

Fenômenos de Transporte III

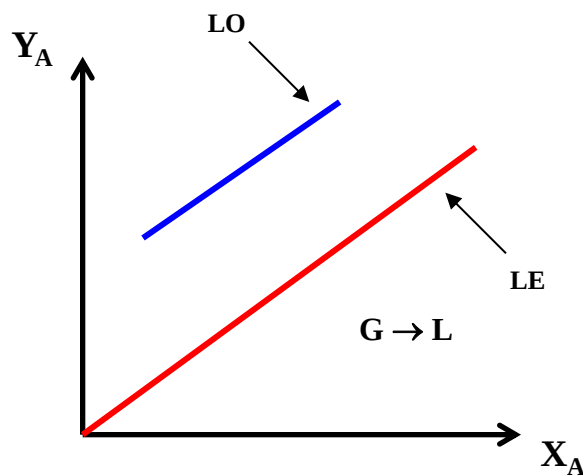
Aula 11

Prof. Gerônimo

Exemplo 04: Uma torre de 2 m de diâmetro é utilizada para a absorção de um certo contaminante A. 1000 kmol/h de gás, contendo 0,9% em mols do soluto, alimentam a base da coluna onde 80% de A é absorvido pela corrente líquida, que é isenta de soluto no topo da torre. Verificou-se que a relação entre as vazões líquida e gasosa de inertes é igual a 1,4 vezes a relação mínima entre tais correntes. Visto que a torre opera a temperatura e pressão constante, o coeficiente volumétrico individual da fase gasosa é igual a $400 \text{ kmol/hm}^3 \Delta y_A$ e a resistência nessa fase é igual a 60% da global. Considerando a igualdade entre as frações de equilíbrio de A distribuídas na fases G e L, determine a altura efetiva da coluna.

Solução: Acompanhando os passos sugeridos na programação de testes:

1. $m = 1$
2. $G \rightarrow L$
3. $\uparrow \downarrow$



1. Determinação das frações molares absolutas do soluto A:

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

mols de gás que entra na base da coluna = 1000 kmols

mols de A que entram: $(0,009)(1000) = 9$ kmols

mols de B que entram: $(1 - 0,009)(1000) = 991$ kmols

Fração molar absoluta de A na base da torre:

$$\boxed{Y_A = \frac{y_A}{1 - y_A}} \quad Y_{A_1} = \frac{\text{mols de A em G}}{\text{mols de B em G}} = \frac{\text{mols de A}}{\text{mols de B}} = \frac{9}{991} = 9,1 \times 10^{-3}$$

mols de A absorvidos: $(0,8)(9) = 7,2$ kmols

mols de A na saída: (entra) – (o que foi para a outra fase) = $(9,0 - 7,2) = 1,8$ kmols

Fração molar absoluta de A no topo da torre:

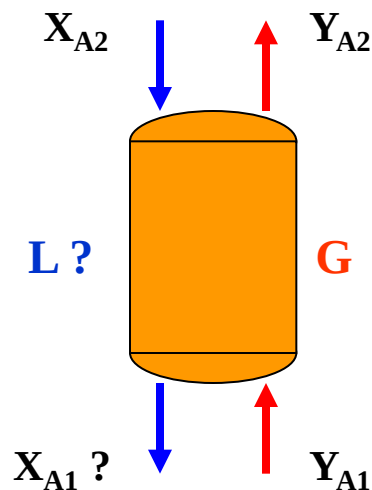
$$Y_{A_2} = \frac{\text{mols de A em G}}{\text{mols de B em G}} = \frac{\text{mols de A}}{\text{mols de B}} = \frac{1,8}{991} = 1,816 \times 10^{-3}$$

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

mols de A que entra no topo da coluna = 0 $\therefore X_{A2} = 0$

mols de A que saem = (entra) + (absorvido) = 0,0 + 7,2 = 7,2 kmols

2. Observe no diagrama ao lado que desconhecemos a vazão (ou taxa) da corrente líquida, bem como a composição do contaminante nesta fase na base da torre.



3. Informação sobre transferência de massa.

3.1. (resistência individual da fase G) = 0,6(resistência global referenciada à fase G)

Como se trata de soluções diluídas, tem-se: $k_y a \cong K_y a$. Dessa forma:

$$\frac{1}{k_y a} = 0,6 \frac{1}{K_y a}$$

$$K_y a = 0,6 k_y a = (0,6)(400) = 240 \text{ kmols/h.m}^3 \cdot \Delta Y_A$$

4. Informações mecânicas e fluidodinâmicas.

4.1. Diâmetro da coluna: $D = 2 \text{ m}$

4.2. Fluxos: $(L_s/G_s)_{op} = 1,4(L_s/G_s)_{min}$

Cálculo do G_s : $G_s' = (1 - y_A)G_1$, sendo G_1 a taxa molar da corrente leve na entrada da coluna (mols/tempo).

Realizando o cálculo referenciado na base da coluna:

$$G_s' = (1 - 0,009)G_1 = (1 - 0,009)1000 = 991 \text{ kmols/h}$$

O fluxo molar do inerte na corrente gasosa é dado por:

$G_s = G_s'/A$, onde A é a área da seção transversal da coluna; $A = \pi(2)^2/4 = \pi \text{ m}^2$

$$G_s = 991 / \pi = 315,445 \text{ kmols/h.m}^2$$

5. Identificar a incógnita do problema: $z = ?$ (altura efetiva da coluna)

6. Identificar a *pseudo-incógnita* do problema.

$X_{A2} = 0$; mas $X_{A1} = ??$ Note que esta fração molar é a *pseudo-incógnita* do problema.

7. Relações fundamentais:

7.1. Linhas de operação: (+) $\rightarrow$ contracorrente:

$$\frac{L_s}{G_s} = \pm \frac{Y_{A1} - Y_{A2}}{X_{A1} - X_{A2}} \quad \longrightarrow \quad \frac{L_s}{G_s} = \frac{(9,1 - 1,816)10^{-3}}{X_{A1} - 0} = \frac{7,284 \times 10^{-3}}{X_{A1}}$$

7.2. Cálculo da altura efetiva: $G \rightarrow L$

Método Gráfico

$$z = \frac{G_s}{K_Y a} \int_{Y_{A2}}^{Y_{A1}} \frac{dY_A}{(Y_A - Y_A^*)}$$

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

Determinação do AUT:
$$AUT = \frac{G_s}{K_Y a} = \frac{315,445 \text{ kmols/h.m}^2}{240 \text{ kmols/h.m}^3 \cdot \Delta Y_A} = 1,314 \text{ m}$$

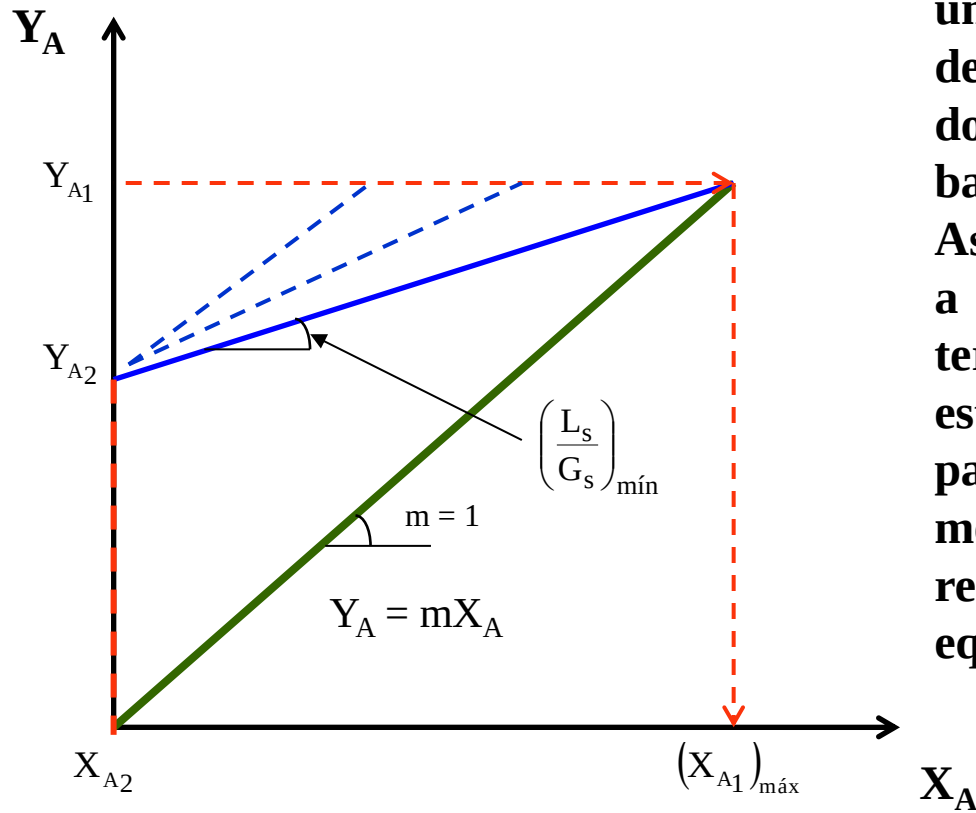
Determinação do NUT:

