

Fenômenos de Transporte III

Aula 10

Prof. Gerônimo

1.4 Balanço macroscópico de matéria em regime permanente e sem reação química.

Para projetar ou dimensionar um equipamento destinado à separação, são necessários informações sobre:

- termodinâmica (equilíbrio de fases/solubilidade)
- transferência de massa
- condições de operação do equipamento (perda de carga, retenção de líquido, etc)
- concentrações das fases que compõe o sistema
- troca térmica entre as fases

As informações macroscópicas sobre tais fenômenos advêm dos balanços macroscópicos de matéria e de energia.

Pelo fato de estarmos interessados em uma introdução às operações de transferência de massa, iremos nos fixar nas *soluções diluídas* e, por via de consequência, *isotérmicas*.

Relações de equilíbrio

As relações de equilíbrio costumam ser apresentadas sob a seguinte forma:

a- Pressão parcial versus concentração

b- fração molar na fase gasosa (y) versus fração molar na fase líquida (x)

c- frações molares absolutas X versus Y , sendo X o número de mols de soluto por mols de solvente puro (isento de soluto) e Y o número de mols de soluto por mols de gás isento de soluto. As relações entre X , Y e x, y são as seguintes:

$$Y_A = \frac{y_A}{y_B} = \frac{y_A}{1 - y_A} \quad \Rightarrow \quad y_A = \frac{Y_A}{Y_B} = \frac{Y_A}{1 + Y_A}$$

$$X_A = \frac{x_A}{x_B} = \frac{x_A}{1 - x_A} \quad \Rightarrow \quad x_A = \frac{X_A}{X_B} = \frac{X_A}{1 + X_A}$$

Exemplo 01: Os dados de equilíbrio do sistema ar-SO₂-água a 1 atm e 20°C são apresentados na tabela a seguir, sob a forma de p versus ρ (p é a pressão parcial do SO₂ em mmHg e ρ é a concentração mássica de SO₂ na solução em g SO₂/100 g de água). Obter a curva de equilíbrio em termos das relações molares absolutas X e Y.

ρ (g SO ₂ /100 g H ₂ O)	0,5	1,0	2,0	3,0	5,0	10,0
P (mmHg)	26	59	123	191	336	698

Solução:

A = SO₂ ; B = H₂O

X = mol de SO₂/mol de H₂O (no líquido)

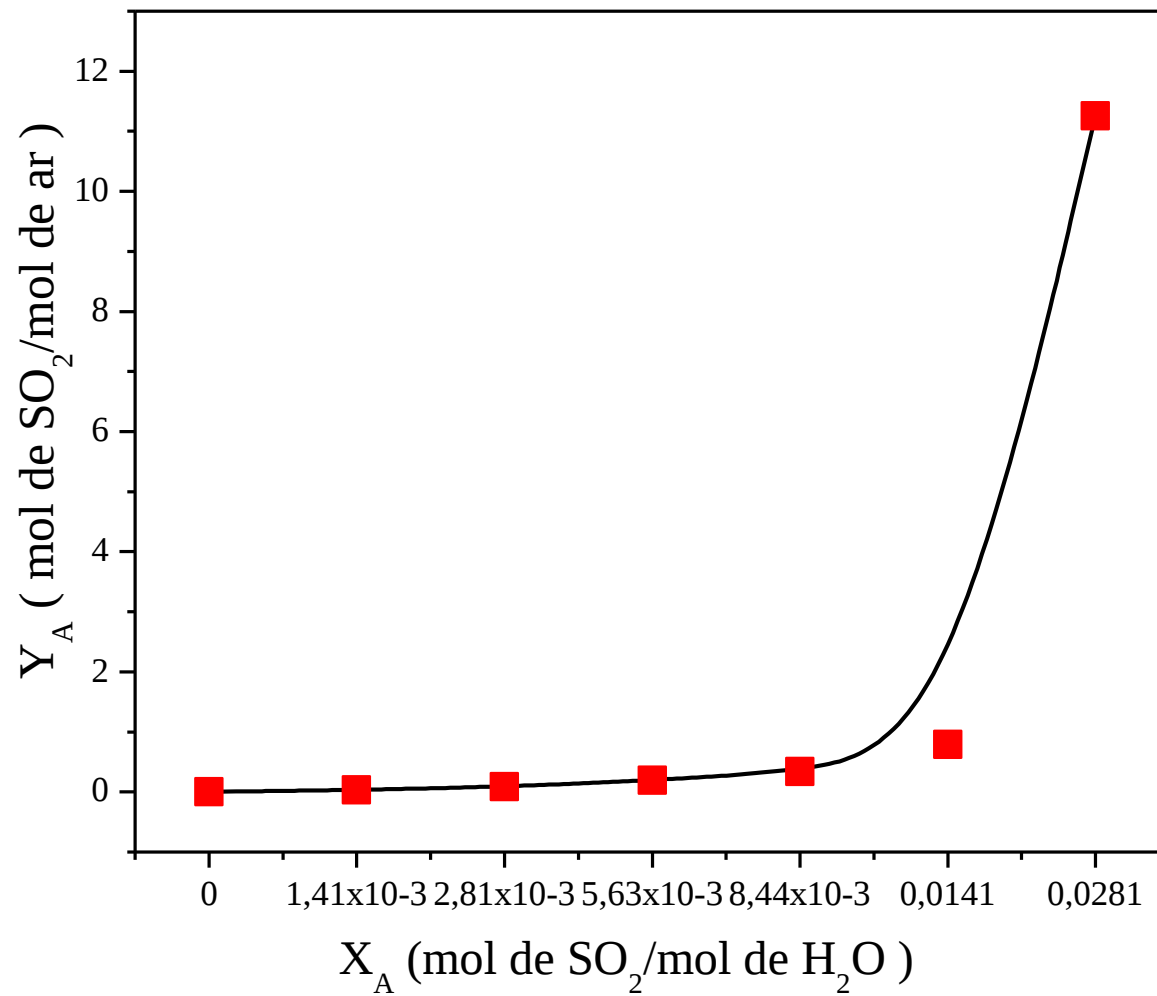
Y = mol de SO₂/mol de ar (no gás)

