $P = 1 \text{ atm}$, $T_{BU} = 26,8 \text{ }^\circ\text{C}$ e $T_{BS} = 31,8 \text{ }^\circ\text{C}$. *Resposta: 68,5% e 0,025 kg água/kg ar.*

- 2) Deseja-se resfriar água de 328 K até 293 K, utilizando uma torre de resfriamento que opera a 1 atm. Ar entra em contracorrente a 293 K com uma umidade relativa de 20%. A vazão de ar úmido a ser usada é de $0,69 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ s})$ e a vazão de água a ser resfriada é de $0,26 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$. Admitir que a resistência ao transporte de calor e massa reside apenas na fase gasosa e que $AUT = 3,39 \text{ m}$ para esta torre. Estimar a altura da torre. Dados para cálculo das entalpias: $\Delta H_{eb, \text{água}} = 2495 \text{ kJ/kg}$ a 273 K, $C_{p \text{ ar, médio}} = 1,003 \text{ kJ}/(\text{kg K})$ e $C_{p \text{ vapor de água}} = 2,006 \text{ kJ}/(\text{kg K})$. Equação de Antoine: $\ln(P_V) = A - B/(T+C)$, $A = 18,3036$, $B = 3816,44$, $C = -46,13$, T (K) e P_V (mmHg). *Resposta: 2,2 m.*

- 3) (36.3 B&M) Água deve ser resfriada de 110 a 80 °F em uma torre de resfriamento, que opera a 1 atm. Ar escoa em contracorrente entrando a 75 °F e com temperatura de bulbo úmido de 70 °F. Calcule a altura da coluna necessária, considerando-se uma vazão de ar 33% superior à mínima e $H_G = 8 \text{ ft}$. Despreze a resistência à transferência de calor na fase líquida. *Resposta: 35 ft.*

Dados de entalpia de ar saturado (Perry & Chilton):

H_{ys} (kcal/kg)	18,9	24,2	27,4	31,0	35,2	39,8	45,2	51,3
T (°F)	70	80	85	90	95	100	105	110
T (°C)	21,1	26,7	29,4	32,2	35,0	37,8	40,6	43,3



$$X_{A,0} = X_{A,i} - \frac{h_c}{k h_{fg}} (T_0 - T_s)$$

$$\frac{h_c}{k_x} = c_{P,ar} \frac{Pr^{-2/3}}{Sc^{-2/3}}$$

Número de Lewis

$$\frac{Pr}{Sc} = Le \cong \frac{0.69}{0.61} = 1.13$$

$$X_{A,0} = X_{A,i} - \frac{Pr^{-2/3}}{Sc^{-2/3}} \frac{c_{P,ar}}{h_{fg}} (T_0 - T_s)$$

$$X_{A,0} = X_{A,i} - \frac{c_{P,ar}}{1.08 h_{fg}} (T_{BS} - T_{BU})$$

Dado de equilíbrio

$$X_{A,i} = X_{A,i}(T_{BU}, P)$$

1) Qual a umidade relativa (%) e a umidade absoluta de uma corrente de ar nas seguintes condições: $P = 1 \text{ atm}$, $T_{BU} = 26,8 \text{ }^\circ\text{C}$ e $T_{BS} = 31,8 \text{ }^\circ\text{C}$. Resposta: 68,5% e 0,025 kg água/kg ar.

$$T_{BU} = 26,8 + 273,2 = 300 \text{ K}$$

$$P_{\text{vapor}} = 3533 \text{ Pa}$$

$$Y_{wb} = \frac{3533}{101000} = 0,035$$

$$Y_{wb} = \frac{18 \times 0,035}{18 \times 0,035 + 29(1 - 0,035)} = 0,022$$

$$h_{ev}|_{300\text{K}} = 2,437 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$$

$$c_{p,ar} = 1005 \text{ J/kg K}$$

$$X_{A,0} = X_{A,i} - \frac{c_{p,ar}}{1.08 h_{fg}} (T_{BS} - T_{BU})$$

$$T_e = 31,8 + 273,2 = 305 \text{ K}$$

$$P_{\text{vapor}} = 4714 \text{ Pa}$$

$$T_{wb} = T_e - \frac{h_{ev}}{c_p} (Y_{wb} - Y_e)$$

$$Y_e = Y_{wb} - \frac{c_p}{h_{ev}} (T_e - T_{wb})$$

$$Y_e = 0,022 - \frac{1005}{2,437 \cdot 10^6 \times 1,08} (305 - 300)$$

$$Y_e = 0,0201$$

1) Qual a umidade relativa (%) e a umidade absoluta de uma corrente de ar nas seguintes condições: $P = 1 \text{ atm}$, $T_{BU} = 26,8 \text{ }^\circ\text{C}$ e $T_{BS} = 31,8 \text{ }^\circ\text{C}$. Resposta: 68,5% e 0,025 kg água/kg ar.