Determinação da *pseudo-incógnita* X_{A1}

$$\left(\frac{L_s}{G_s} \right)_{\min} = \frac{Y_{A1} - Y_{A2}}{X_{A1} - X_{A2}} = \frac{\Delta Y_A}{(\Delta X_A)_{\max}}$$

$$\left(\frac{L_s}{G_s} \right)_{\min} = \frac{(9,1 - 1,816) \times 10^{-3}}{(X_{A1} - 0)} = \frac{7,284 \times 10^{-3}}{(X_{A1})_{\max}}$$

Podemos construir o gráfico a seguir:



Observe no gráfico, que, para obter uma relação mínima entre os fluxos de inertes das fase G e L, a fração do contaminante na corrente L e na base da coluna deve ser máxima. Assim, traça-se a linha de operação a partir da coordenada (X_{A2}, Y_{A2}) , terminando em Y_{A1} . Após estabelecermos várias inclinações para (L_s/G_s) , verificamos que a menor inclinação é aquela em que a reta de operação toca a de equilíbrio.

$$(X_{A1})_{máx} = 9,1 \times 10^{-3}$$

ou

$$Y_{A1} = mX_{A1}^*$$

(diluição extrema)

Portanto:
$$\left(\frac{L_s}{G_s}\right)_{\min} = \frac{7,284 \times 10^{-3}}{9,1 \times 10^{-3}} = 0,8$$

Desse modo, temos:
$$\left(\frac{L_s}{G_s}\right)_{\text{op}} = 1,4 \left(\frac{L_s}{G_s}\right)_{\min} = (1,4)(0,8) = 1,12$$

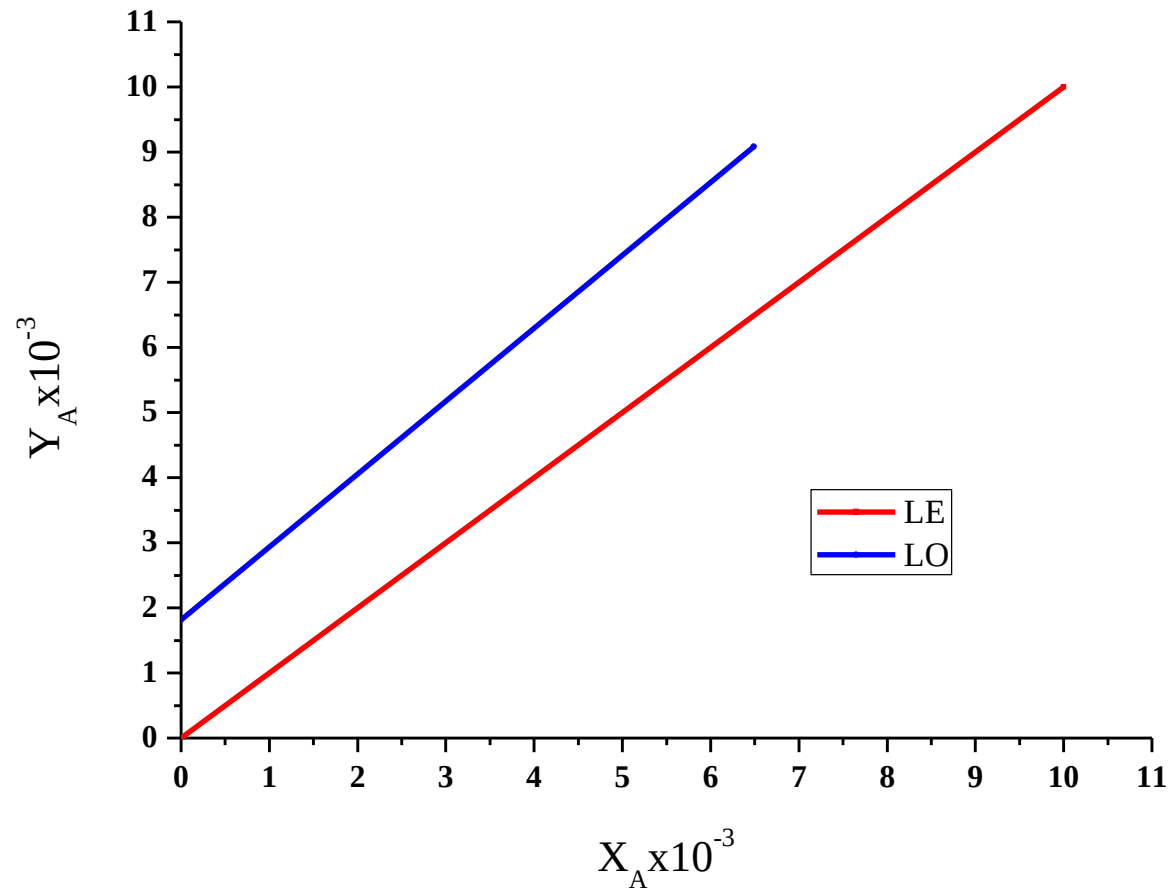
O valor de X_{A1} real é determinado após substituir o valor de L_s/G_s na equação seguinte:

$$\frac{L_s}{G_s} = \frac{7,284 \times 10^{-3}}{X_{A1}} \quad \longrightarrow \quad 1,12 = \frac{7,284 \times 10^{-3}}{X_{A1}} \rightarrow X_{A1} = 6,504 \times 10^{-3}$$

Resumindo:

$X_{A1} = 6,504 \times 10^{-3}$	$Y_{A1} = 9,1 \times 10^{-3}$
$X_{A2} = 0$	$Y_{A2} = 1,816 \times 10^{-3}$

Gráfico representando a LE e LO



Método de Simpson

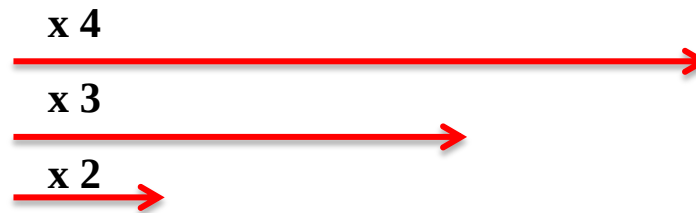
$$NUT = \int_{Y_{A2}}^{Y_{A1}} \frac{dY_A}{(Y_A - Y_A^*)}$$