Em termos de ρ e p resulta:

$$X_A = \frac{\text{mol de A}}{\text{mol de B}} = \frac{x_A}{1 - x_A} = \frac{x_A}{x_B} = \frac{C_A/C}{C_B/C} = \frac{\rho_A/M_A}{\rho_B/M_B} = \frac{\rho_A/64}{100/18} = (0,0028125)\rho_A$$

$$Y_A = \frac{\text{mol de A}}{\text{mol de B}} = \frac{y_A}{1 - y_A} = \frac{y_A}{y_B} = \frac{p_A/P}{1 - p_A/P} = \frac{p_A}{P - p_A} = \frac{p_A}{760 - p_A}$$

X (mol de SO ₂ /mol de H ₂ O)	1,41x10 ⁻³	2,81x10 ⁻³	5,63x10 ⁻³	8,44x10 ⁻³	0,0141	0,0281
Y (mol de SO ₂ /mol de ar)	0,03546	0,08417	0,19309	0,33568	0,79245	11,2580



1.4.1 Operações contínuas

Contato contracorrente

A Figura a seguir ilustra uma operação de transferência de massa envolvendo o contato contracorrente entre duas correntes relacionadas às fases G e L.

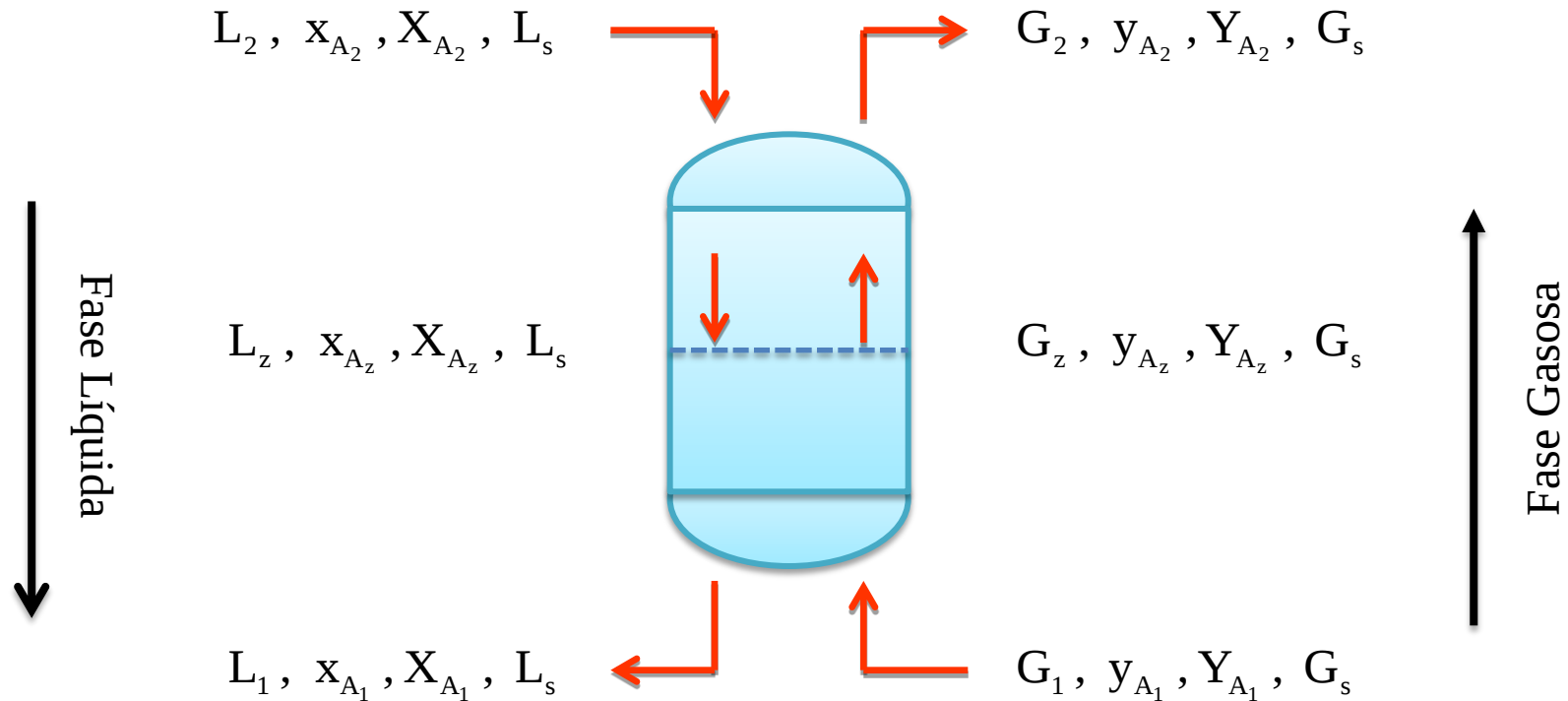


Figura 4: Contato contracorrente

G_1 e G_2 = Fluxo molar total do gás na base e no topo da coluna

G_s = Fluxo molar do gás inerte na base e no topo da coluna

y_{A_1} e y_{A_2} = fração molar do soluto gasoso na base e no topo da coluna

Y_{A_1} e Y_{A_2} = fração molar absoluta do soluto gasoso na base e no topo da coluna

