2º LISTA DE EXERCÍCIOS DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA

1- Para um sistema isotérmico e diluído em que o componente A é transferido da *fase líquida à gasosa*, a relação de equilíbrio é dada por $y_{Ai} = 1,25x_{Ai}$. Em um certo ponto do equipamento experimental o líquido contém 60% em mols de A e a composição de A na fase gasosa é 20%. O coeficiente individual de transferência de massa do filme gasoso apresenta o valor $1,5x10^{-3}$ kgmol/(m^2.s.Δy_A) e a transferência da fase gasosa é 30% da global. Calcule:

a) o fluxo molar de A;

b) as frações molares de A no equilíbrio;

c) os coeficientes globais k_x, K_x, K_y.

Solução: $L \rightarrow G$

Dados:

$k_y = 1,5x10^{-3}$ kgmol/(m^2.s.Δy_A)

$y_{Ai} = 1,25x_{Ai}$

$y_{AG} = 0,20$

$x_{AL} = 0,60$

$1/k_y = 0,30(1/K_y)$

Cálculo de K_y

$K_y = 0,30k_y$ ‘’= 0,30[$1,5x10^{-3}$ kgmol/(m^2.s.Δy_A)]

$K_y = 4,5x10^{-4}$ kgmol/(m^2.s.Δy_A)]

Cálculo de y_{Ai} e x_{Ai}

$$-\frac{k_x}{k_y} = \frac{y_{A_G} - y_{A_i}}{x_{A_L} - x_{A_i}}$$

$$-\frac{k_x}{1,5x10^{-3}} = \frac{0,2 - 1,25x_{A_i}}{0,6 - x_{A_i}}$$

$$\frac{1}{K_y} = \frac{1}{k_y} + \frac{m}{k_x}$$

$$\frac{1}{4{,}5x10^{-4}} = \frac{1}{1{,}5x10^{-3}} + \frac{1{,}25}{k_x}$$

$$k_x = 8{,}04x10^{-4}\ \text{kgmol/(m}^2\text{.s.}\Delta x_A)$$

$$-\frac{8{,}04x10^{-4}}{1{,}5x10^{-3}} = \frac{0{,}2 - 1{,}25x_{A_i}}{0{,}6 - x_{A_i}}$$

$$-5{,}36x10^{-1} = \frac{0{,}2 - 1{,}25x_{A_i}}{0{,}6 - x_{A_i}} \Rightarrow x_{A_i} = 0{,}29$$

$$y_{A_i} = 1{,}25x_{A_i} = 1{,}25(0{,}29) \Rightarrow y_{A_i} = 0{,}363$$

Cálculo de N_{Ay} ($L \rightarrow G$)

$$N_{A,Z} = k_x\left(x_{A_L} - x_{A_i}\right) = 8{,}04x10^{-4}\ \text{kgmol/(m}^2\text{.s.}\Delta x_A)[0{,}60 - 0{,}29]$$

$$N_{A,Z} = 2{,}492x10^{-4}\ \text{kgmol/(m}^2\text{.s)}$$

Cálculo de K_x

$$\frac{1}{K_x} = \frac{1}{mk_y} + \frac{1}{k_x} = \frac{1}{1{,}25(1{,}5x10^{-3})} + \frac{1}{8{,}04x10^{-4}}$$

$$\frac{1}{K_x} = 1777{,}1144 \Rightarrow K_x = 5{,}63x10^{-4}\ \text{kgmol/(m}^2\text{.s.}\Delta x_A)$$

2- Uma coluna de 50 cm de diâmetro, recheada de anéis de Raschig cerâmicos de diâmetro nominal igual a 16 mm, foi construída para absorver 90% de CO_2 presente em 0,75% (em mols) numa corrente de ar. Sabendo que a torre opera a 40°C e 1atm, utilizou-se água como agente absorvedor com velocidade superficial igual a 0,013 m/s, a qual é alimentada no topo da coluna e escoa em contracorrente em relação ao fluxo do gás. Entretanto, verificaram-se traços de CO_2 na água de alimentação, os quais foram estimados, em porcentagem molar, em $2x10^{-5}$%. Depois de medir as taxas molares de alimentação, tanto da corrente leve quanto da pesada, encontrou-se os seguintes valores: 0,3 kgmol/h e 850 kgmol/h, respectivamente. Pelo fato de a relação de equilíbrio, para as condições de operação dessa torre, ser dada por $y_{Ai} = 2{,}33x10^3 x_{Ai}$, calcule a altura efetiva da seção recheada. Para tanto, utilize a correlação de Onda et al. (1968) para a estimativa da área efetiva de transferência de massa, assim como os cálculos dos coeficientes volumétricos individuais de transferência de massa. Na necessidade de se determinar os coeficientes de difusão das fases leve e pesada, lance mão da correlação de Wilke e Chang (1955).

Espécies	**M_i (g/mol)**	**ρ_i (kg/m^3)**	**ν (m^2/s)**	**V_{bi} ($cm^3/gmol$)**
Água (B)	**18,015**	**992,3**	**$0{,}668x10^{-6}$**	**18,7**
Ar (B)	**28,85**	**1,091**	**$0{,}175x10^{-4}$**	**-**
CO_2 (A)	**44,01**	**1,630**	**$0{,}095x10^{-4}$**	**34,0**

Dados:

D_T = 50 cm = 0,5 m
Anéis Raschig cerâmicos de 16mm: d_s = 16mm (0,016m); $a_s = 328\ m^2/m^3$ (Tabela)
T = 40°C e P = 1atm (constante)
Rendimento = 90% de CO_2 é absorvido
y_{A1} = 0,75% ou $7{,}5x10^{-3}$
$x_{A2} = 2x10^{-5}$% ou $2x10^{-7}$
G = 0,3 kgmol/h e L = 850 kgmol/h
$y_{Ai} = 2{,}33x10^3 x_{Ai}$
σ_L = 72,47 dinas/cm (molhabilidade)
σ_c = 61,0 dinas/cm (cerâmica)