$$NUT = \frac{h}{3} [f_0 + 4f_{(2j+1)} + 2f_{(2j)} + f_n]$$

sendo: $h = \frac{Y_{A1} - Y_{A2}}{n}$; $f = \frac{1}{Y_A - Y_A^*}$

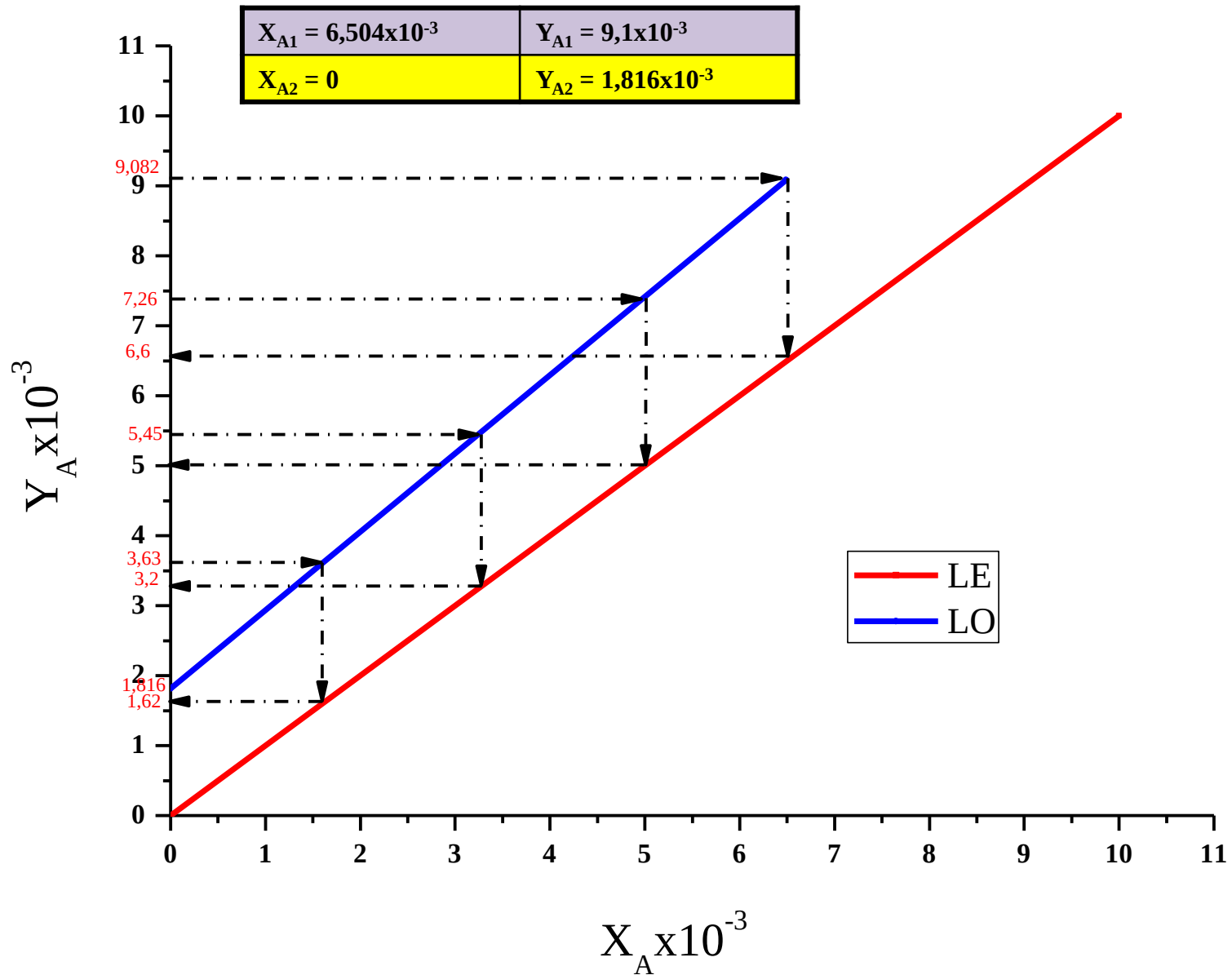
O passo de integração é obtido assumindo $n = 4$ (número par) e calculando o valor de h .

$$h = \frac{Y_{A1} - Y_{A2}}{n} = \frac{(9,1 - 1,816) \times 10^{-3}}{4} = 1,821 \times 10^{-3}$$



$Y_A \times 10^{-3}$	1,821	3,642	5,463	7,284	9,1
$Y_A^* \times 10^{-3}$	0	1,62	3,2	5,0	6,6
$f(x)$	550,66	492,6	444,4	440,5	387,3
	f_0	f_1	f_2	f_3	f_4

Determina-se Y_A^* a partir da Figura esboçada a seguir:



$$f = \frac{1}{Y_A - Y_A^*}$$

$$f_o = \frac{1}{1,816 \times 10^{-3} - 0} = 550,66$$

$$f_1 = \frac{1}{(3,63 - 1,62) \times 10^{-3}} = 492,6$$

$$f_2 = \frac{1}{(5,45 - 3,20) \times 10^{-3}} = 444,4$$

$$f_3 = \frac{1}{(7,27 - 5,0) \times 10^{-3}} = 440,5$$

$$f_4 = \frac{1}{(9,082 - 6,6) \times 10^{-3}} = 387,3$$

$$NUT = \frac{1,821 \times 10^{-3}}{3} \left[\underbrace{550,66}_{f_o} + 4 \left(\underbrace{492,6}_{f_1} + \underbrace{440,5}_{f_3} \right) + 2 \left(\underbrace{444,4}_{f_2} \right) + \underbrace{387,3}_{f_4} \right]$$

$$NUT = 3,37$$

Cálculo da altura efetiva da coluna:

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

$$z = (1,314)(3,37) = 4,43 \text{ m}$$

Exemplo 05: Refaça o exemplo 4 pelo *método analítico*.

Solução: A diferença entre o método analítico e o gráfico, para soluções diluídas, consiste na determinação do NUT. Do exemplo anterior obtivemos:

$$z = (\text{AUT})(\text{NUT})$$

$$\text{AUT} = 1,314 \text{ m}$$

Visto que $m = 1$ e $L_s/G_s = 1,12$, temos condições de calcular o *fator de absorção* por intermédio da equação (60):

$$A = \frac{L_s}{mG_s} = \frac{1,12}{1} = 1,12$$

Além das frações molares absolutas oriundas do exemplo anterior:

Base →	$X_{A1} = 6,504 \times 10^{-3}$	$Y_{A1} = 9,1 \times 10^{-3}$
Topo →	$X_{A2} = 0$	$Y_{A2} = 1,816 \times 10^{-3}$

Como trata-se de $G \rightarrow L$ e $\downarrow\uparrow$, o NUT é obtido analiticamente pela equação (62).

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

$$\text{NUT} = \frac{1}{(1-1/1,12)} \ln \left[\frac{9,1 \times 10^{-3} - 0}{1,816 \times 10^{-3} - 0} (1-1/1,12) + 1/1,12 \right]$$

$$\text{NUT} = 3,33$$

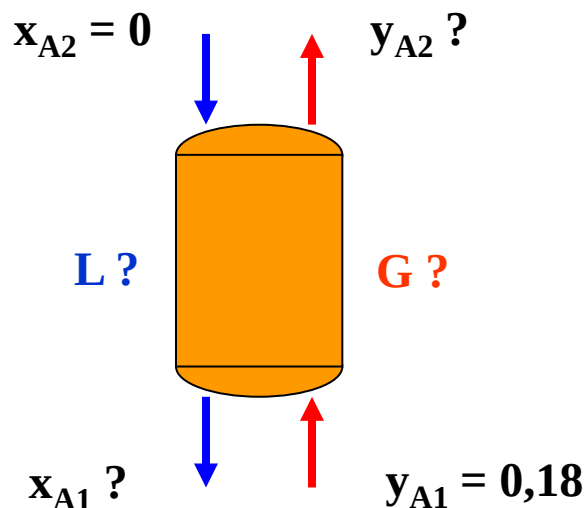
$$z = (\text{AUT})(\text{NUT})$$

$$z = (1,314\text{m})(3,33) = 4,38\text{ m}$$

Que é bem próximo ao resultado obtido no exemplo anterior!!

Exemplo 05: Uma mistura de ar e amônia é lavada em contracorrente com água a 25°C numa torre de enchimento de anéis Raschig de cerâmica de 1 in. A torre funciona à pressão ambiente local (700mmHg), sendo o gás alimentado com 18 mol % de NH_3 , empregando-se 50% de água a mais do que a quantidade mínima necessária para obter 95% de recuperação da amônia alimentada. Faça uma estimativa da altura da torre sabendo que:

- a) a relação de equilíbrio é $y = 1,154x$
- b) a altura de uma unidade de transferência, para força propulsora global em unidade de fração molar no gás é 68cm.



Informações do problema:

$$L_{op} = 1,5(L_s)_{min}$$

$$y = 1,154x$$

$$R = 95\%$$

$$AUT = 68\text{cm}$$

$$Y_{A_1} = \frac{y_{A_1}}{1 - y_{A_1}} = \frac{0,18}{1 - 0,18}$$

$$Y_{A_1} = 0,21951$$

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

$$95\% = \left(\frac{0,21951 - Y_{A_2}}{0,21951} \right) 100\%$$

$$Y_{A_2} = 0,01098$$

$$y_{A_1} = m(x_{A_1})_{\text{máx}}$$

$$y_{A_1} = 1,154(x_{A_1})_{\text{máx}}$$

$$\frac{Y_{A_1}}{1 + Y_{A_1}} = 1,154 \left(\frac{X_{A_1}}{1 + X_{A_1}} \right)_{\text{máx}}$$