$$y_e = 0,0201$$

$$y_e = \frac{\frac{0,0201}{18}}{\frac{0,0201}{18} + \frac{(1-0,0201)}{29}} = 0,032 \Rightarrow P_e = 0,032 \times 101000 = 3230 \text{ Pa}$$

$$UR = \frac{P_e}{P_{vap}} = \frac{3230}{4714} = 0,685 \Rightarrow \underline{\underline{68,5\%}}$$

UMIDADE ABSOLUTA: $\frac{\text{kg água}}{\text{kg ar}} = \frac{0,0201}{1-0,0201} = \underline{\underline{0,0205}}$

2) Deseja-se resfriar água de 328 K até 293 K, utilizando uma torre de resfriamento que opera a 1 atm. Ar entra em contracorrente a 293 K com uma umidade relativa de 20%. A vazão de ar úmido a ser usada é de $0,69 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ s})$ e a vazão de água a ser resfriada é de $0,26 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$. Admitir que a resistência ao transporte de calor e massa reside apenas na fase gasosa e que $AUT = 3,39 \text{ m}$ para esta torre. Estimar a altura da torre. Dados para cálculo das entalpias: $\Delta H_{eb, \text{água}} = 2495 \text{ kJ/kg}$ a 273 K, $C_{p, \text{ar, médio}} = 1,003 \text{ kJ}/(\text{kg K})$ e $C_{p, \text{vapor de água}} = 2,006 \text{ kJ}/(\text{kg K})$. Equação de Antoine: $\ln(P_v) = A - B/(T+C)$, $A = 18,3036$, $B = 3816,44$, $C = -46,13$, T (K) e P_v (mmHg). Resposta: 2,2 m.

Entalpias do ar

$$H_y = \underset{\substack{\parallel \\ 1,003}}{C_{p_y}} (T - 273) + Y_A \left[\underset{\substack{\parallel \\ 2495}}{\Delta H_v} + \underset{\substack{\parallel \\ 2,006}}{C_{p_x}} (T - 273) \right]$$

Na entrada da coluna: 293 K e 20% UR $\Rightarrow Y_A = 0,003 \text{ kg/kg}$

$$H_{y_1} = 1,003(293 - 273) + 0,003 [2495 + 2,006(293 - 273)] = \left| 27,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right|$$

Linha de saturação

$$H_{SAT} = 1,003 (t_x - 273) + Y_{SAT} [2,006 (t_x - 273) + 2495]$$

↑ vapor
↑ 273

2) Deseja-se resfriar água de 328 K até 293 K, utilizando uma torre de resfriamento que opera a 1 atm. Ar entra em contracorrente a 293 K com uma umidade relativa de 20%. A vazão de ar úmido a ser usada é de $0,69 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ s})$ e a vazão de água a ser resfriada é de $0,26 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$. Admitir que a resistência ao transporte de calor e massa reside apenas na fase gasosa e que $AUT = 3,39 \text{ m}$ para esta torre. Estimar a altura da torre. Dados para cálculo das entalpias:

$\Delta H_{eb, \text{água}} = 2495 \text{ kJ/kg}$ a 273 K, $C_{p, \text{ar, médio}} = 1,003 \text{ kJ}/(\text{kg K})$ e $C_{p, \text{vapor de água}} = 2,006 \text{ kJ}/(\text{kg K})$.

Equação de Antoine: $\ln(P_v) = A - B/(T+C)$, $A = 18,3036$, $B = 3816,44$, $C = -46,13$, T (K) e P_v

$$H_{g1} = 1,003(293 - 273) + 0,003 [2495 + 2,006(293 - 273)] = \boxed{27,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}$$

