PQI – 3303 – Fenômenos de Transporte III – 2020
Departamento de Engenharia Química da EPUSP

Transporte Simultâneo de Calor e Massa

Em muitos sistemas multifásicos estão presentes processos transferência de calor e de massa simultâneos. Dentre as aplicações podemos citar: Processos de umidificação; resfriamento evaporativo (torres de resfriamento); combustão de gotas de combustível e condensação multicomponente.
Em algumas situações os processos de transferência de calor e de massa podem ser modelados de forma independente (desacoplada). No entanto, vários casos demandam a resolução simultânea das equações (acoplada).

1.Balanços de Energia – Interface

Um importante problema de transporte simultâneo de calor e massa é a evaporação de um líquido em contato com uma corrente de gás. A figura 1 ilustra o caso de uma corrente de água em contato com uma corrente de ar e vapor d'água. Observe os perfis de temperatura em ambas as fases e o de fração molar (ou mássica) na fase gás.

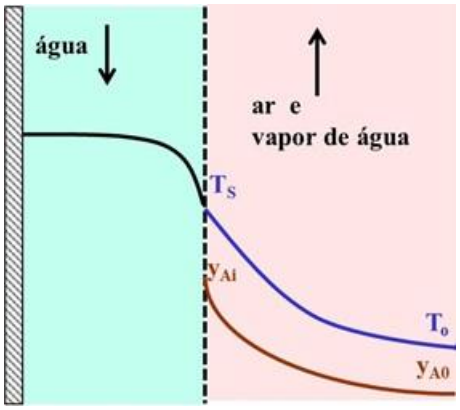


Figura 1 – Evaporação de água no contato com ar e vapor d'água.

Apresenta-se na Figura 2 um esquema do balanço de energia considerando-se as superfícies de controle u e s, explicitando-se os mecanismos de transporte de calor e massa.
O balanço de energia na interface é expresso pela equação (1) ou (2):

$$J_A h_{A,u} + q''_{conv,L} = J_A h_{A,s} + q''_{conv,V} + q''_{rad} \quad (1)$$

$$J_A (h_{A,s} - h_{A,u}) = q''_{conv,L} - q''_{conv,V} - q''_{rad} \quad (2)$$

Sendo a entalpia de condensação dada por:

$$(h_{A,s} - h_{A,u}) = h_{fg} \quad (3)$$

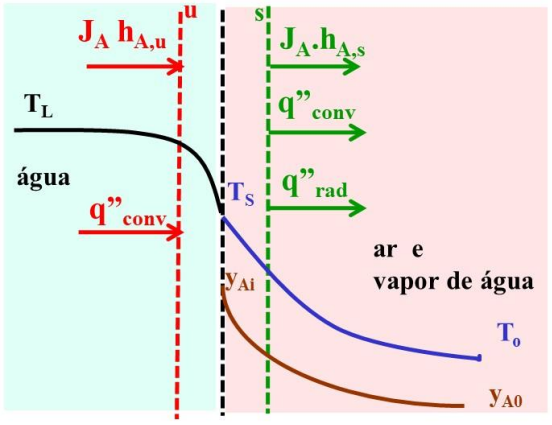


Figura 2 – Balanço de energia na interface.

Na condição de baixo transporte de massa os fluxos de massa e calor são expressos por:

$$J_A = k_y\left(y_{A,i} - y_{A,0}\right) \quad (4)$$

$$q''_{conv,V} = h_V(T_S - T_0) \quad (5)$$

$$q''_{conv,L} = h_L(T_L - T_S) \quad (6)$$

Substituindo-se (4) -(6) na equação 2, resulta:

$$h_L(T_L - T_S) = h_V(T_S - T_0) + k_y\left(y_{A,i} - y_{A,0}\right)h_{fg} + q''_{rad} \quad (7)$$

2. Temperatura de bulbo úmido

As medidas de temperatura de bulbo úmido e seco são muito utilizadas para determinação da umidade do ar. No dispositivo mais simples (Figura 3) o ar escoa externamente aos bulbos de dois termômetros. Um bulbo é revestido com uma camada de tecido mantida umedecida. Com a evaporação da água tem-se o resfriamento do bulbo úmido e a temperatura atingida na condição de regime permanente é função da temperatura e umidade do ar. A partir da pressão e das temperaturas de bulbo úmido e seco calcula-se a umidade do ar.