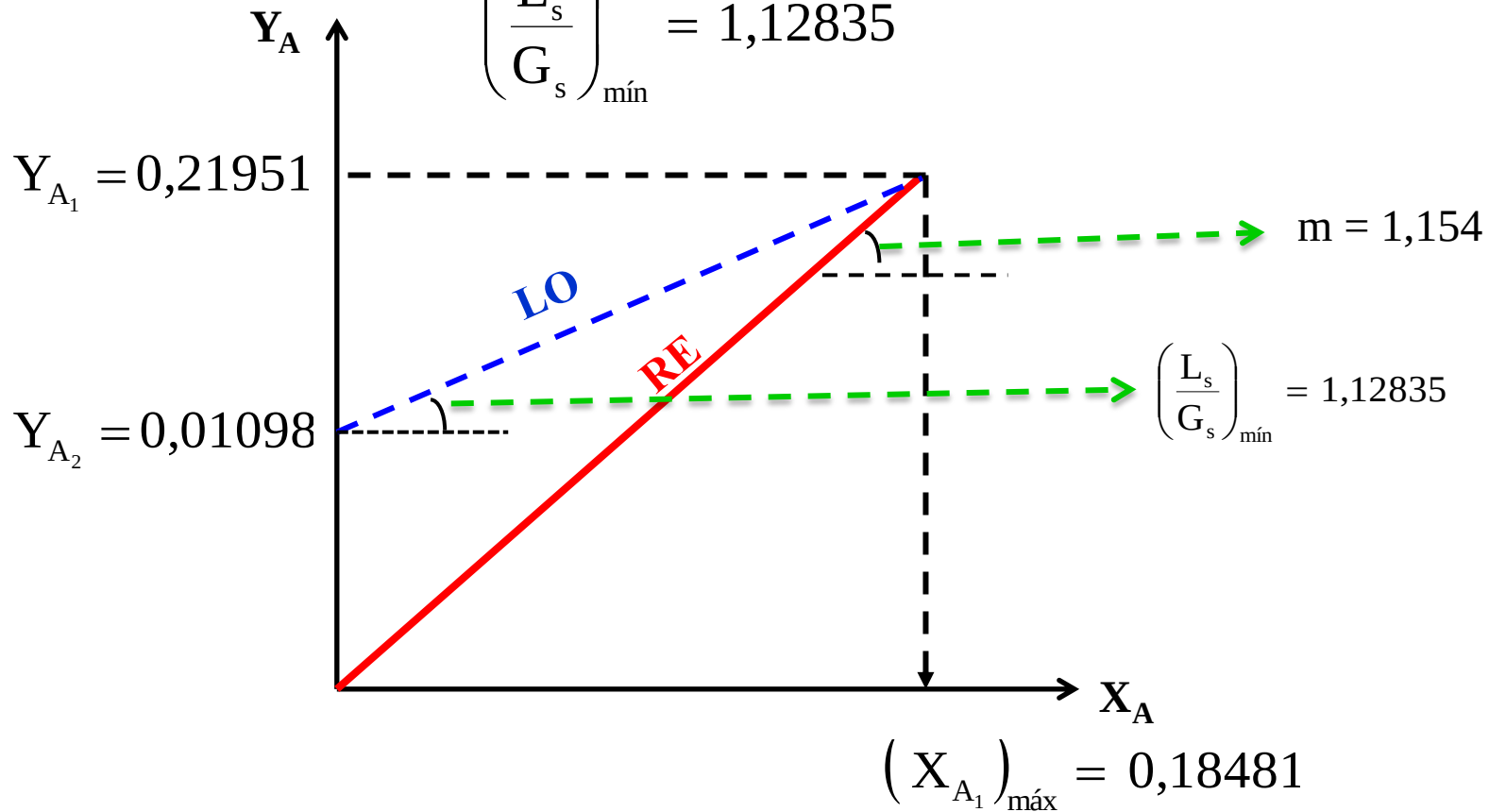
$$\frac{0,21951}{1 + 0,21951} = 1,154 \left(\frac{X_{A_1}}{1 + X_{A_1}} \right)_{\text{máx}}$$

$$(X_{A_1})_{\text{máx}} = 0,18481$$

$$\left(\frac{L_s}{G_s}\right)_{\min} = \frac{Y_{A_1} - Y_{A_2}}{(X_{A_1})_{\max} - X_{A_2}}$$

$$\left(\frac{L_s}{G_s}\right)_{\min} = \frac{0,21951 - 0,01098}{0,18481 - 0}$$

$$\left(\frac{L_s}{G_s}\right)_{\min} = 1,12835$$



$$\left(\frac{L_s}{G_s}\right)_{\text{real}} = 1,5 \left(\frac{L_s}{G_s}\right)_{\text{min}}$$

$$\left(\frac{L_s}{G_s}\right)_{\text{real}} = 1,5(1,12835) = 1,69253 \text{ kmol de água / kmol de ar}$$

$$\left(\frac{L_s}{G_s}\right)_{\text{real}} = \frac{Y_{A_1} - Y_{A_2}}{X_{A_1} - X_{A_2}}$$

$$1,69253 = \frac{0,21951 - 0,01098}{X_{A_1} - 0}$$

$$X_{A_1} = \frac{0,21951 - 0,01098}{1,69253}$$

$$X_{A_1} = 0,12321$$

$$A = \frac{L_s}{mG_s} = \frac{1,69253}{1,154} = 1,4667$$

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

$$NUT = \frac{1}{(1-1/1,4667)} \ln \left[\frac{0,21951-0}{0,01098-0} (1-1/1,4667) + 1/1,4667 \right]$$

$$NUT = 3,1427 \ln [(19,9992)(0,3182) + 0,6818]$$

$$NUT = 3,1427 \ln [7,0455]$$

$$NUT = 6,12$$

$$AUT = 68\text{cm}$$

$$z = (AUT)(NUT) = (68\text{cm})(6,12)$$

$$z = 417\text{cm} = 4,17\text{m}$$

Exemplo 06: A trietanolamina em solução aquosa é um solvente utilizado comercialmente para a absorção do sulfeto de hidrogênio carregado por diversos gases industriais. A lei de Henry é válida para estes sistemas até concentrações de H_2S no solvente da ordem de 3 mol%. A 27°C a relação de equilíbrio é:

$$Y = 2X$$

Y = mol de H_2S por mol de gás inerte

X = mol de H_2S por mol de solvente

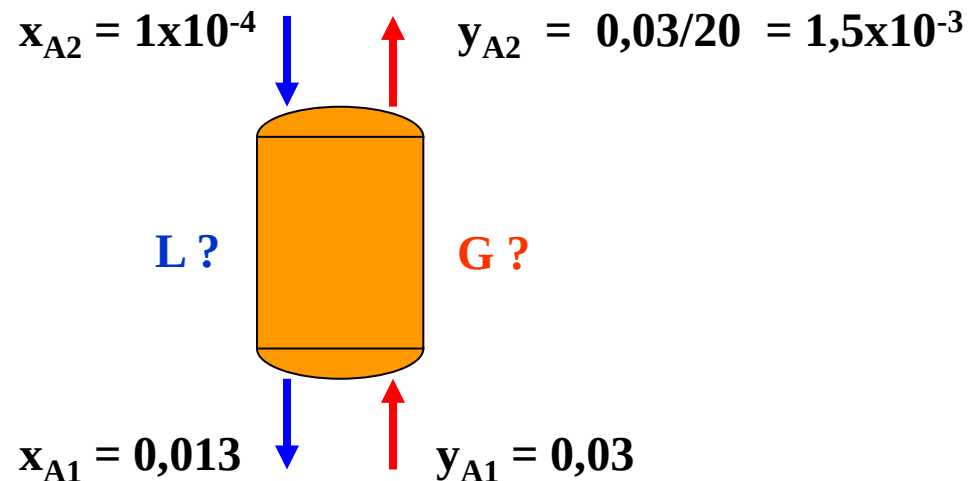
A pressão de vapor do solvente é desprezível à temperatura mencionada. Numa dada unidade o gás proveniente de uma coluna de destilação de petróleo encerra 0,03 mol de H_2S por mol de hidrocarboneto. Deseja-se reduzir esta concentração a 1/20 do valor inicial por lavagem com uma solução aquosa de trietanolamina numa torre de absorção operando isotermicamente a 27°C e pressão essencialmente atmosférica. Esta operação é controlada pela fase gasosa. O solvente é alimentado pelo topo com 0,0001 mol de H_2S por mol de solvente e sai pela base com 0,013 mol de H_2S . Sabendo que a vazão de hidrocarboneto é 49 kmol por hora, por metro quadrado de seção transversal da torre e que o coeficiente de transferência de massa em base volumétrica é $K_Y a = 126 \text{ kmol/h.m}^3$ de enchimento. ΔY unitário, calcule a altura que deverá ter o absorvedor.