Solução:

Passo 1: Identificar o equilíbrio termodinâmico:

$y_{Ai} = 2{,}33x10^3 x_{Ai} \Rightarrow m = 2{,}33x10^3$

Passo 2: Identificar a técnica de separação:

$G \rightarrow L$

Passo 3: Identificar o tipo de contato:

Contracorrente (↓↑)

Passo 4: Identificar e determinar as variáveis (concentrações, frações, taxas e fluxos) conhecidas no topo e na base do equipamento:

Balanço material para a fase gasosa: (base de cálculo: 1 h)
mols de gases que entram = 0,3 kgmols
mols de A que entram: $(7{,}5\text{x}10^{-3})(0{,}3) = 2{,}25\text{x}10^{-3}$ kgmols
mols de B que entram: $(1 - 7{,}5\text{x}10^{-3})(0{,}3) = 0{,}29775$ kgmols
Fração molar absoluta de A na base da torre (Y_{A1}):

$$Y_{A1} = \frac{\text{mols de A}}{\text{mols de B}} = \frac{2{,}25\text{x}10^{-3}}{0{,}29775} = 7{,}56\text{x}10^{-3}$$

ou

$$Y_{A_1} = \frac{y_{A_1}}{1 - y_{A_1}} = \frac{7{,}5\text{x}10^{-3}}{1 - 7{,}5\text{x}10^{-3}} = 7{,}56\text{x}10^{-3}$$

Fração molar absoluta de A no topo da torre (Y_{A2}):
mols de A absorvidos: $(0{,}9)(2{,}25\text{x}10^{-3}$ kgmols$) = 2{,}025\text{x}10^{-3}$ kgmols
mols de A na saída: (entra) – (sai) = (entra) – (o que foi para outra fase) = $(2{,}25 - 2{,}025)\text{x}10^{-3} = 2{,}25\text{x}10^{-4}$ kgmols

$$Y_{A2} = \frac{\text{mols de A}}{\text{mols de B}} = \frac{2{,}25\text{x}10^{-4}}{0{,}29775} = 7{,}56\text{x}10^{-4}$$

Balanço material para a fase líquida: (base de cálculo: 1 h)
mols de líquido que entra= 850 kgmols
mols de A que entram: $(2\text{x}10^{-7})(850) = 1{,}7\text{x}10^{-4}$ kgmols
mols de B que entram: $(1 - 2\text{x}10^{-7})(850) = 849{,}99$ kgmols
Fração molar absoluta de A no topo da torre (X_{A2}):

$$X_{A2} = \frac{\text{mols de A}}{\text{mols de B}} = \frac{1{,}7\text{x}10^{-4}}{849{,}99} = 2\text{x}10^{-7}$$

Fração molar absoluta de A na base da torre (X_{A1}):
mols de A que saem: (entra) + (sai) = (entra) + (o que foi para outra fase) = $(1{,}7\text{x}10^{-4} + 2{,}025\text{x}10^{-3} = 2{,}195\text{x}10^{-3}$ kgmols

$$X_{A1} = \frac{\text{mols de A}}{\text{mols de B}} = ?$$

Para operação contracorrente (+):

$$\frac{L_s}{G_s} = \frac{Y_{A_1} - Y_{A_2}}{X_{A_1} - X_{A_2}}$$

$G = 0{,}3$ Kgmols/h

$G' = (1 - y_{A1})L = (1 - 7{,}5x10^{-3})(0{,}3 \text{ Kgmols/h}) = 0{,}298$ Kgmols/h

$G_S = G'/A = 4G'/\pi D^2 = 4x0{,}298\text{Kgmol/h}/\pi(0{,}5\text{m})^2 = 1{,}518 \text{ Kgmol/h.m}^2$

$L = 850$ Kgmols/h

$L' = (1 - x_{A2})L = (1 - 2x10^{-7})(850 \text{ Kgmols/h}) = 849{,}999$ Kgmols/h

$L_S = L'/A = 4L'/\pi D^2 = 4x849{,}999\text{Kgmol/h}/\pi(0{,}5\text{m})^2 = 4329{,}01 \text{ Kgmol/h.m}^2$

$$\frac{L_s}{G_s} = \frac{Y_{A_1} - Y_{A_2}}{X_{A_1} - X_{A_2}}$$

$$\frac{4329{,}01}{1{,}518} = \frac{7{,}56x10^{-3} - 7{,}56x10^{-4}}{X_{A_1} - 2x10^{-7}}$$

$$2851{,}79 = \frac{6{,}804x10^{-3}}{X_{A_1} - 2x10^{-7}}$$

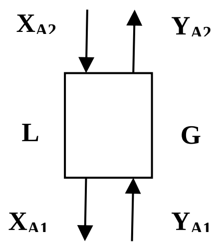
$$X_{A_1}(2851{,}79) - 5{,}7036x10^{-4} = 6{,}804x10^{-3}$$

$$X_{A_1} = \frac{6{,}804x10^{-3} + 5{,}7036x10^{-4}}{2851{,}79}$$

$$\boxed{X_{A_1} = 2{,}59x10^{-6}}$$

Passo 5: Construir o esquema do equipamento especificando as variáveis conhecidas no passo 4.

$X_{A1} = 2{,}59x10^{-6}$	$Y_{A1} = 7{,}56x10^{-3}$
$X_{A2} = 2x10^{-7}$	$Y_{A2} = 7{,}56x10^{-4}$



Passo 6: Informação sobre transferência de massa.
Passo 6.1: Obtenção dos coeficientes individuais de transferência de massa.