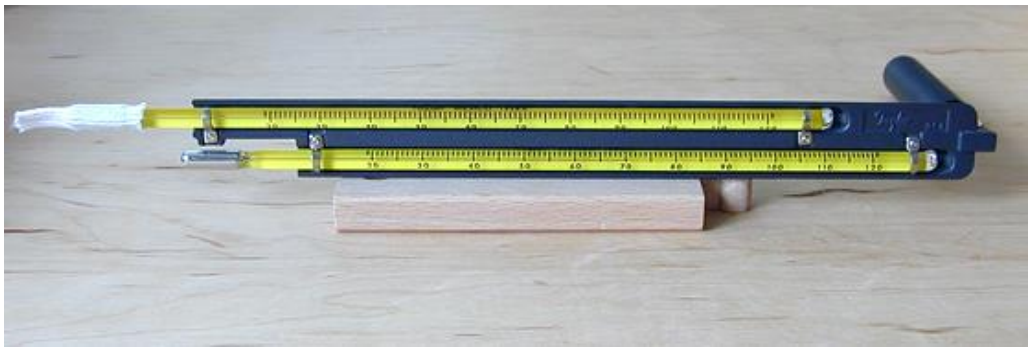


Figura 3 – Termômetros para medidas de bulbo úmido e seco

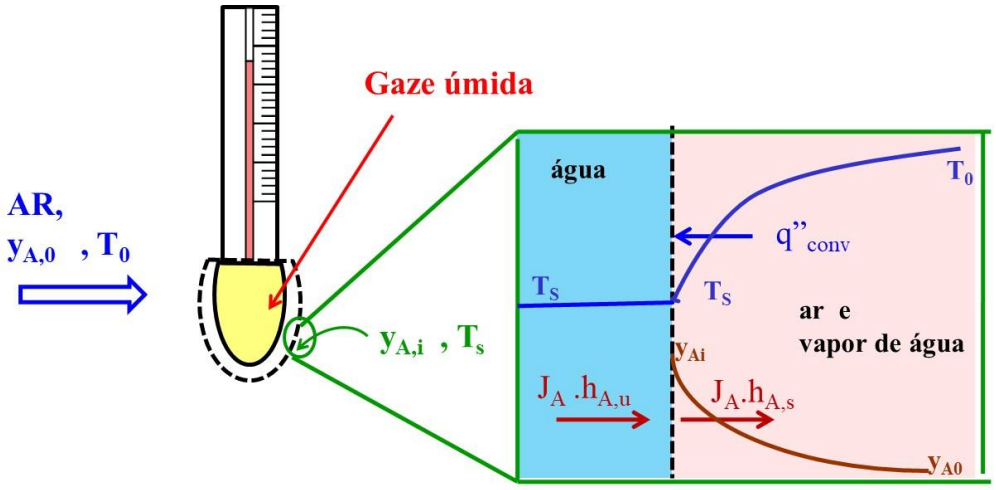


Figura 4 – Balanço de energia - Bulbo úmido

Da equação (7), tem-se:

$$0 = h_V(T_S - T_0) + k_y(y_{A,i} - y_{A,0})h_{fg} + 0 \quad (8)$$

$$y_{A,0} = y_{A,i} - \frac{h_V}{k_x h_{fg}}(T_0 - T_S) \quad (9)$$

A relação entre os coeficientes de transferência de calor e massa é obtida a partir da analogia de Colburn:

$$j_H = \frac{Nu}{RePr^{1/3}} = j_M = \frac{Sh}{ReSc^{1/3}} \Rightarrow \frac{Nu}{Sh} = \frac{Pr^{1/3}}{Sc^{1/3}} \quad (10)$$

$$Nu = \frac{h_V L}{k} \; e \; Sh = \frac{k_y L}{\rho D_{AB}} \quad (11)$$

$$\frac{Nu}{Sh} = \frac{h_c}{k_x c_{P,ar}} \frac{Pr}{Sc} = \frac{Pr^{1/3}}{Sc^{1/3}} \quad (12)$$

$$\frac{h_c}{k_x} = C_{P,ar} \frac{Pr^{-2/3}}{Sc^{-2/3}} \quad (13)$$

No caso do sistema ar-água:

$$\frac{Pr}{Sc} = Le \cong \frac{0.69}{0.61} = 1{,}13 \quad (14)$$

Substituindo-se na equação (9), resulta:

$$y_{A,0} = y_{A,i} - Le^{-2/3} \frac{c_{P,ar}}{h_{fg}}(T_0 - T_S) \quad (15)$$

$$y_{A,0} = y_{A,i} - \frac{c_{P,ar}}{1{,}08 h_{fg}}(T_0 - T_S) \quad (16)$$

3. Torres de resfriamento

As torres de resfriamento de água de contato direto operam com base no resfriamento evaporativo da água quente em contato com o ar ambiente.

Numa primeira análise será considerado o contato entre aa fases em contracorrente. A água é resfriada a partir da sua evaporação decorrente do contato com o ar que se aquece e se umidifica ao longo da coluna.
O esquema da figura 5 ilustra a operação em contracorrente e a especificação das variáveis nas correntes de água e ar.

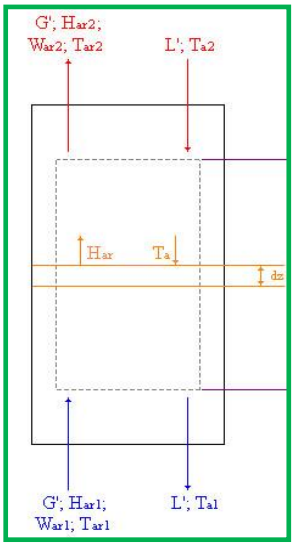


Figura 5 – Esquema da Torre de resfriamento

3.1. Balanço de entalpia

As entalpias da água e do ar são expressas pelas equações (17) e (18), tendo-se como referência a água líquida a t_r:

$$H_x = C_{px}(t_x - t_r) \qquad (17)$$

$$H_y = C_{py}(t_y - t_r) + h_{fg} y_A \qquad (18)$$

O balanço global de energia para um elemento de altura da torre dz, na condição adiabática e em regime permanente é dado por:

$$d(LH_x) = d(GH_y) \qquad (19)$$

Sendo L e G os fluxos mássicos de água e de ar e H_x e H_y as entalpias destas correntes.

Substituindo-se as entalpias (equações 17 e 18), tem-se:

$$LC_{px}\frac{dt_x}{dz} = GC_{py}\frac{dt_y}{dz} + h_{fg}G\frac{dy_A}{dz} \qquad (20)$$

3.2. Transferência de calor e massa

A transferência de calor da fase gás e a variação da entalpia do ar, para o elemento de altura dz é expresso pela equação (21). Assume-se que a temperatura da interface t_s é praticamente igual à temperatura do líquido t_x, em decorrência da alta condutividade térmica da água em relação à do ar.

$$h_y{}^o(t_s - t_y)aAdz = Ad(GC_{py}t_y) \qquad (21)$$

Rearranjando-se:

$$-\frac{dt_y}{dz} = \frac{h_y{}^o(t_y - t_s)a}{GC_{py}} \quad (22)$$

$$-\frac{dt_y}{dz} = \frac{(t_y - t_s)}{H_{ty}} \quad (23)$$

Sendo $H_{ty} = GC_{py}/h_y{}^o a$

A taxa de transferência de massa da fase líquida para o gás é expressa por:

$$k_y(y_{AS} - y_A)aAdz = Ad(Gy_A) \quad (24)$$

$$-\frac{dy_A}{dz} = (y_A - y_{AS})\frac{k_y a}{G} \quad (25)$$

$$-\frac{dy_A}{dz} = \frac{(y_A - y_{AS})}{H_G} \quad (26)$$

Sendo $H_G = G/k_y a$

Substituindo-se (23) e (26)no balanço de entalpia (equação 20):

$$-LC_{px}\frac{dt_x}{dz} = GC_{py}\frac{(t_y - t_s)}{H_{ty}} + h_{\mathrm{fg}}G\frac{(y_A - y_{AS})}{H_G} \quad (27)$$

Da analogia de Colburn, para o sistema ar/água:

$$\frac{H_G}{H_{ty}} = \frac{h_y{}^o}{k_y C_{py}} = \left(\frac{Pr}{Sc}\right)^{-2/3} = Le^{-2/3} \cong 1{,}0 \quad (28)$$