Informações do problema:

$$Y = 2X; m = 2$$

$$G_s = 49 \text{ kmol/m}^2\cdot\text{h} \quad (\text{hidrocarboneto} = \text{inerte})$$

$$K_{Ya} = 126 \text{ kmol/m}^3\cdot\text{h}\cdot\Delta Y$$



Composições molares

Base →	$x_{A1} = 0,013$	$y_{A1} = 0,03$
Topo →	$x_{A2} = 0,0001$	$y_{A2} = 0,0015$

$$Y = \frac{y}{1-y}$$

$$X = \frac{x}{1-x}$$

$$X_{A_1} = 0,01317$$

$$Y_{A_1} = 0,03093$$

$$X_{A_2} = 0,0001$$

$$Y_{A_2} = 1,5023 \times 10^{-3}$$

$$\left(\frac{L_s}{G_s} \right) = \frac{Y_{A_1} - Y_{A_2}}{X_{A_1} - X_{A_2}} = \frac{\Delta Y_A}{\Delta X_A} \text{ (diluída)}$$

$$\left(\frac{L_s}{G_s} \right) = \frac{0,03093 - 0,0015023}{0,01317 - 0,0001}$$

$$\left(\frac{L_s}{G_s} \right) = 2,2515$$

$$A_{UT} = \frac{G_s}{K_{Ya}} = \frac{49 \text{ kmol/h.m}^2}{126 \text{ kmol/m}^3 \cdot \text{h} \cdot \Delta Y} \quad A = \frac{L_s}{mG_s} = \frac{2,2515}{2} = 1,1258$$

$$A_{UT} = 0,389 \text{ m}$$

$$N_{UT} = \frac{1}{(1-1/A)} \ln \left[\frac{Y_{A_1} - mX_{A_2}}{Y_{A_2} - mX_{A_2}} (1-1/A) + 1/A \right]$$

$$N_{UT} = \frac{1}{(1-1/1,1258)} \ln \left[\frac{0,03093 - 2 \times 0,0001}{0,0015023 - 2 \times 0,0001} (1-1/1,1258) + 1/1,1258 \right]$$

$$N_{UT} = 8,949 \ln[(23,5967)(0,1147) + 0,8883]$$

$$N_{UT} = 8,949 \ln[3,5948]$$

$$N_{UT} = 11,45$$

$$z = (A_{UT})(N_{UT}) = (0,389\text{m})(11,45) \quad \longrightarrow \quad \boxed{z = 4,45 \text{ m}}$$

Exemplo 07: Uma torre recheada com anéis Raschig de cerâmica de 1 in deve ser projetada para absorver SO_2 do ar, usando água pura como solvente a 20°C e 1 atm. O gás de entrada possui 20% mols de SO_2 e o de saída 2% mols de SO_2 . As vazões de inerte gasoso e líquido são respectivamente, $6,53 \times 10^{-4}$ kmol de ar/s e $4,2 \times 10^{-2}$ kmol de água/s. A área transversal da torre é de $0,0929 \text{ m}^2$. Calcule a altura efetiva da torre.

Dados:

$$k_y a = 0,0594 \cdot G'^{0,7} \cdot L'^{0,25}$$

$$k_x a = 0,152 L'^{0,82}$$

$$[k_y a] = [k_x a] = \text{kmol/m}^3 \cdot \text{s} \cdot \text{fração}$$

$$[L'] = [G'] = \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

Peso de SO_2 em 100 partes ponderais de H_2O	Pressão parcial de SO_2 em mmHg a 20°C
10	698
7,5	517
5,0	336
2,5	161
1,5	92
1,0	59
0,7	39
0,5	26
0,3	14,1
0,2	8,5
0,15	5,8
0,10	3,2
0,05	1,2
0,02	0,5

Informações do problema:

Anéis Raschig de cerâmica de 1 in

$P = 1 \text{ atm}$, $T = 20^\circ\text{C}$

$y_{A1} = 0,2$ (20% mols)

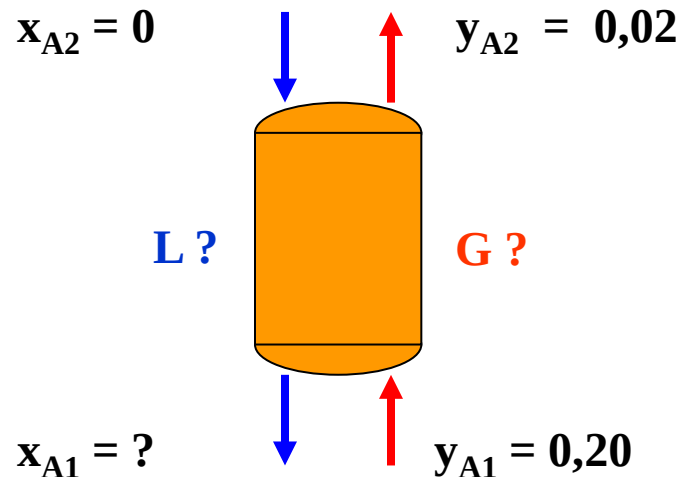
$y_{A2} = 0,02$ (2% mols)

$x_{A2} = 0$

$L_s = 4,2 \times 10^{-2} \text{ kmol de água/s}$

$G_s = 6,53 \times 10^{-4} \text{ kmol de ar/s}$

$A_T = 0,0929 \text{ m}^2$



Para o primeiro valor da tabela, temos:

$$X_A = \frac{\frac{10 \text{ g SO}_2}{64 \text{ g/gmol}}}{\frac{100 \text{ g de H}_2\text{O}}{18 \text{ g/gmol}}} = 0,028125 \text{ gmol SO}_2/\text{gmol H}_2\text{O}$$

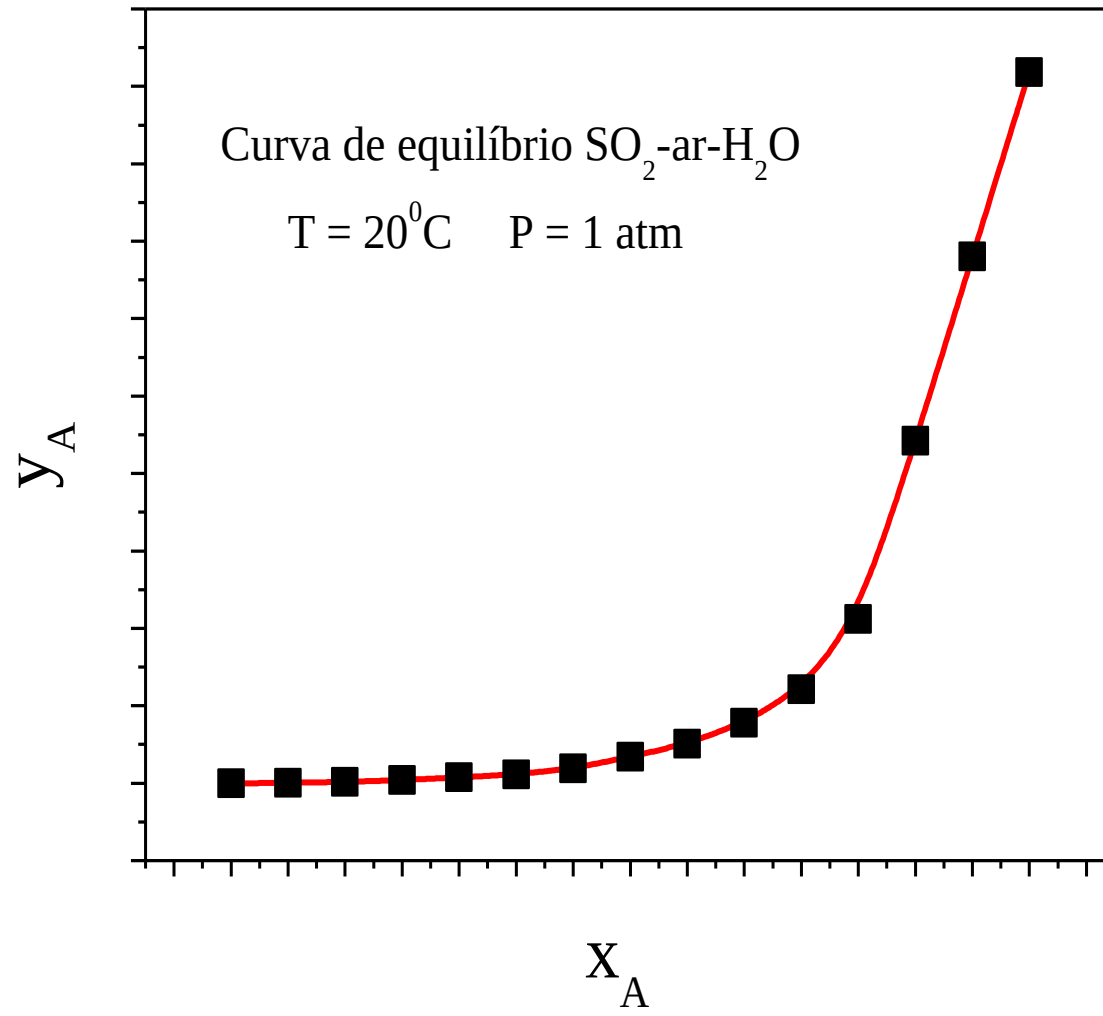
$$Y_A = \frac{y_A}{1 - y_A} = \frac{p_A/P}{1 - p_A/P} = \frac{p_A}{P - p_A} = \frac{698}{760 - 698}$$