L_1 e L_2 = Fluxo molar total do líquido na base e no topo da coluna

L_s = Fluxo molar do líquido inerte na base e no topo da coluna

x_{A_1} e x_{A_2} = fração molar do soluto do líquido na base e no topo da coluna

X_{A_1} e X_{A_2} = fração molar absoluta do soluto líquido na base e no topo da coluna

G_z e L_z = Fluxo molar total do gás e do líquido numa posição z da coluna

y_{A_z} e x_{A_z} = fração molar do soluto gasoso e líquido numa posição z da coluna

Y_{A_z} e X_{A_z} = fração molar absoluta do soluto gasoso e líquido numa posição z da coluna

Balanço macroscópico de matéria da Figura 4

$$\text{Mols de A que entram na coluna} = \text{Mols de A que saem da coluna} \quad (30)$$

De posse da Figura 4 e o balanço (equação 30) temos para o soluto A:

$$(\text{soluto A}) \quad G_1 y_{A_1} + L_2 x_{A_2} = G_2 y_{A_2} + L_1 x_{A_1} \quad (31)$$

Visto que o balanço (31) ser genérico, ele pode ser aplicado em qualquer plano z da coluna:

$$(\text{soluto A}) \quad G_1 y_{A_1} + L_z x_{A_z} = G_z y_{A_z} + L_1 x_{A_1} \quad (32)$$

Considerando que os fluxos molares dos inertes (s) permanecem constantes em toda a coluna, teremos:

Para a corrente G:

$$(\text{Inerte S}) \quad G_1(1 - y_{A_1}) = \dots G_z(1 - y_{A_z}) \dots = G_2(1 - y_{A_2}) = G_s \quad (33)$$

em que G_s é o fluxo molar do inerte presente na corrente G (fase leve).

Para a corrente L:

(Inerte S)
$$L_1(1 - x_{A_1}) = \dots L_z(1 - x_{A_z}) \dots = L_2(1 - x_{A_2}) = L_s \quad (34)$$

em que L_s é o fluxo molar do inerte presente na corrente L (fase pesada).

A *fração molar absoluta do soluto* é definida da seguinte maneira:

Para a corrente G:

$$Y_A = \frac{\text{mols de A em G}}{\text{mols de G sem A}} = \frac{\text{mols de A em G}}{\text{mols de B em G}} = \frac{\text{mols de A}}{\text{mols de B}} \quad (35)$$

Por conseguinte:

$$Y_A = \frac{y_A}{1 - y_A} = \frac{y_A}{y_B} \rightarrow y_A = (1 - y_A)Y_A \quad (36)$$

Para a corrente L:

$$X_A = \frac{x_A}{1 - x_A} = \frac{x_A}{x_B} \rightarrow x_A = (1 - x_A)X_A \quad (37)$$

Substituindo as equações (36) e (37) na equação (31), temos:

$$G_1(1-y_{A_1})Y_{A_1} + L_2(1-x_{A_2})X_{A_2} = G_2(1-y_{A_2})Y_{A_2} + L_1(1-x_{A_1})X_{A_1} \quad (36)$$

Identificando as equações (33) e (34) na equação (36), temos:

$$G_s Y_{A_1} + L_s X_{A_2} = G_s Y_{A_2} + L_s X_{A_1} \quad (37)$$

Rearranjando essa equação, o resultado fica:

(Linha de operação)

$$\frac{L_s}{G_s} = \frac{Y_{A_1} - Y_{A_2}}{X_{A_1} - X_{A_2}} \quad (38)$$

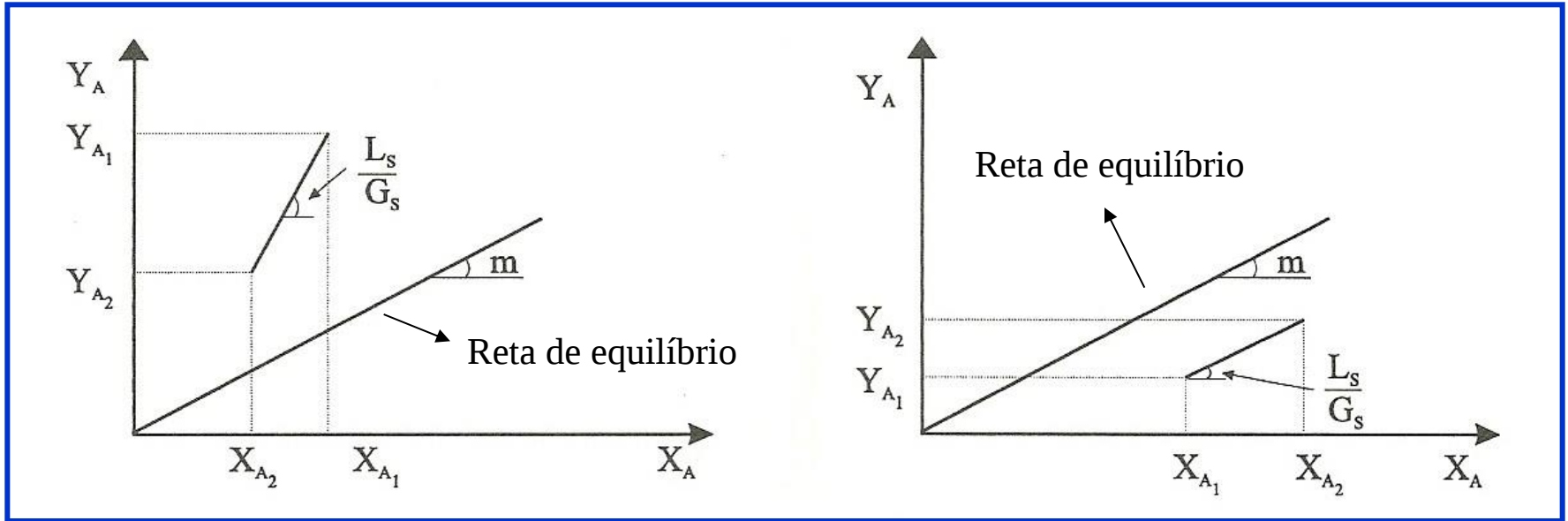
Para um plano arbitrário em z , substituiremos o subíndice 2 pelo subíndice z na equação (38), levando-nos a:

(Linha de operação)

$$\frac{L_s}{G_s} = \frac{Y_{A_1} - Y_{A_z}}{X_{A_1} - X_{A_z}} \quad (39)$$

A equação (39) é a expressão geral que descreve a relação entre as frações molares absolutas do soluto no seio das correntes G e L em qualquer plano do equipamento de transferência de massa. Essa equação denomina-se **linha de operação**.

Operação contracorrente (soluções diluídas):



Operação $G \rightarrow L$
Absorção

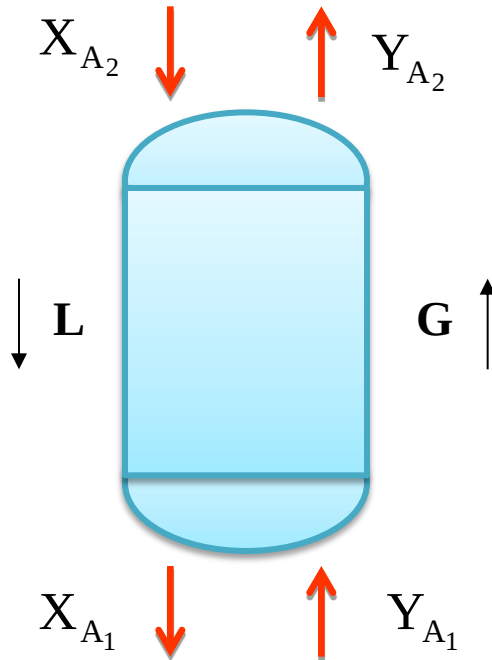
Operação $L \rightarrow G$
Desabsorção

(Reta de equilíbrio)

$$y_{A_i} = mx_{A_i}$$

(40)

Operação: $G \rightarrow L$

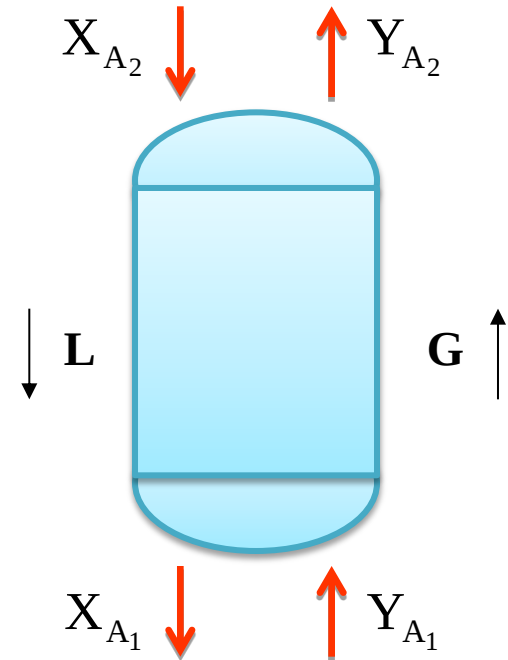


L entra *pobre* e sai *rico* de soluto : $X_{A_2} < X_{A_1}$
G entra *rico* e sai *pobre* de soluto : $Y_{A_2} < Y_{A_1}$



Absorção

Operação: $L \rightarrow G$

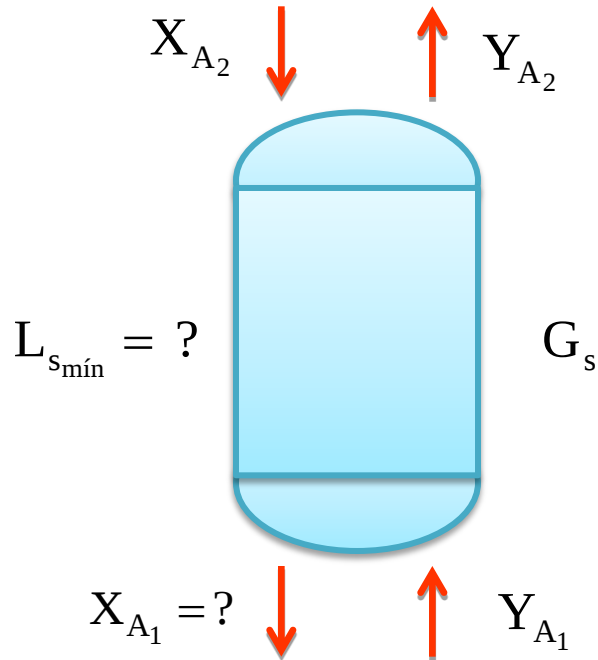


L entra *rico* e sai *pobre* de soluto : $X_{A_2} > X_{A_1}$
G entra *pobre* e sai *rico* de soluto : $Y_{A_2} > Y_{A_1}$