Onda et al. (1968) para recheios randômicos

$$k_x = 5{,}1\mathrm{x}10^{-3}\left(\frac{\rho_L}{M_L}\right)(g\nu_L)^{1/3}(d_s a_s)^{0,4}\left(\frac{a_s}{a_w}Re_L\right)^{2/3} Sc_L^{-1/2} \quad \text{(fase líquida)}$$

$$Re_L = \frac{u_L}{a_s \nu_L} \quad \text{(Reynolds)} \; ; \; Sc_L = \frac{\nu_L}{D_{AB_L}} \quad \text{(Schmidt)}$$

$$k_y = 5{,}23 a_s D_{AB_G}(d_s a_s)^{-2,0}\left(\frac{P}{RT}\right)Re_G^{0,7}Sc_G^{1/3} \quad \text{(fase gasosa)}$$

$$Re = \frac{u_G}{a_s \nu_G} \quad \text{(Reynolds)}$$

Cálculo do coeficiente de difusão na fase líquida ($D_{CO2\text{-}Água}$)
Correlação de Wilke e Chang (1955)

$$\boxed{\frac{D^o_{AB}.\mu_B}{T} = 7{,}4\mathrm{x}10^{-8}.\frac{(\phi.M_B)^{\frac{1}{2}}}{Vb_A^{\;0,6}}}$$

Água: Ø = 2,6; M_B = 18,015 g/gmol; ν_B = 0,668x10^{-6} m^2/s; ρ_B = 0,9922497 g/cm^3 a 40°C

$\mu_B = (\nu_B)(\rho_B) = (6{,}68\mathrm{x}10^{-3}\mathrm{cm}^2/\mathrm{s})(0{,}9922497\mathrm{g/cm}^3) = 6{,}63\mathrm{x}10^{-3}$ g/cm.s (poise)

1 CP = 0,01 poise $\Rightarrow \mu_B = 0{,}663$ CP

CO_2: V_{bA} = 34 cm^3/gmol

T = 40°C + 273,15K = 313,15 K

$$\frac{D^o_{AB}.\mu_B}{T} = 7{,}4\mathrm{x}10^{-8}.\frac{(\phi.M_B)^{\frac{1}{2}}}{Vb_A^{\;0,6}}$$

$$D_{AB} = \left(\frac{T}{\mu_B}\right)7{,}4\mathrm{x}10^{-8}.\frac{(\phi.M_B)^{\frac{1}{2}}}{Vb_A^{\;0,6}} = \left(\frac{313{,}15}{0{,}663}\right)7{,}4\mathrm{x}10^{-8}.\frac{(2{,}6\mathrm{x}18{,}015)^{\frac{1}{2}}}{(34)^{0,6}}$$

$$\boxed{D_{AB} = 2{,}882\mathrm{x}10^{-5}\ \mathrm{cm}^2/\mathrm{s}}$$

$$Re_L = \frac{u_L}{a_s \nu_L} = \frac{0{,}013\mathrm{m/s}}{328\mathrm{m}^2/\mathrm{m}^3 \mathrm{x} 0{,}668\mathrm{x}10^{-6}\mathrm{m}^2/\mathrm{s}}$$

$$\boxed{Re_L = 59{,}333}$$

$$Sc_L = \frac{\nu_L}{D_{AB_L}} = \frac{6{,}68x10^{-3}\,cm^2/s}{2{,}882x10^{-5}\,cm^2/s}$$

$$\boxed{Sc_L = 231{,}78}$$

Cálculo da área molhada a_w:

Onda et al. (1968) para recheios randômicos com $a/a_w = 1$

$$\frac{a_w}{a_s} = 1{,}0 - \exp\left[-1{,}45\left(\frac{\sigma_c}{\sigma_L}\right)^{0{,}75} Re_L^{0{,}1} Fr_L^{-0{,}05} We_L^{0{,}2}\right]$$

$$Re_L = \frac{u_L}{a_s \nu_L} \quad \text{(Reynolds)} \; ; \; 0{,}04 \langle Re_L \langle 500$$

$$Fr_L = \frac{a_s u_L^2}{g} \quad \text{(Froud)} \; ; \; 2{,}5x10^{-9} \langle Fr_L \langle 1{,}8x10^{-2}$$

$$We_L = \frac{\rho_L u_L^2}{a_s \sigma_L} \quad \text{(Weber)} \; ; \; 1{,}2x10^{-8} \langle We_L \langle 0{,}27$$

$$0{,}3 \langle \sigma_c / \sigma_L \langle 2$$

$\sigma_c = 61$ dinas/cm (cerâmica)

$\sigma_L = 72{,}47x10^{-3}$ N/m ou

$\sigma_L = 72{,}47$ dinas/cm

$$Fr_L = \frac{a_s u_L^2}{g} \quad \text{(Froud)} \; ; \; 2{,}5x10^{-9} \langle Fr_L \langle 1{,}8x10^{-2}$$

$$Fr_L = \frac{a_s u_L^2}{g} = \frac{(328\,m^2/m^3)(0{,}013 m/s)^2}{9{,}81\,m/s^2}$$

$$\boxed{Fr_L = 5{,}65x10^{-3}}$$

$$We_L = \frac{\rho_L u_L^2}{a_s \sigma_L} \quad \text{(Weber)} \; ; \; 1{,}2x10^{-8} \langle We_L \langle 0{,}27$$

$$We_L = \frac{\rho_L u_L^2}{a_s \sigma_L} = \frac{(992{,}2497 kg/m^3)(0{,}013 m/s)^2}{(328 m^2/m^3)(72{,}47x10^{-3} Kg/s^2)}$$

$$\boxed{We_L = 7{,}055x10^{-3}}$$

$$\frac{a_W}{a_s} = 1{,}0 - \exp\left[-1{,}45\left(\frac{\sigma_c}{\sigma_L}\right)^{0{,}75} Re_L^{0{,}1} Fr_L^{-0{,}05} We_L^{0{,}2}\right]$$