$$Y_A = 11,258 \frac{\text{mol de A}}{\text{mol de B}}$$

$$x_A = \frac{X_A}{1 + X_A} = \frac{0,028125}{1 + 0,028125} = 0,0274$$

$$y_A = \frac{Y_A}{1 + Y_A} = \frac{11,258}{1 + 11,258} = 0,918$$

Peso de SO₂ em 100 partes ponderais de H₂O	Pressão parcial de SO₂ em mmHg a 20°C e 1 atm	X_A	x_A	y_A	Y_A
10	698	0,028125	0,0274	0,918	11,258
7,5	517	0,021094	0,0210	0,681	2,13
5,0	336	0,014063	0,0139	0,441	0,79
2,5	161	7,0313x10 ⁻³	6,98x10 ⁻³	0,231	0,30
1,5	92	4,2188x10 ⁻³	4,2x10 ⁻³	0,123	0,14
1,0	59	2,8125x10 ⁻³	2,79x10 ⁻³	0,077	0,084
0,7	39	1,9688x10 ⁻³	1,97x10 ⁻³	0,051	0,054
0,5	26	1,4063x10 ⁻³	1,40x10 ⁻³	0,034	0,035
0,3	14,1	8,4375x10 ⁻⁴	8,43x10 ⁻⁴	0,020	0,02
0,2	8,5	5,625x10 ⁻⁴	5,62x10 ⁻⁴	0,011	0,011
0,15	5,8	4,2188x10 ⁻⁴	4,22x10 ⁻⁴	7,63x10 ⁻³	7,69x10 ⁻³
0,10	3,2	2,8125x10 ⁻⁴	2,81x10 ⁻⁴	4,21x10 ⁻³	4,23x10 ⁻³
0,05	1,2	1,4063x10 ⁻⁴	1,40x10 ⁻⁴	1,58x10 ⁻³	1,58x10 ⁻³
0,02	0,5	5,625x10 ⁻⁵	5,62x10 ⁻⁵	6,58x10 ⁻⁴	6,58x10 ⁻⁴
0	0	0	0	0	0



Determinação da reta de operação (RO):

$$Y_{A_1} = \frac{y_{A_1}}{1 - y_{A_1}} = \frac{0,2}{1 - 0,2}$$

$$Y_{A_1} = 0,25$$

$$Y_{A_2} = \frac{y_{A_2}}{1 - y_{A_2}} = \frac{0,02}{1 - 0,02}$$

$$Y_{A_2} = 0,0204$$

$$\frac{L_s}{G_s} = \frac{4,2 \times 10^{-2} \text{ kmol água/s}}{6,53 \times 10^{-4} \text{ kmol ar/s}}$$