Desabsorção ou Dessorção

Condição mínima de operação para que haja separação de um determinado soluto

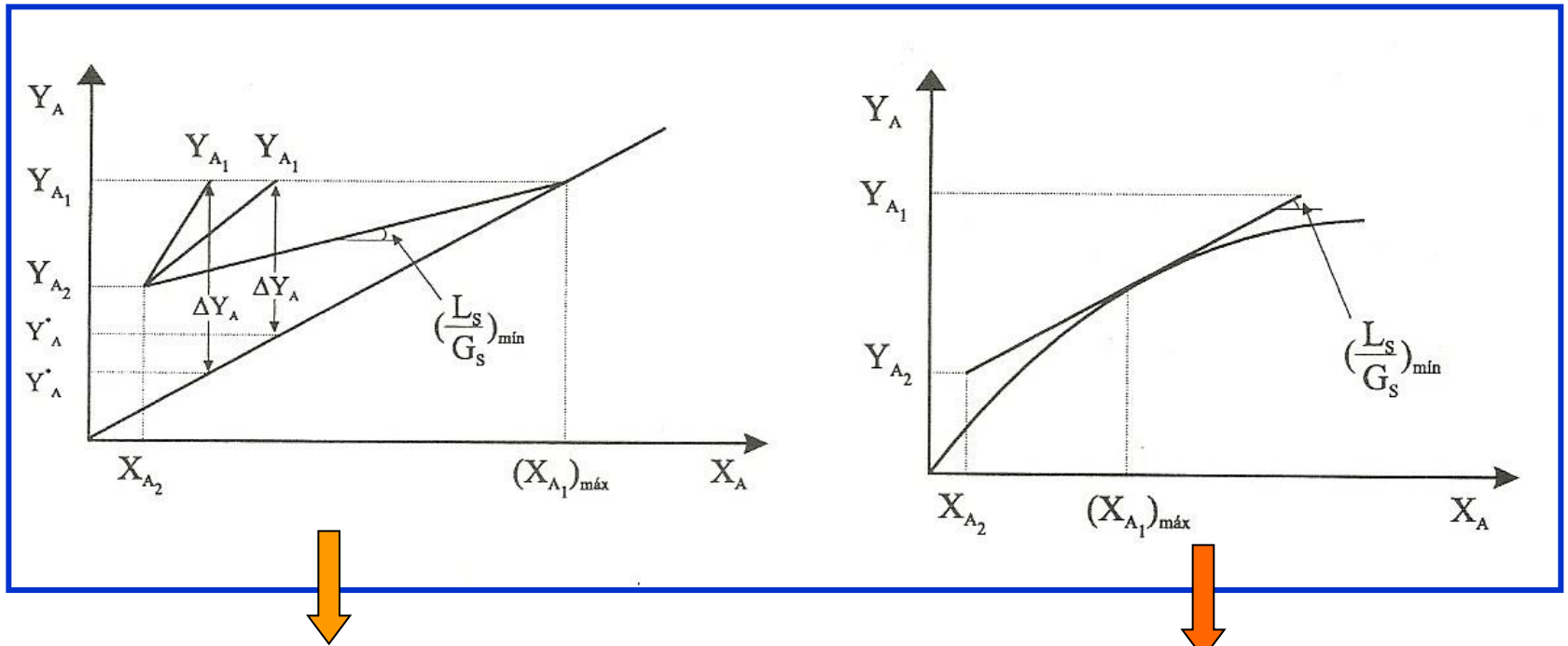


$$\left(\frac{L_s}{G_s} \right)_{\min} = \frac{Y_{A_1} - Y_{A_2}}{X_{A_1} - X_{A_2}} = \frac{\Delta Y_A}{\Delta X_A} \quad (41)$$

A razão (L_s/G_s) é mínima quando ΔX_A atingir um valor máximo

L_s é o fluxo molar do inerte presente na corrente L (fase pesada)

G_s é o fluxo molar do inerte presente na corrente G (fase leve)



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

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

Na medida em que diminuimos a quantidade de solvente e, com isso, a inclinação (L_s/G_s) , iremos diminuir a diferença entre Y_{A1} e Y_{A1}^* (no equilíbrio) na base da coluna e, por consequência a força motriz ΔY_A necessária ao soluto para que ele migre da fase G para a fase L. No instante em que a linha de operação tocar a linha de equilíbrio, teremos $\Delta Y_A = 0$, levando tanto o tempo de contato quanto a altura efetiva da coluna a valores infinitos.

Contato paralelo

A Figura a seguir ilustra uma operação de transferência de massa envolvendo o contato paralelo entre duas correntes relacionadas às fases G e L.