$$\frac{a_W}{a_s} = 1{,}0 - \exp\left[-1{,}45\left(\frac{61}{72{,}47}\right)^{0{,}75} (59{,}333)^{0{,}1}(5{,}65x10^{-3})^{-0{,}05}(7{,}055x10^{-3})^{0{,}2}\right]$$

$$\frac{a_W}{a_s} = 1{,}0 - \exp[-1{,}45(0{,}878)(1{,}5043)(1{,}2954)(0{,}3713)]$$

$$\frac{a_W}{a_s} = 1{,}0 - \exp[-0{,}9211]$$

$$\frac{a_W}{a_s} = 1{,}0 - 0{,}3981 \Rightarrow \frac{a_W}{a_s} = 0{,}602$$

$$\frac{a_W}{a_s} = 0{,}602 \Rightarrow a_W = (0{,}602)(328\, m^2/m^3)$$

$$\boxed{a_W = 197{,}456\, m^2/m^3}$$

Cálculo do coeficiente individual de transferência de massa em fase líquida (k_x)

Onda et al. (1968) para recheios randômicos

$$k_x = 5{,}1x10^{-3}\left(\frac{\rho_L}{M_L}\right)(g\nu_L)^{1/3}(d_s a_s)^{0{,}4}\left(\frac{a_s}{a_w}Re_L\right)^{2/3} Sc_L^{-1/2} \quad \text{(fase líquida)}$$

$$k_x = 5{,}1x10^{-3}\left(\frac{992{,}2497\ kg/m^3}{18{,}015\ kg/kgmol}\right)\left[(9{,}81 m/s^2)(0{,}668x10^{-6} m^2/s)\right]^{1/3}\left[(0{,}016\, m)(328\ m^2/m^3)\right]^{0{,}4}\left(\frac{328\, m^2/m^3}{197{,}456\ m^2/m^3}(59{,}333)\right)^{2/3}(231{,}78)^{-1/2}$$

$$k_x = 5{,}1x10^{-3}(55{,}08\ Kgmol/m^3)(0{,}02\, m/s)(1{,}94)(21{,}34)(0{,}07)$$

$$\boxed{k_x = 1{,}63x10^{-2}\ Kgmol/(m^2.s)}$$

$$\boxed{a_W = 197{,}456\, m^2/m^3}$$

$$k_x a = (1{,}63x10^{-2}\ Kgmol/(m^2.s))(197{,}456\, m^2/m^3)$$

$$\boxed{k_x a = 3{,}2185\, Kgmol/(m^3.s)}$$

Cálculo do coeficiente individual de transferência de massa em fase gasosa (k_y)

$$k_y = 5{,}23 a_s D_{AB_G} (d_s a_s)^{-2{,}0} \left(\frac{P}{RT}\right) Re_G^{0{,}7} Sc_G^{1/3} \quad \text{(fase gasosa)}$$

$$Re = \frac{u_G}{a_s \nu_G} \quad \text{(Reynolds)} \; ; \; Sc_G = \frac{\nu_G}{D_{AB_G}} \quad \text{(Schmidt)}$$

Cálculo do coeficiente de difusão na fase gasosa ($D_{CO2\text{-}Ar}$)

Equação de Chapman-Enskog

$$\boxed{D_{AB} = 1{,}858 \text{x} 10^{-3} \frac{T^{\frac{3}{2}}}{P \sigma_{AB}{}^2 \Omega_D} \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}}}$$

M_A = 44,01 g/gmol
M_B = 28,85 g/gmol
P = 1 atm
T = 40°C = 313,15K

Cálculo do σ_{AB} para moléculas apolares

$$\sigma_{AB} = \frac{\sigma_A + \sigma_B}{2} \quad , \quad \sigma_i = 1{,}18.V_b^{\frac{1}{3}} \; , \; A = CO_2 \; , \; B = \text{Ar seco}$$

$$\sigma_A = 1{,}18.V_{b_A}^{\frac{1}{3}} = 1{,}18.(34{,}0 cm^3 / g)^{\frac{1}{3}} = 3{,}823 \overset{0}{A}$$

$$\sigma_B = 3{,}711 \overset{0}{A} \; (\text{literatura})$$

$$\sigma_{AB} = \frac{\sigma_A + \sigma_B}{2} = \frac{3{,}823 + 3{,}711}{2} = 3{,}767 \overset{0}{A}$$

Cálculo da integral de colisão Ω_D

$$\Omega_D = \frac{A}{T^{*B}} + \frac{C}{\exp[D.T^*]} + \frac{E}{\exp[F.T^*]} + \frac{G}{\exp[H.T^*]}$$

$$\frac{\varepsilon_{AB}}{k}=\sqrt{\frac{\varepsilon_A}{k}.\frac{\varepsilon_B}{k}} \;,\; \frac{\varepsilon_i}{k}=1{,}15.T_b$$

$$\frac{\varepsilon_A}{k}=1{,}15.T_{b_A}=1{,}15(194{,}7K)=223{,}905\,K$$

$$\frac{\varepsilon_B}{k}=78{,}6\,K\;(\text{ literatura })$$

$$\frac{\varepsilon_{AB}}{k}=\sqrt{\frac{\varepsilon_A}{k}.\frac{\varepsilon_B}{k}}=\sqrt{(223{,}905)(78{,}6)}\;=132{,}661\,K$$

$$T^*=\frac{k.T}{\varepsilon_{AB}}=\frac{313{,}15\,K}{132{,}661\,K}=2{,}361$$

$$\Omega_D=\frac{1{,}06036}{(2{,}361)^{0{,}1561}}+\frac{0{,}193}{\exp[(0{,}47635)(2{,}361)]}+\frac{1{,}03587}{\exp[(1{,}52996)(2{,}361)]}+\frac{1{,}76474}{\exp[(3{,}89411)(2{,}361)]}$$