$$\frac{L_s}{G_s} = 64,32 \frac{\text{kmol água}}{\text{kmol ar}}$$

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

$$64,32 = \frac{0,25 - 0,0204}{X_{A_1} - 0}$$

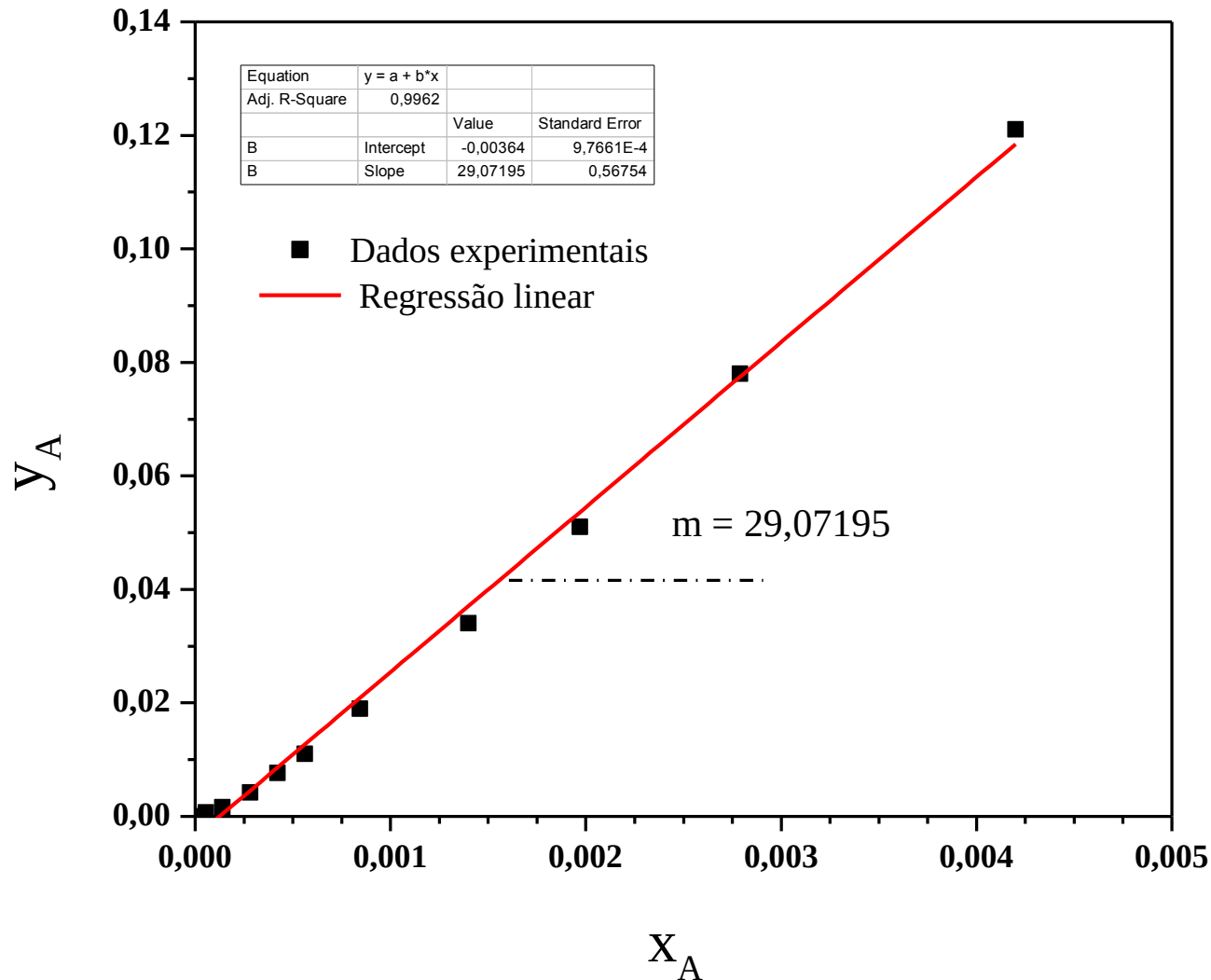
$$X_{A_1} = 3,57 \times 10^{-3}$$



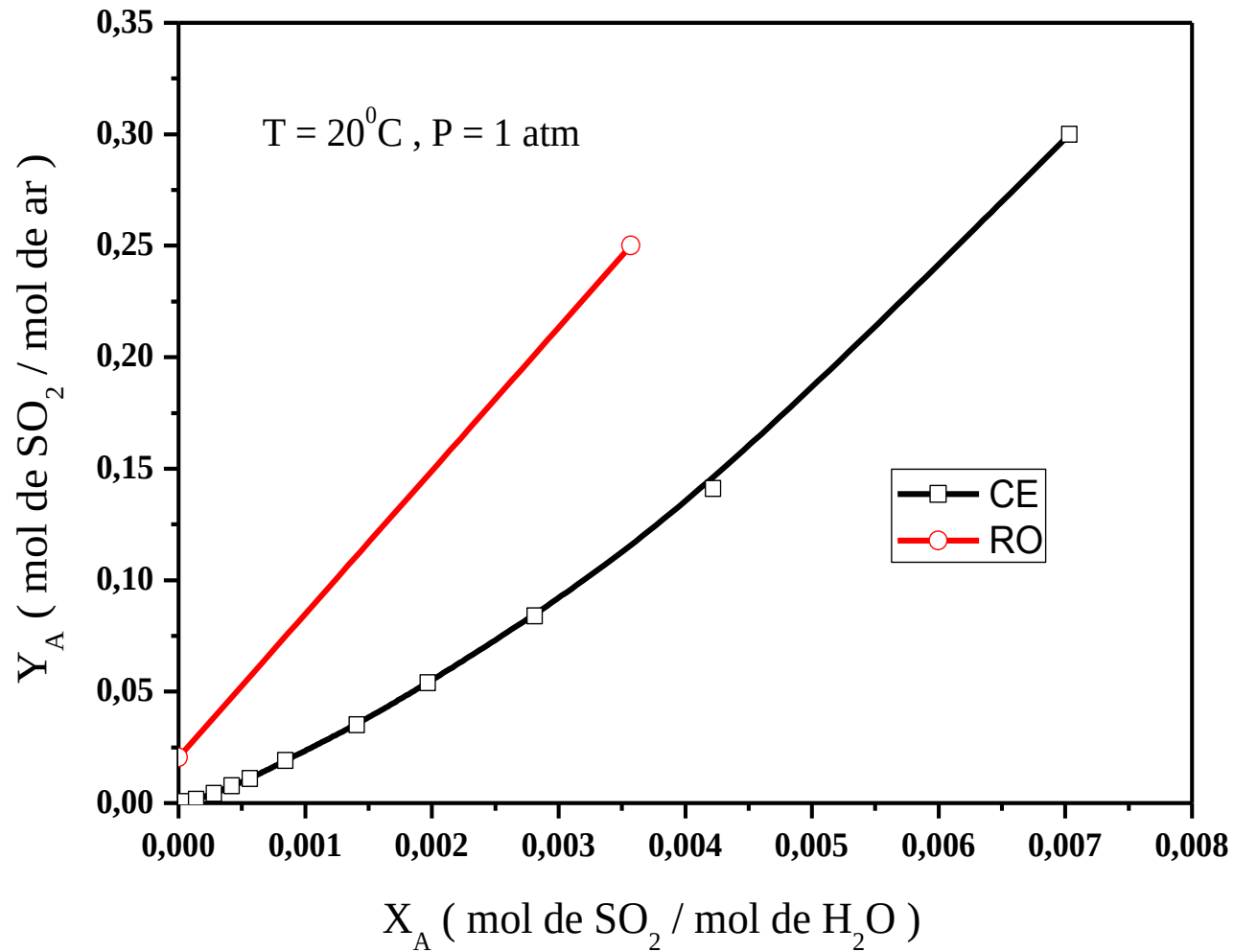
$$X_{A_1} = \frac{X_{A_1}}{1 + X_{A_1}} = \frac{3,57 \times 10^{-3}}{1 + 3,57 \times 10^{-3}}$$

$$X_{A_1} = 3,56 \times 10^{-3}$$

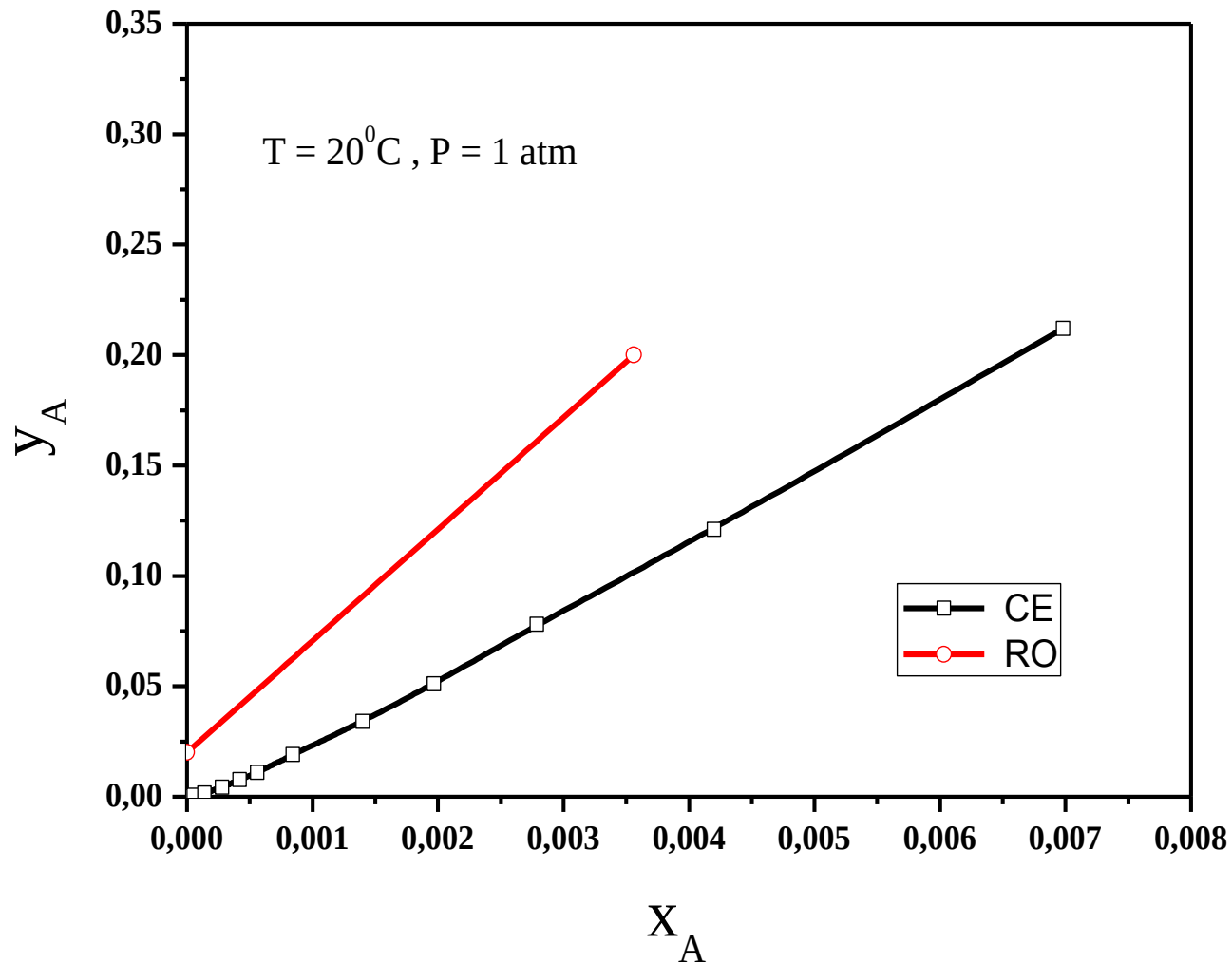
A partir do valor máximo de $x_{A1} = 3,56 \times 10^{-3}$ é possível obter a curva de equilíbrio para condições diluídas com os seguintes dados da tabela de solubilidade SO_2 -ar- H_2O :



Reta de operação (RO) e curva de equilíbrio (CE) em condições diluídas



Reta de operação (RO) e curva de equilíbrio (CE) em condições diluídas



Passo 1: Identificar o equilíbrio termodinâmico:

$$y_{Ai} = 29,07195x_{Ai} ; m = 29,07195$$

Passo 2: Identificar a técnica de separação:

$$G \rightarrow L$$

Passo 3: Identificar o tipo de contato:

Contracorrente ($\downarrow \uparrow$)

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

$$A_T = 0,0929 \text{ m}^2$$

$$L_s = 4,2 \times 10^{-2} \text{ kmol de água/s}$$

$$G_s = 6,53 \times 10^{-4} \text{ kmol de ar/s}$$

$$G_s = (1 - y_{A_1})G_1 = 6,53 \times 10^{-4} \text{ kmol de ar/s} \quad (\text{Entrada})$$

$$G_1 = \frac{G_s}{A(1 - y_{A_1})} = \frac{6,53 \times 10^{-4} \text{ kmol de ar/s}}{0,0929 \text{ m}^2 (1 - 0,2)} = 8,786 \times 10^{-3} \text{ kmol de gás/s.m}^2$$

$$G_1' = G_1 \bar{M}_G = 8,786 \times 10^{-3} \text{ kmol de gás/s.m}^2 (0,2 \times 64 \text{ kg/kmol} + 0,8 \times 29 \text{ kg/kmol})$$

$$G_1' = 0,3163 \text{ kg de gás/s.m}^2$$

$$G_s = (1 - y_{A_2})G_2 = 6,53 \times 10^{-4} \text{ kmol de ar/s} \quad (\text{Saída})$$

$$G'_2 = \frac{G_s}{A(1 - y_{A_2})} = \frac{6,53 \times 10^{-4} \text{ kmol de ar/s}}{0,0929 \text{ m}^2(1 - 0,02)} = 7,173 \times 10^{-3} \text{ kmol de gás/s.m}^2$$