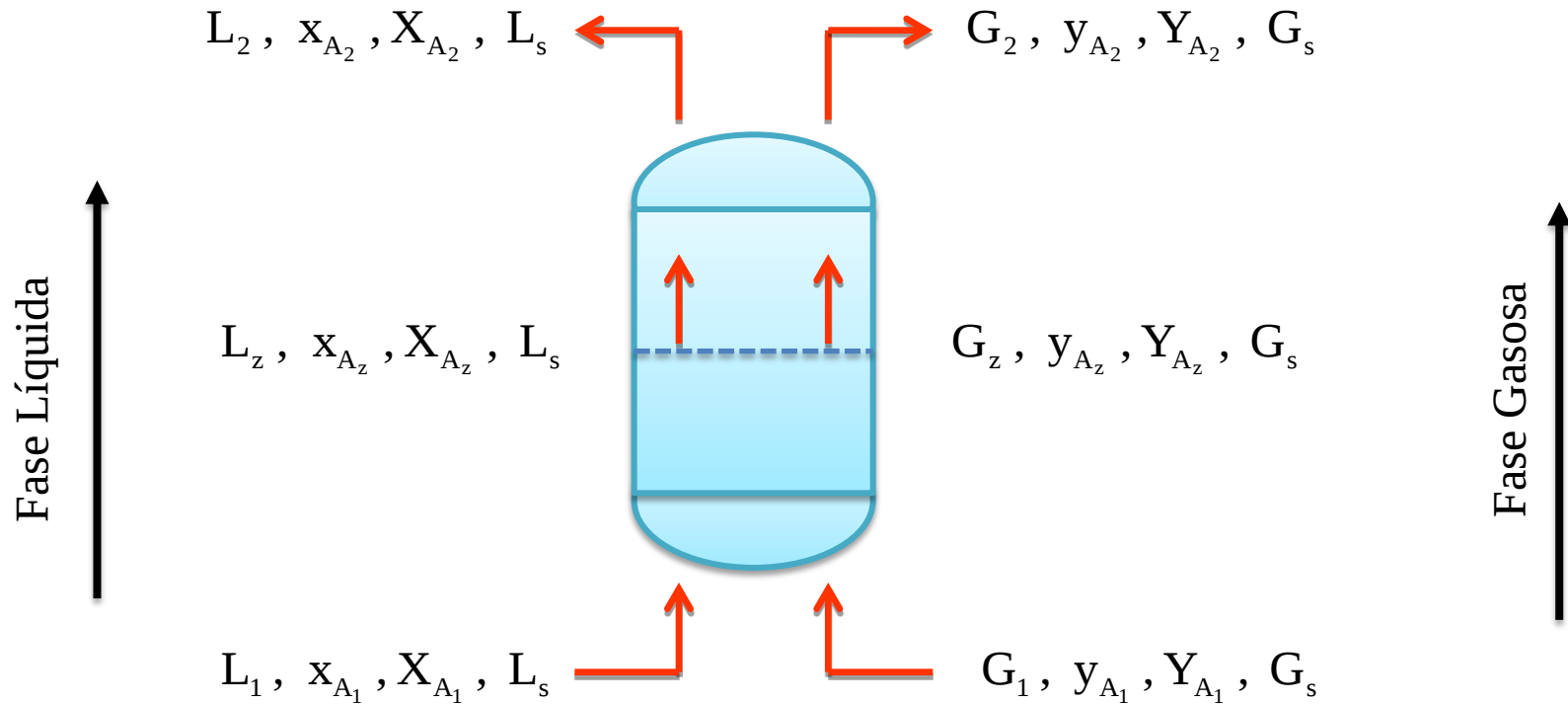


Figura 5: Contato paralelo

Balanço material em termos dos fluxos de inertes para contato paralelo

Mols de A que entram na coluna = Mols de A que saem da coluna

$$G_s Y_{A_1} + L_s X_{A_1} = G_s Y_{A_2} + L_s X_{A_2} \quad (42)$$



(Linha de operação)

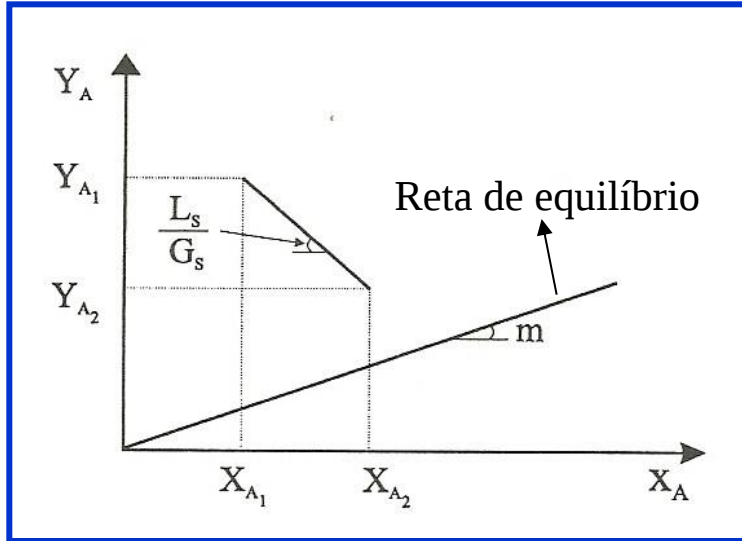
$$\frac{L_s}{G_s} = - \frac{Y_{A_1} - Y_{A_2}}{X_{A_1} - X_{A_2}} \quad (43)$$

ou para um plano arbitrário em z:

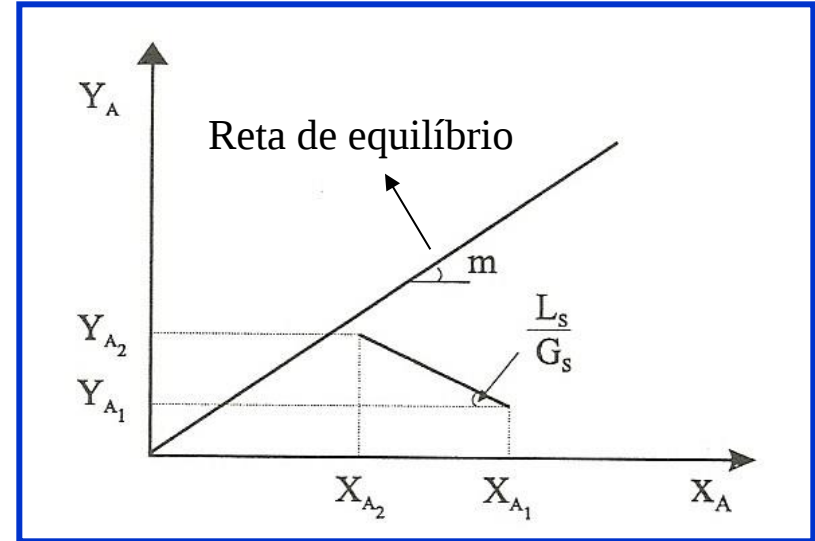
(Linha de operação)

$$\frac{L_s}{G_s} = - \frac{Y_{A_1} - Y_{A_z}}{X_{A_1} - X_{A_z}} \quad (44)$$

Operação paralelo (soluções diluídas):



Operação G → L
Absorção

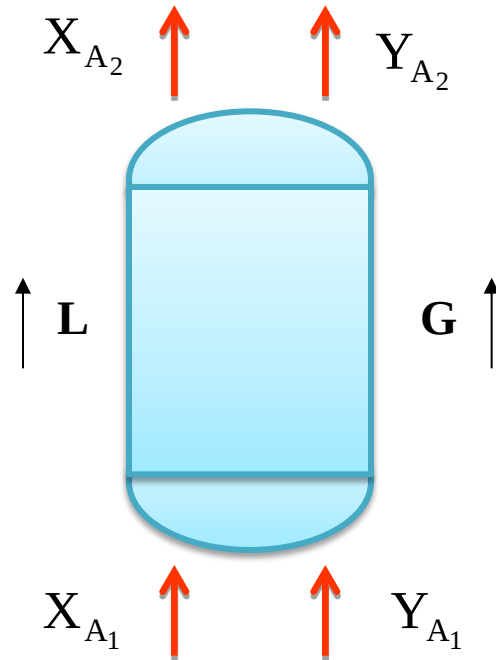


Operação L → G
Desabsorção

(Reta de equilíbrio)

$$y_{A_i} = mx_{A_i} \quad (40)$$

Operação: $G \rightarrow L$

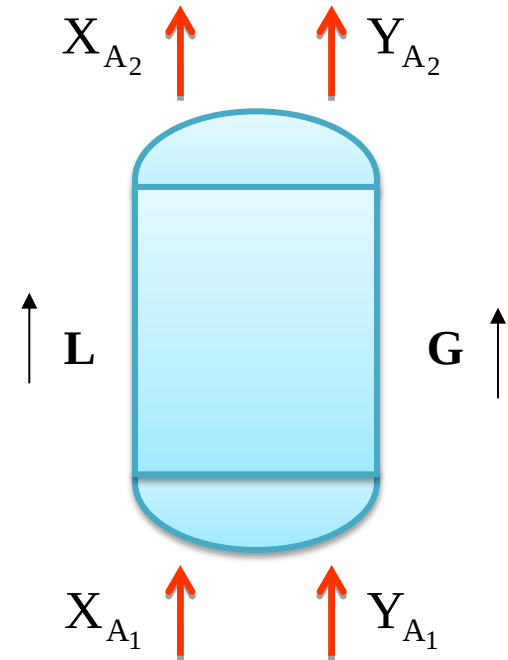


L entra *pobre* e sai *rico* de soluto : $X_{A_2} > X_{A_1}$
G entra *rico* e sai *pobre* de soluto : $Y_{A_2} < Y_{A_1}$