Resultando:

$$-LC_{px}\frac{dt_x}{dz} = \frac{G}{H_G}\left[C_{py}(t_y - t_s) + h_{\mathrm{fg}}(y_A - y_{AS})\right] \quad (29)$$

3.3. Dimensionamento básico

Identificando-se as entalpias do ar no seio do gás (30) e na interface (31) (saturado) e substituindo-se em (29), resulta (32):

$$H_y = C_{py}(t_y - t_r) + h_{\mathrm{fg}}y_A \quad (30)$$

$$H_{yS} = C_{py}(t_{yS} - t_r) + h_{\mathrm{fg}}y_{AS} \quad (31)$$

$$-LC_{px}\frac{dt_x}{dz} = \frac{G}{H_G}\left[H_y - H_{ys}\right] = \quad (32)$$

De outra forma, tem-se:

$$-LC_{px}\frac{dt_x}{dz} = -\frac{d(LH_x)}{dz} = -\frac{d(GH_y)}{dz} \quad (33)$$

Rearranjando-se (32) e (33):

$$-\frac{dH_y}{dz} = \frac{H_y - H_{ys}}{H_G} \quad (34)$$

Integrando-se para obter a altura do leito, resulta:

$$\int_0^z dz = H_G \int_{H_{y1}}^{H_{y0}} \frac{dH_y}{H_{ys} - H_y} = z \quad (35)$$

Retomando-se o balanço de entalpia (33), tem-se a linha de operação (38) que relaciona a entalpia do ar e a temperatura da água ao longo da altura:

$$LC_{px}\frac{dt_x}{dz} = G\frac{dH_y}{dz} \tag{36}$$

$$\frac{dH_y}{dt_x} = \frac{C_{px}L}{G} \tag{37}$$

$$H_y = \frac{C_{px}L}{G}t_x + H_{y0} - \frac{C_{px}L}{G}t_{x0} \tag{38}$$

A figura 6 apresenta um esquema com a linha de operação H_y x t_x e a linha de equilíbrio (saturação) H_{yS} x t_x

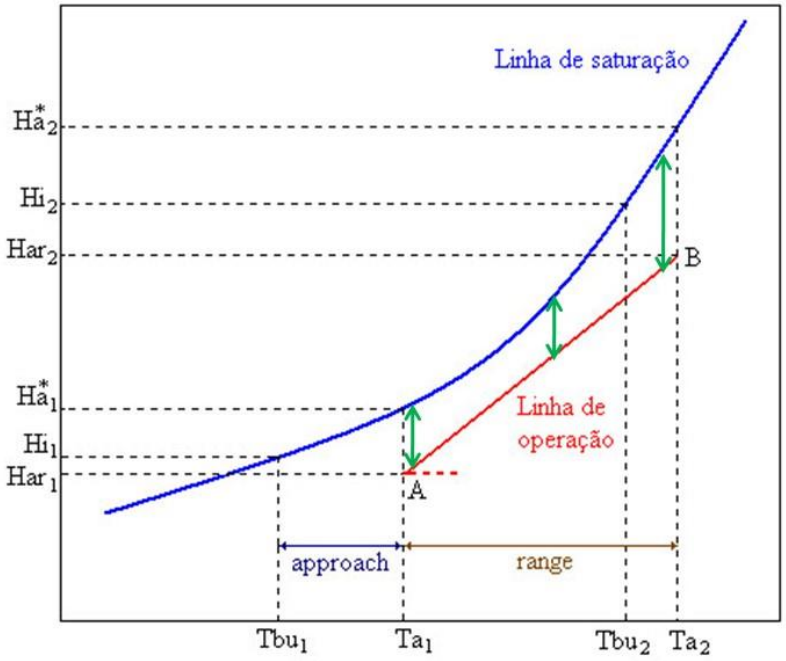


Figura 6 – Linha de operação e de equilíbrio

Bibliografia

- Bennett & Myers - Fenômenos de Transporte, 2ª ed. 1978 – Mc Graw Hill
- Perry's Chemical Engineer's Handbook, 1997 – Mc Graw Hill
- Mills, A. F. Mass Transfer. Prentice Hall NJ, 2001.