$$G'_2 = G_1 \bar{M}_G = 7,173 \times 10^{-3} \text{ kmol de gás/s.m}^2 (0,02 \times 64 \text{ kg/kmol} + 0,98 \times 29 \text{ kg/kmol})$$

$$G'_2 = 0,213 \text{ kg de gás/s.m}^2$$

$$G' = \frac{G'_1 + G'_2}{2} = \frac{(0,3163 + 0,2130) \text{ kg de gás/s.m}^2}{2} \rightarrow G' = 0,2647 \text{ kg de gás/s.m}^2$$

$$L_s = (1 - x_{A_2})L_2 = 4,2 \times 10^{-2} \text{ kmol de água/s} \quad (\text{Entrada})$$

$$L'_2 = \frac{L_s}{A(1 - x_{A_2})} = \frac{4,2 \times 10^{-2} \text{ kmol de água/s}}{0,0929 \text{ m}^2(1 - 0)} = 0,4521 \text{ kmol de água/s.m}^2$$

$$L'_2 = L_2 \bar{M} = 0,4521 \text{ kmol de água/s.m}^2 (18 \text{ kg/kmol})$$

$$L'_2 = 8,1378 \text{ kg de líquido/s.m}^2$$

$$L_s = (1 - x_{A_1})L_1 = 4,2 \times 10^{-2} \text{ kmol de água/s} \quad (\text{Saída})$$

$$L'_1 = \frac{L_s}{A(1 - x_{A_1})} = \frac{4,2 \times 10^{-2} \text{ kmol de água/s}}{0,0929 \text{ m}^2(1 - 3,56 \times 10^{-3})} = 0,4580 \text{ kmol de água/s.m}^2$$

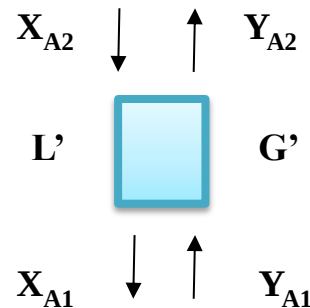
$$L'_1 = L_1 \bar{M} = 0,4521 \text{ kmol de água/s.m}^2 (3,56 \times 10^{-3} \times 64 + 0,99644 \times 18) \text{ kg/kmol}$$

$$L'_1 = 8,319 \text{ kg de líquido/s.m}^2$$

$$L' = \frac{L'_1 + L'_2}{2} = \frac{(8,1378 + 8,319) \text{ kg de líquido/s.m}^2}{2} \rightarrow L' = 8,2284 \text{ kg de líquido/s.m}^2$$

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

Base →	$x_{A1} = 3,56 \times 10^{-3} ; X_{A1} = 3,57 \times 10^{-3}$	$y_{A1} = 0,20 ; Y_{A1} = 0,25$
Topo →	$x_{A2} = 0 ; X_{A2} = 0$	$y_{A2} = 0,02 ; Y_{A2} = 0,0204$



Passo 6: Informação sobre transferência de massa.

Cálculo do coeficiente individual volumétrico de transferência de massa:

$$k_y a = 0,0594 G'^{0,7} L'^{0,25}$$

$$k_x a = 0,152 L'^{0,82}$$

$$[k_y a] = [k_x a] = \text{kmol/m}^3 \cdot \text{s} \cdot \text{fração}$$

$$[L'] = [G'] = \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

$$L' = 8,2284 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

$$G' = 0,2647 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

$$k_y a = 0,0594 (G')^{0,7} (L')^{0,25}$$

$$k_y a = 0,0594 (0,2647 \text{ kg de gás/s.m}^2)^{0,7} (8,2284 \text{ kg de água/s.m}^2)^{0,25}$$

$$k_y a = 0,03968 \text{ kmol/s.m}^3 \cdot \text{fração}$$

$$k_x a = 0,152 (L')^{0,82}$$

$$k_x a = 0,152 (8,2284 \text{ kg de água/s.m}^2)^{0,82}$$

$$k_x a = 0,8559 \text{ kmol/s.m}^3 \cdot \text{fração}$$

Cálculo do coeficiente volumétrico global de transferência na fase gasosa:

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

$$\frac{1}{K_y a} = \frac{1}{0,03968} + \frac{29,07195}{0,8559} = 59,1681$$

$$K_y a = 0,0169 \text{ kmol/s.m}^3 \cdot \Delta y_A$$

Passo 7: Cálculo da altura efetiva da coluna (Z).

$$L_s = 4,2 \times 10^{-2} \text{ kmol de água/s}$$

$$G_s = 6,53 \times 10^{-4} \text{ kmol de ar/s}$$

$$m = 29,07195$$

$$A = \frac{L_s}{m G_s} = \frac{4,2 \times 10^{-2} \text{ kmol de água/s}}{29,07195 (6,53 \times 10^{-4} \text{ kmol ar/s})} = 2,2124$$

$$G'_s = \frac{G_s}{A} = \frac{6,53 \times 10^{-4} \text{ kmol de ar/s}}{0,0929 \text{ m}^2} = 7,03 \times 10^{-3} \text{ kmol de ar/s.m}^2$$

$$AUT = \frac{G'_s}{K_Y a} = \frac{7,03 \times 10^{-3} \text{ kmol/(s.m}^2)}{0,0169 \text{ kmol/(m}^3 \cdot \text{s} \cdot \Delta y_A)}$$

$$AUT = 0,42 \text{ m}$$

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

$$64,32 = \frac{Y_A - 0,0204}{X_A - 0}$$

$$X_A = \frac{Y_A - 0,0204}{64,32}$$

$$X_A = 0,01555 Y_A - 3,172 \times 10^{-4}$$

$$y_A^* = 29,07195x_A \Rightarrow Y_A^* = 29,07195X_A \text{ (soluções diluídas)}$$

$$X_A = 0,01555Y_A - 3,172 \times 10^{-4}$$

$$Y_A^* = 29,07195(0,01555Y_A - 3,172 \times 10^{-4})$$

$$Y_A^* = 0,45207Y_A - 9,2216 \times 10^{-3}$$

$$\text{NUT} = \int_{Y_{A2}}^{Y_{A1}} \frac{dY_A}{(Y_A - Y_A^*)}$$

$$\text{NUT} = \int_{Y_{A2}}^{Y_{A1}} \frac{dY_A}{(Y_A - 0,45207Y_A + 0,0092216)}$$

$$\text{NUT} = \int_{Y_{A2}}^{Y_{A1}} \frac{dY_A}{(0,54793Y_A + 0,0092216)}$$

$$\text{NUT} = \frac{1}{0,54793} [\ln(0,54793Y_A + 0,0092216)]_{Y_{A2}=0,024}^{Y_{A1}=0,25}$$

$$\text{NUT} = \frac{1}{0,54793} \left[\ln \left(\frac{(0,54793)0,25 + 0,0092216}{(0,54793)0,024 + 0,0092216} \right) \right]$$

$$\text{NUT} = \frac{1}{0,54793} \left[\ln \left(\frac{0,1462041}{0,02237148} \right) \right] = \frac{1,87722}{0,54793}$$

$$\text{NUT} = 3,43$$

$$z = (\text{AUT})(\text{NUT})$$

$$z = (0,42\text{m})(3,43)$$

$$z = 1,44 \text{ m}$$

Exemplo 08: Refaça o exemplo 7 pelo *método analítico*.

Solução: A diferença entre o método analítico e o gráfico, para soluções diluídas, consiste na determinação do NUT. Do exemplo anterior obtivemos:

$$A_{UT} = 0,42 \text{ m}$$

Visto que $m = 29,07195$ e $L_s/G_s = 64,32$, temos condições de calcular o *fator de absorção* por intermédio da equação (60).

$$A = \frac{L_s}{mG_s} = 2,2124$$

Além das frações molares absolutas oriundas do exemplo anterior:

Base →	$X_{A1} = 3,57 \times 10^{-3}$	$Y_{A1} = 0,25$
Topo →	$X_{A2} = 0$	$Y_{A2} = 0,0204$

Como trata-se de $G \rightarrow L$ e $\downarrow\uparrow$, o NUT é obtido analiticamente pela equação (62).

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

$$\text{NUT} = \frac{1}{(1-1/2,2124)} \ln \left[\frac{0,25-0}{0,0204-0} (1-1/2,2124) + 1/2,2124 \right]$$

$$\text{NUT} = 1,8248 \ln[(12,2549)(0,5480) + 0,4520]$$

$$\text{NUT} = 1,8248 \ln[7,1677]$$

$$\text{NUT} = 3,59$$

$$z = (\text{AUT})(\text{NUT})$$

$$z = (0,42\text{m})(3,59) = 1,51\text{ m}$$

Que é bem próximo ao resultado obtido no exemplo anterior!!