Concentr. de ar com água no ar: $G = 0,68 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ s}$

$$\rho_{\text{ar}} = \frac{PM}{RT} = \frac{29}{0,082 \times 293} = 1,207 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$G = 0,68 \times 1,207 = 0,821 \text{ kg}/\text{m}^2 \text{ s}$$

$$\frac{LC_{p, \text{água}}}{G} = \frac{0,26 \times 4,186}{0,821} = 1,33$$

Linha de Operação:

$$\boxed{H_y = 27,7 + 1,33(t_x - 293)}$$

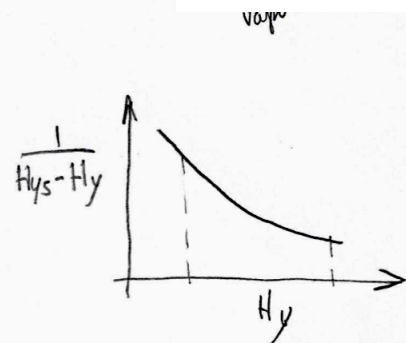
$$n_G = \int_{H_y = 27,7 \text{ (} t_x = 293 \text{ K)}}^{H_y = 74,25 \text{ (} t_x = 328 \text{ K)}} \frac{dH_y}{H_{y,s} - H_y} = 0,65$$

$$\boxed{z = H_G \cdot n_G = 3,39 \times 0,65 = 2,2 \text{ m}}$$

$$LC_{p, \text{ar}} \frac{dt_x}{dz} = G \frac{dH_y}{dz}$$

$$\frac{dH_y}{dt_x} = \frac{C_{p, \text{ar}} L}{G}$$

$$H_y = \frac{C_{p, \text{ar}} L}{G} t_x + H_{y0} - \frac{C_{p, \text{ar}} L}{G} t_{x0}$$



2) Deseja-se resfriar água de 328 K até 293 K, utilizando uma torre de resfriamento que opera a 1 atm. Ar entra em contracorrente a 293 K com uma umidade relativa de 20%. A vazão de ar úmido a ser usada é de $0,69 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ s})$ e a vazão de água a ser resfriada é de $0,26 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$. Admitir que a resistência ao transporte de calor e massa reside apenas na fase gasosa e que $AUT = 3,39 \text{ m}$ para esta torre. Estimar a altura da torre. Dados para cálculo das entalpias: $\Delta H_{eb, \text{água}} = 2495 \text{ kJ/kg}$ a 273 K, $C_{p \text{ ar, médio}} = 1,003 \text{ kJ}/(\text{kg K})$ e $C_{p \text{ vapor de água}} = 2,006 \text{ kJ}/(\text{kg K})$. Equação de Antoine: $\ln(P_v) = A - B/(T+C)$, $A = 18,3036$, $B = 3816,44$, $C = -46,13$, T (K) e P_v (mmHg). Resposta: 2,2 m.

$$\frac{LC_{ps}}{G} = \frac{0,26 \times 4,186}{0,821} = 1,33$$

linha de operação:

$$H_y = 27,7 + 1,33 (t_x - 293)$$

$$LC_{px} \frac{dt_x}{dz} = G \frac{dH_y}{dz}$$

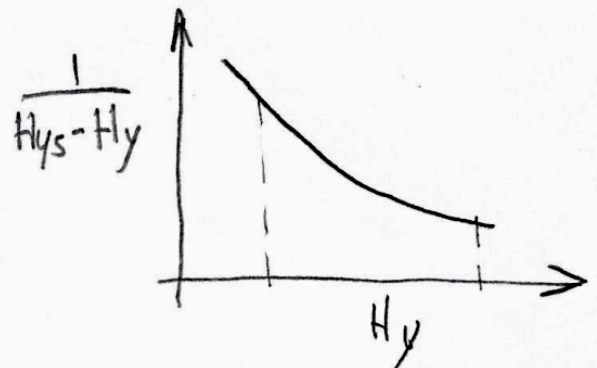
$$\frac{dH_y}{dt_x} = \frac{C_{px} L}{G}$$

$$H_y = \frac{C_{px} L}{G} t_x + H_{y0} - \frac{C_{px} L}{G} t_{x0}$$

$$\int_0^Z dz = H_G \int_{H_{y1}}^{H_{y0}} \frac{dH_y}{H_{ys} - H_y} = Z$$

$$n_G = \int_{H_y=27,7 (t_x=293 \text{ K})}^{H_y=74,25 (t_x=328 \text{ K})} \frac{dH_y}{H_{ys} - H_y} = 0,65$$