$$\Omega_D=0{,}927+0{,}063+0{,}028+1{,}794$$

$$\Omega_D=2{,}812$$

$$D_{AB}=1{,}858x10^{-3}\frac{T^{\frac{3}{2}}}{P\sigma_{AB}{}^2\Omega_D}\sqrt{\frac{1}{M_A}+\frac{1}{M_B}}$$

$$D_{AB}=1{,}858x10^{-3}\frac{(313{,}15K)^{\frac{3}{2}}}{(1atm)\left(3{,}767\overset{0}{A}\right)^2(2{,}812)}\sqrt{\frac{1}{44{,}01g/gmol}+\frac{1}{28{,}45g/gmol}}$$

$$D_{AB}=1{,}858x10^{-3}\frac{5541{,}516}{10{,}593}(0{,}186)$$

$$\boxed{D_{AB}=0{,}181\,cm^2/s}$$

$$\boxed{D_{AB_G}=1{,}81.10^{-5}\;m^2/s}$$

$$\overline{M}_G=y_{CO_2}M_{CO_2}+y_{AR}M_{AR}$$

$$\overline{M}_G=\left(7{,}5.10^{-3}\right)(44{,}01\,g/gmol)\;+\;\left(1-7{,}5.10^{-3}\right)(28{,}85\,g/gmol)$$

$$\overline{M}_G=28{,}96\,g/gmol$$

$$\rho_G = \frac{P.\overline{M}_G}{R.T} = \frac{(1\,atm)(28,96\,g/gmol)}{(82,05\,atm.cm^3/gmol.K)(313,15K)}$$

$$\rho_G = 1,13x10^{-3}\ g/cm^3 \ \ \text{ou}$$

$$\rho_G = 1,13\,Kg/m^3$$

$$G_G = G.\overline{M}_G = \left(0,3\,x10^3 gmol/h\right)\left(28,96g/gmol\right)$$

$$G_G = 8688\,g/h$$

$$Q = \frac{G_G}{\rho_G} = \frac{8688\,g/h}{1,13x10^{-3}g/cm^3} = 7.688.495,58\,cm^3/h$$

$$Q = 7,69\,m^3/h$$

$$u_G = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi D^2} = \frac{4\left(7,69\,m^3/h\right)}{\pi\left(0,5m\right)^2} = 39,16\,m/h$$

$$u_G = 0,0109\,m/s$$

$$\nu_G = \frac{\mu_G}{\rho_G}$$

$$\mu_{CO_2} = \nu_{CO_2}\rho_{CO_2} = \left(0,095.10^{-4}\,m^2/s\right)\left(1,63Kg/m^3\right)$$

$$\mu_{CO_2} = 0,1549\,Kg/m.s$$

$$\mu_{AR} = \nu_{AR}\rho_{AR} = \left(0,175m^2/s\right)\left(1,091Kg/m^3\right)$$

$$\mu_{AR} = 0,1909\,Kg/m.s$$

$$\mu_G = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i\mu_i\left(M_i\right)^{1/2}}{\sum_{i=1}^{n} y_i\left(M_i\right)^{1/2}} = \frac{y_{CO_2}\mu_{CO_2}\left(M_{CO_2}\right)^{1/2} + y_{AR}\mu_{AR}\left(M_{AR}\right)^{1/2}}{y_{CO_2}\left(M_{CO_2}\right)^{1/2} + y_{AR}\left(M_{AR}\right)^{1/2}} \quad \text{(Manual do Eng. Químico, Perry)}$$

$$\mu_G = \frac{\left(7,5.10^{-3}\right)\left(0,1549\,Kg/m.s\right)\left(44,01Kg/Kmol\right)^{1/2} + \left(0,9925\right)\left(0,1909\,Kg/m.s\right)\left(28,85Kg/Kmol\right)^{1/2}}{\left(7,5.10^{-3}\right)\left(44,01Kg/Kmol\right)^{1/2} + \left(0,9925\right)\left(28,85Kg/Kmol\right)^{1/2}}$$

$$\mu_G = 0,9537\,Kg/m.s$$

$$\nu_G = \frac{\mu_G}{\rho_G} = \frac{0,9537\,Kg/m.s}{1,13\,Kg/m^3}$$

$$\nu_G = 0,844\,m^2/s$$

$$Re_G = \frac{u_G}{a_s \nu_G} \quad \text{(Reynolds)} \; ; \; Sc_G = \frac{\nu_G}{D_{AB_G}} \quad \text{(Schmidt)}$$

$$Re_G = \frac{u_G}{a_s \nu_G} = \frac{0{,}0109\ \text{m/s}}{\left(328\ \text{m}^2/\text{m}^3\right)\left(0{,}844\ \text{m}^2/\text{s}\right)}$$

$$\boxed{Re = 3{,}9374.10^{-5}}$$

$$Sc_G = \frac{\nu_G}{D_{AB_G}} = \frac{0{,}844\ \text{m}^2/\text{s}}{1{,}81.10^{-5}\ \text{m}^2/\text{s}}$$

$$\boxed{Sc_G = 46629{,}83}$$

$$k_y = 5{,}23 a_s D_{AB_G} (d_s a_s)^{-2{,}0} \left(\frac{P}{RT}\right) Re_G^{0{,}7} Sc_G^{1/3} \quad \text{(fase gasosa)}$$

$$k_y = 5{,}23\left(328\text{m}^2/\text{m}^3\right)\left(1{,}81.10^{-5}\ \text{m}^2/\text{s}\right)\left(0{,}016\text{m}\text{x}328\text{m}^2/\text{m}^3\right)^{-2{,}0}\left(\frac{1\ \text{atm}}{82{,}05\text{x}10^{-6}\ \frac{\text{atm.m}^3}{\text{mol.K}}\ 313{,}15\text{K}}\right)\left(3{,}9374.10^{-5}\right)^{0{,}7}(46629{,}83)^{1/3}$$