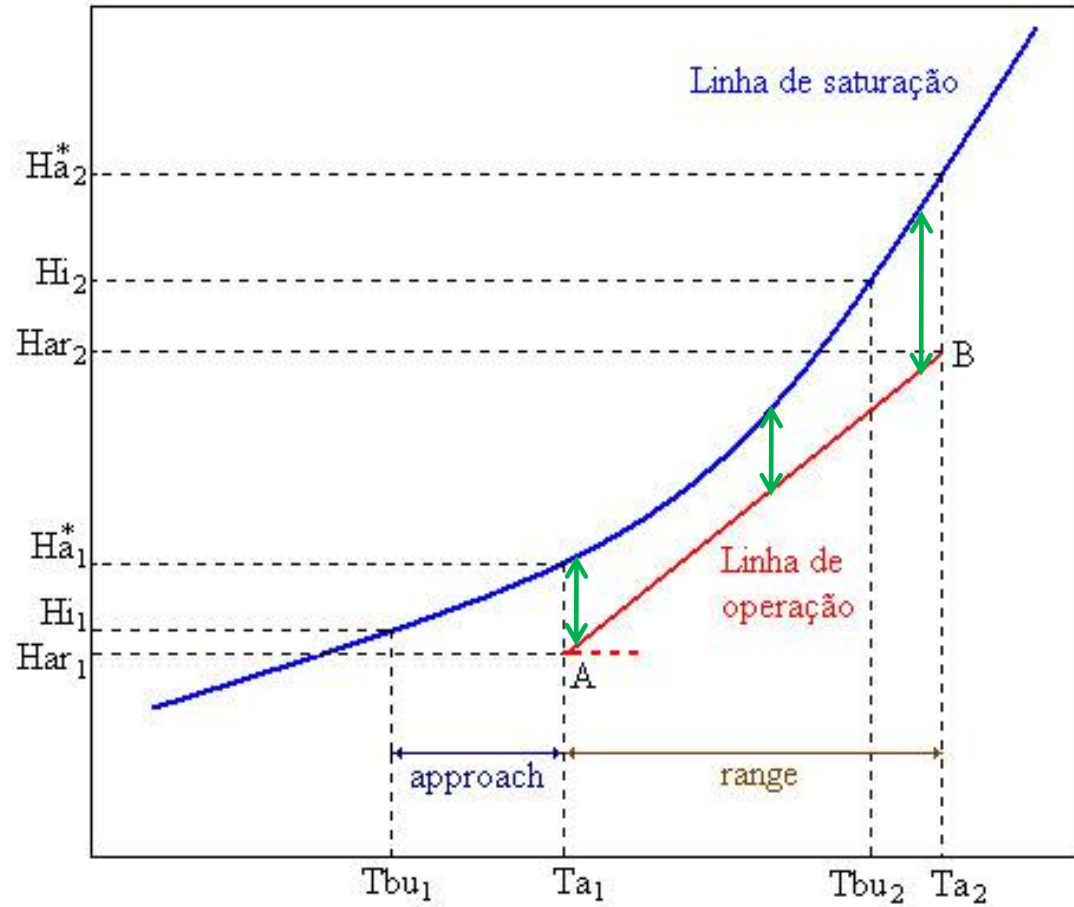
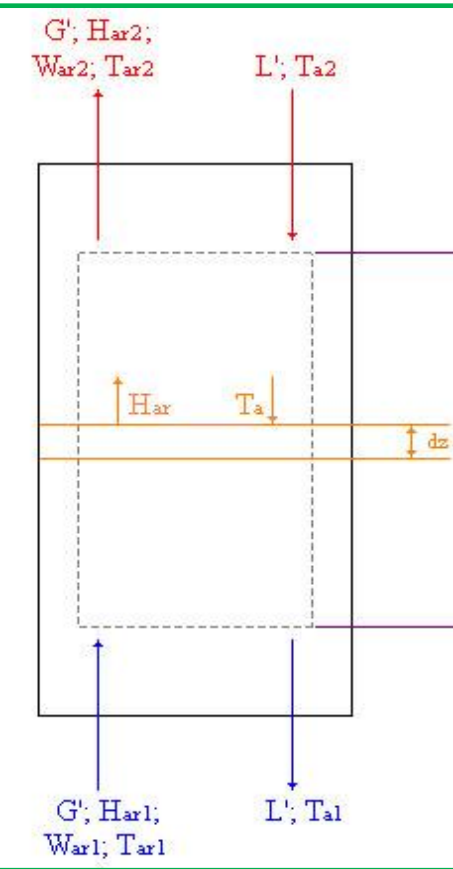
$$Z = H_G \cdot n_G = 3,39 \times 0,65 = 2,2 \text{ m}$$



$$H_{ar2} - H_{ar1} = \left(\frac{L'}{G'}\right) \cdot c_L \cdot (T_{a1} - T_{a2})$$

TORRE DE RESFRIAMENTO

Transporte simultâneo de calor e massa



↑
↓
Força motriz
($H^* - H_{ar}$)

Carga térmica da torre:

$$Q = w \cdot c_L \cdot (T_Q - T_F)$$