$$k_y = 1{,}1274\text{x}10^{-3}\ \text{m/s}\left(38{,}9197\text{mol/m}^3\right)(0{,}02971)$$

$$\boxed{k_y = 1{,}3036\text{x}10^{-3}\ \text{mol/(m}^2\text{.s)}}$$

$$k_y a = \left(1{,}3036\text{x}10^{-3}\ \text{mol/(m}^2\text{.s)}\right)\left(197{,}456\text{m}^2/\text{m}^3\right)$$

$$\boxed{k_y a = 0{,}2574\ \text{mol/(m}^3\text{.s)}}$$

$$\boxed{k_x = 1{,}63\text{x}10^{-2}\ \text{mol/(m}^2\text{.s)}}$$

$$\frac{1}{K_y a} = \frac{1}{k_y a} + \frac{m}{k_x a} = \frac{1}{0{,}2574\ \text{mol/(m}^3\text{.s)}} + \frac{2{,}33\text{x}10^3}{3{,}2185\ \text{mol/(m}^3\text{.s)}}$$

$$\frac{1}{K_y a} = 727{,}8247$$

$$\boxed{K_y a = 1{,}374\text{x}10^{-3}\ \text{mol/(m}^3\text{.s}\Delta y_A)}$$

$$\boxed{K_y a = 4{,}9464\ \text{mol/(m}^3\text{.h}\Delta y_A)}$$

Cálculo da altura efetiva da coluna de recheio (Z)

G_S = 1,518 Kmol/s.m^2

K_ya = 4,9464 mol/(m^3.h.Δy_A)

$$AUT = \frac{G_s}{K_Y a} = \frac{1{,}518\ \text{Kgmol/(h.m}^2)}{4{,}9464\ \text{Kgmol/(m}^3.\text{h}.\Delta y_A)}$$

$$\boxed{AUT = 0{,}31\,\text{m}}$$

$$A = \frac{L_s}{mG_s} = \frac{4329{,}01\ \text{Kgmol/h.m}^2}{\left(2{,}33\text{x}10^3\right)\left(1{,}518\ \text{Kgmol/h.m}^2\right)}$$

$$A = 1{,}224$$

$$Y_{A_1} = 7{,}56\text{x}10^{-3}$$

$$Y_{A_2} = 7{,}56\text{x}10^{-4}$$

$$X_{A_2} = 2\text{x}10^{-7}$$

$$NUT = \frac{1}{(1-1/A)}\ell n\left[\frac{Y_{A_1} - mX_{A_2}}{Y_{A_2} - mX_{A_2}}(1-1/A) + 1/A\right]$$

$$NUT = \frac{1}{(1-1/1{,}224)}\ell n\left[\frac{7{,}56\text{x}10^{-3} - 2{,}33\text{x}10^3\left(2\text{x}10^{-7}\right)}{7{,}56\text{x}10^{-4} - 2{,}33\text{x}10^3\left(2\text{x}10^{-7}\right)}\left(1-1/2{,}33\text{x}10^3\right) + 1/2{,}33\text{x}10^3\right]$$

$$NUT = 5{,}4643\ell n\left[\frac{7{,}094\text{x}10^{-3}}{2{,}9\text{x}10^{-4}}(0{,}9996) + 4{,}292\text{x}10^{-4}\right]$$

$$NUT = 5{,}4643\ell n\left[24{,}4523 + 4{,}292\text{x}10^{-4}\right]$$

$$NUT = 5{,}4643\ell n[24{,}4566]$$

$$\boxed{NUT = 17{,}47}$$

$$z = (AUT)(NUT)$$

$$z = (0{,}31\text{m})(17{,}47)$$

$\boxed{z = 5{,}42\,\text{m}}$ (Livro = 2,4 m)

3- Uma corrente líquida com 1% em mols de soluto, o qual apresenta 0,4% em mols no equilíbrio, entra no topo de uma torre de 75 cm de diâmetro a uma taxa molar de 150 kgmols/h. Nesta seção a corrente gasosa entra a 2500 kgmols/h. Sabendo que a torre opera a temperatura e pressão constantes, os coeficientes volumétricos individuais de transferência de massa podem ser considerados constantes e iguais a 420 kgmol/(h.m^3.Δx_A) e 1400 kgmol/(h.m^3.Δy_A). De posse de tais informações, calcule a altura efetiva da torre se 60% do soluto é dessorvido e a reta de equilíbrio é expressa por $y_{Ai} = 1{,}1x_{Ai}$.

Informações do problema:

$x_{AL} = 0{,}01$

$x_A^* = 4x10^{-3}$ (equilíbrio)

$D_T = 75$ cm $= 0{,}75$ m

L = 150 kgmols/h

G = 2500 kgmols/h

$k_x a = 420$ kgmol/(h.m^3.Δx_A)

$k_y a = 1400$ kgmol/(h.m^3.Δy_A)

$y_{Ai} = 1{,}1x_{Ai}$

Solução:

Passo 1: Identificar o equilíbrio termodinâmico:

$y_{Ai} = 1{,}1x_{Ai} \Rightarrow m = 1{,}1$

Passo 2: Identificar a técnica de separação:

$L \rightarrow G$

Passo 3: Identificar o tipo de contato:

Paralelo (↓↑)

Passo 4: Identificar e determinar as variáveis (concentrações, frações, taxas e fluxos) conhecidas no topo e na base do equipamento:

Balanço material para a fase líquida: (base de cálculo: 1 h)

mols de líquido que entram = 150 kgmols

mols de A que entram: (0,01)(150) = 1,5 kgmols

mols de B que entram: (1 – 0,01)(150) = 148,5 kgmols

Quantidade de A no equilíbrio:

$$X_A^* = \frac{x_A^*}{1 - x_A^*} = \frac{4x10^{-3}}{1 - 4x10^{-3}}$$

$$X_A^* = 4{,}02x10^{-3}$$

$$X_A^* = \frac{\text{mols de A no equlíbrio}}{\text{mols de B}} \Rightarrow \text{mols de A no equlíbrio} = (X_A^*)(\text{mols de B})$$

$$\text{mols de A no equlíbrio} = (4{,}02\text{x}10^{-3})(148{,}5\ \text{Kgmols}) = 0{,}59697\ \text{Kgmols}$$

mols de A que fica na fase líquida: mols de A que entra – mols de A no equilíbrio = (1,5 – 0,59697) = 0,90303 kgmols

Fração molar absoluta de A no topo da torre (X_{A2}):

$$X_{A_2} = \frac{\text{mols de A}}{\text{mols de B}} = \frac{1{,}5}{148{,}5} = 0{,}0101$$

Fração molar absoluta de A na base da torre (X_{A1}):

mols de A dessorvidos: 0,6x0,90303 kgmols = 0,541818 kgmols

mols de A que saem: (entra) + (o que foi para outra fase) = 1,5 kgmols – 0,59697 – 0,541818 kgmols = 0,361212 kgmols

$$X_{A_1} = \frac{\text{mols de A}}{\text{mols de B}} = \frac{0{,}361212}{148{,}5} = 2{,}432\text{x}10^{-3}$$

Balanço material para a fase gasosa: (base de cálculo: 1 h)

mols de gases que entram = 2500 kgmols

mols de A que entram: 0 kgmols

mols de B que entram: 2500 kgmols

Fração molar absoluta de A na base da torre (Y_{A1}):

$$Y_{A_1} = \frac{\text{mols de A}}{\text{mols de B}} = 0$$

Fração molar absoluta de A no topo da torre (Y_{A2}):

mols de A que saem ou dessorvidos: (0,59697 + 0,541818) = 1,138788 kgmols

$$Y_{A_2} = \frac{\text{mols de A}}{\text{mols de B}} = \frac{1{,}138788}{2500} = 4{,}555\text{x}10^{-4}$$

Para operação contracorrente (+):

$$\frac{L_s}{G_s} = \frac{Y_{A_1} - Y_{A_2}}{X_{A_1} - X_{A_2}} = \frac{0 - 4{,}555\text{x}10^{-4}}{2{,}432\text{x}10^{-3} - 0{,}0101}$$

$$\frac{L_s}{G_s} = 0{,}0594$$

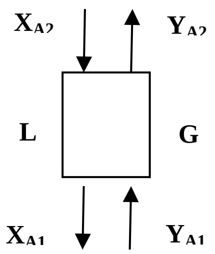
L = 150 Kgmols/h (soluto + inerte)

Taxa molar do inerte: $L^{'} = (1 - x_{A2})L = (1 - 0{,}01)(150 \text{ kgmols/h}) = 148{,}5$ kgmols/h

$L_S = L^{'}/A = 4L^{'}/\pi D^2 = (4x148{,}5\text{kgmol/h})/\pi(0{,}75\text{m})^2 = 336{,}14 \text{ kgmol/h.m}^2$

$G_S = G^{'}/A = 4G^{'}/\pi D^2 = (4x2500\text{kgmol/h})/\pi(0{,}75\text{m})^2 = 5658{,}84 \text{ kgmol/h.m}^2$

Passo 5: Construir o esquema do equipamento especificando as variáveis conhecidas no passo 4.



$X_{A1} = 2{,}432x10^{-3}$	$Y_{A1} = 0$
$X_{A2} = 0{,}0101$	$Y_{A2} = 4{,}555x10^{-4}$

Passo 6: Informação sobre transferência de massa.

m = 1,1

$k_xa = 420 \text{ kgmol/(h.m}^3.\Delta x_A)$

$k_ya = 1400 \text{ kgmol/(h.m}^3.\Delta y_A)$

$$\frac{1}{K_xa} = \frac{1}{mk_ya} + \frac{1}{k_xa}$$

$$\frac{1}{K_xa} = \frac{1}{(1{,}1)(1400)} + \frac{1}{420}$$

$$\frac{1}{K_xa} = 3{,}03x10^{-3}$$

$$K_xa = 330 \text{ kgmol/(h.m}^3.\Delta y_A)$$

Passo 7: Cálculo da altura efetiva da coluna.

$$AUT = \frac{L_s}{K_xa}$$

$$AUT = \frac{336{,}14 \text{ kgmol/h.m}^2}{330 \text{ kgmol/(h.m}^3.\Delta y_A)}$$

$$AUT = 1{,}02 \text{ m}$$

$$A = \frac{L_s}{mG_s} = \frac{0,0594}{1,1} = 0,054$$

$$NUT = \frac{1}{(1-A)} \ell n\left[\frac{X_{A_2} - Y_{A_1}/m}{X_{A_1} - Y_{A_1}/m}(1-A) + A\right]$$

$$NUT = \frac{1}{(1-0,054)} \ell n\left[\frac{0,0101-0}{2,432x10^{-3}-0}(1-0,054) + 0,054\right]$$

$$NUT = 1,0571 \ell n[(4,1530)(0,946) + 0,054]$$

$$NUT = 1,057 \ell n[3,9827]$$

$$NUT = 1,46$$

$$z = (AUT)(NUT)$$

$$z = (1,02m)(1,46)$$

$$z = 1,49\,m$$

Z = 1,6 ‘m (Livro)

4- Uma torre recheada de 15 cm de diâmetro que opera a 35°C e 1tam é destinada para remover etanol de uma corrente contendo CO_2. Essa corrente alimenta a base da coluna a 43 m^3/h com 1,5 % (fração molar) de etanol. Desejando-se recuperar 99% deste etanol, utilizou-se água pura, injetada no topo da torre a 43 kg/h. Nas condições operacionais de temperatura e de pressão, conhece-se o coeficiente volumétrico global de transferência de massa que é 270 kgmol/(h.m^3.Δy_A), assim como a relação de equilíbrio para o etanol distribuído nas fases leve e pesada: $y_{Ai} = 0,6667x_{Ai}$, calcule a altura efetiva da torre.

Informações do problema:

D_T = 15 cm = 0,15 m

T = 35°C e P = 1tam

G = 43 m^3/h (etanol + CO_2)

L = 43 kg/h (água pura)

$x_{A2} = 0$

y_{A1} = 1,5% (y_{A1} = 0,015)

$K_y.a$ = 270 kgmol/(h.m^3.Δy_A)

$y_{Ai} = 0,6667x_{Ai}$

Solução:

Passo 1: Identificar o equilíbrio termodinâmico:

$y_{Ai} = 0,6667x_{Ai}$; m = 0,6667

Passo 2: Identificar a técnica de separação:

$G \rightarrow L$

Passo 3: Identificar o tipo de contato:
Paralelo (↓↑)

Passo 4: Identificar e determinar as variáveis (concentrações, frações, taxas e fluxos) conhecidas no topo e na base do equipamento:

Balanço material para a fase gasosa:

Vazão de CO_2(inerte): $G' = (1 - y_{A1})G = (1 - 0{,}015)43m^3/h = 42{,}355\ m^3/h$

$$\rho_{CO_2} = \frac{P.M_{CO_2}}{R.T} = \frac{(1\,\text{atm})(44{,}01\ \text{g/gmol})}{(82{,}05\ \text{atm.cm}^3/\text{gmol.K})(308{,}15\text{K})}$$

$$\rho_{CO_2} = 1{,}74\text{x}10^{-3}\ \text{g/cm}^3 \quad \text{ou}$$

$$\rho_{CO_2} = 1{,}74\ \text{Kg/m}^3$$

$G' = (42{,}355\ m^3/h)(1{,}74\ Kg/m^3) = 73{,}6977\ Kg/h$
$G' = (73{,}6977\ Kg/h)/(44{,}01\ Kg/Kgmol) = 1{,}675\ Kgmol/h$
$G_s = G'/A = 4x\ G'/\pi D^2 = (4x1{,}675\ Kgmol/h)/\ \pi(0{,}15m)^2 = 94{,}786\ Kgmol/m^2.h$

Vazão de água(inerte): $L' = (43\ Kg/m^3)/18\ Kg/Kgmol = 2{,}389\ Kgmol/m^3$

Fração molar absoluta de A na base da torre (Y_{A1}):

$$Y_{A_1} = \frac{y_{A_1}}{1 - y_{A_1}} = \frac{0{,}015}{1 - 0{,}015} = 0{,}01523$$

Fração molar absoluta de A no topo da torre (Y_{A2}):

$$\text{Recuperação} = \left(\frac{Y_{A_1} - Y_{A_2}}{Y_{A_1}}\right)100\%$$

$$99\ \% = \left(\frac{0{,}01523 - Y_{A_2}}{0{,}01523}\right)100\%$$

$$Y_{A_2} = 1{,}523\text{x}10^{-4}$$

Balanço material para a fase líquida:

Vazão de água(inerte): $L' = (43\ Kg/m^3)/18\ Kg/Kgmol = 2{,}389\ Kgmol/m^3$

Fração molar absoluta de A no topo da torre (X_{A2}):

$$X_{A_2} = 0$$

Fração molar absoluta de A na base da torre (X_{A1}):

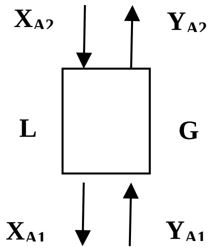
Para operação contracorrente (+):

$$\frac{L_s}{G_s} = \frac{Y_{A_1} - Y_{A_2}}{X_{A_1} - X_{A_2}}$$

$$\frac{2{,}389 \text{ Kgmol/h}}{1{,}675 \text{ Kgmol/h}} = \frac{0{,}01523 - 1{,}523\text{x}10^{-4}}{X_{A_1} - 0}$$

$$X_{A_1} = 0{,}01057$$

Passo 5: Construir o esquema do equipamento especificando as variáveis conhecidas no passo 4.



$X_{A1} = 0{,}01057$	$Y_{A1} = 0{,}01523$
$X_{A2} = 0$	$Y_{A2} = 1{,}523\text{x}10^{-4}$

Passo 6: Informação sobre transferência de massa.

$K_y.a = 270 \text{ kgmol/(h.m}^3.\Delta y_A)$

Passo 7: Cálculo da altura efetiva da coluna.

$$A = \frac{L_s}{mG_s} = \frac{2{,}389 \text{ Kgmol/h}}{0{,}6667\,(1{,}675 \text{ Kgmol/h})} = 2{,}1393$$

$$AUT = \frac{G_s}{K_Y a} = \frac{94{,}786 \text{ Kgmol/(h.m}^2)}{270 \text{ Kgmol/(m}^3.\text{h}.\Delta y_A)}$$

$$AUT = 0{,}351 \text{ m}$$

$$NUT = \frac{1}{(1-1/A)}\ell n\left[\frac{Y_{A_1}-mX_{A_2}}{Y_{A_2}-mX_{A_2}}(1-1/A) + 1/A\right]$$

$$NUT = \frac{1}{(1-1/2{,}1393)}\ell n\left[\frac{0{,}01523}{1{,}523x10^{-4}}(1-1/2{,}1393) + 1/2{,}1393\right]$$

$$NUT = 1{,}878\ell n[(100)(0{,}533) + 0{,}467]$$

$$NUT = 1{,}878\ell n[53{,}767]$$

$$NUT = 7{,}48$$

$$z = (AUT)(NUT)$$

$$z = (0{,}351m)(7{,}48)$$

$$z = 2{,}6\,m$$

Z = 3,5 m (Livro)