Absorção

Operação: $L \rightarrow G$

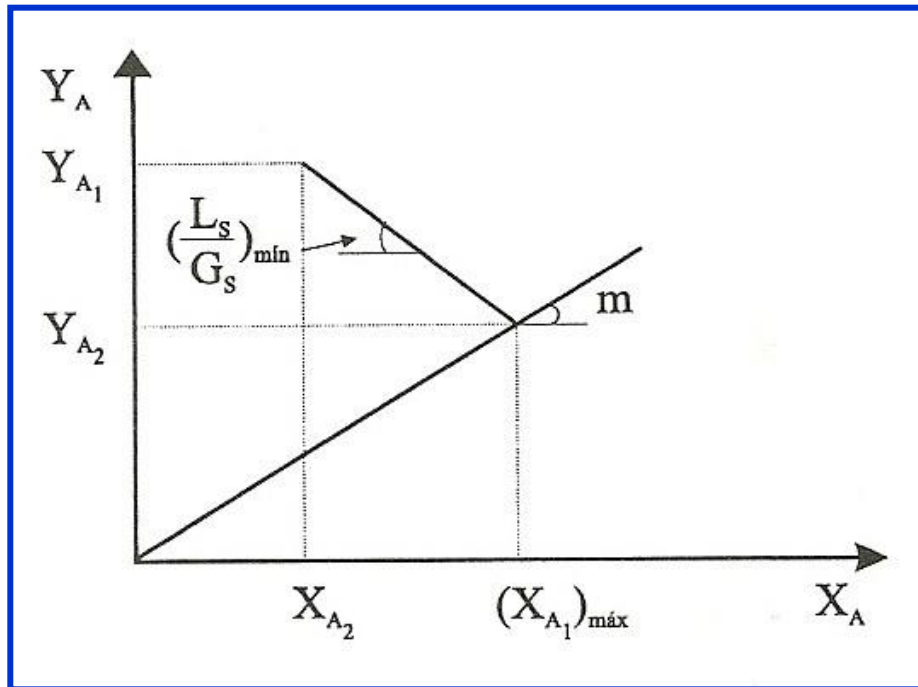


L entra *rico* e sai *pobre* de soluto : $X_{A_2} < X_{A_1}$
G entra *pobre* e sai *rico* de soluto : $Y_{A_2} > Y_{A_1}$



Desabsorção ou Dessorção

Representação da razão mínima de operação para o contato paralelo G → L



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

Cálculo da altura efetiva de uma coluna para operação contínua em um sistema diluído

A altura efetiva de uma coluna é aquela na qual há o contato entre as correntes que compõem as técnicas de separação, Figuras 2 (torre de spray), 3 (torre de borbulhamento) e 4 (coluna de recheiro) da Aula 9.

Admitindo *soluções diluídas* e a técnica tipo $G \rightarrow L$, definiremos o fluxo em função da fração molar absoluta de A da seguinte maneira:

$$N_{A,Z} = K_Y (Y_{A_G} - Y_A^*) \quad (45)$$

K_Y = coeficiente global de transferência de massa referenciado à fase gasosa tendo a fração molar absoluta de A como força motriz.

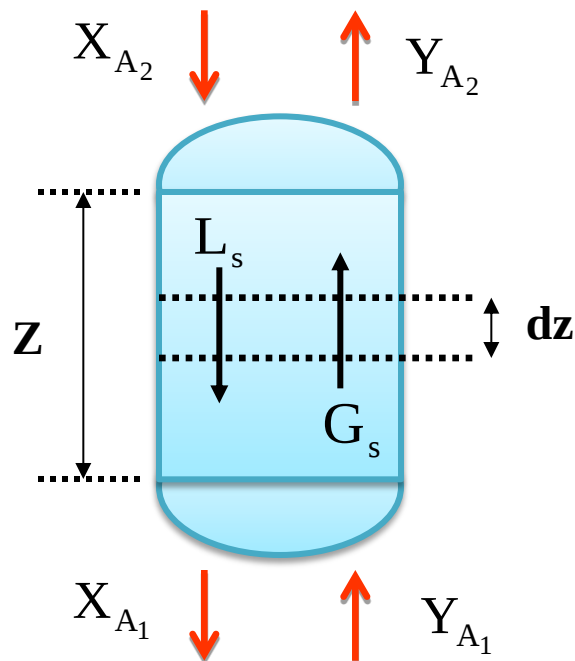
Y_A^* é a fração molar absoluta de A na fase gasosa em equilíbrio com a fração molar absoluta de A no seio da fase líquida (X_A).

Trazendo a definição de *coeficiente volumétrico global* na equação (45), obtemos:

$$N_{A,Z} a = K_Y a (Y_{A_G} - Y_A^*) \quad (46)$$

a = área interfacial específica para transferência de massa

Se a separação ocorrer em um comprimento diferencial dz numa dada seção de contato $G \rightarrow L$, a equação (46) é posta como:



$$N_{A,Z}a = K_Y a (Y_{A_G} - Y_A^*) \quad (46)$$



$$N_{A,Z}a dz = K_Y a (Y_{A_G} - Y_A^*) dz \quad (47)$$

Para o contato contracorrente ($\downarrow \uparrow$), a equação (39) é reescrita em um comprimento diferencial dz segundo:

$$\frac{L_s}{G_s} = \frac{Y_{A_1} - Y_{A_z}}{X_{A_1} - X_{A_z}} \quad (39)$$



$$L_s dX_A = G_s dY_A \quad (48)$$

Visto que as equações (47) e (48) correspondem ao mesmo fluxo global de A, temos:

$$G_s dY_A = K_Y a (Y_{A_G} - Y_A^*) dz \quad (49)$$

Explicitando dz na equação (49), fica:

$$dz = \frac{G_s}{K_Y a} \frac{dY_A}{(Y_{A_G} - Y_A^*)} \quad (50)$$

Integrando a equação (50), tendo como limites de integração as frações molares absolutas do soluto A tanto na base da torre, *índice 1*, quanto no seu topo, *índice 2*, a altura efetiva do equipamento será:

(Altura efetiva)

$G \rightarrow L$

$$z = \frac{G_s}{K_Y a} \int_{Y_{A_2}}^{Y_{A_1}} \frac{dY_A}{(Y_A - Y_A^*)} \quad (51)$$

Denominando;

$$\boxed{AUT = \frac{G_s}{K_Y a}} \quad (52)$$

e

$$\boxed{NUT = \int_{Y_{A2}}^{Y_{A1}} \frac{dY_A}{(Y_A - Y_A^*)}} \quad (53)$$

$G \rightarrow L$

AUT = Altura da Unidade de Transporte (unidades de comprimento)

NUT = Número de Unidades de Transporte (adimensional)

Para a técnica de separação $L \rightarrow G$, as definições da AUT e NUT são, respectivamente:

$$\boxed{AUT = \frac{L_s}{K_x a}} \quad (54)$$

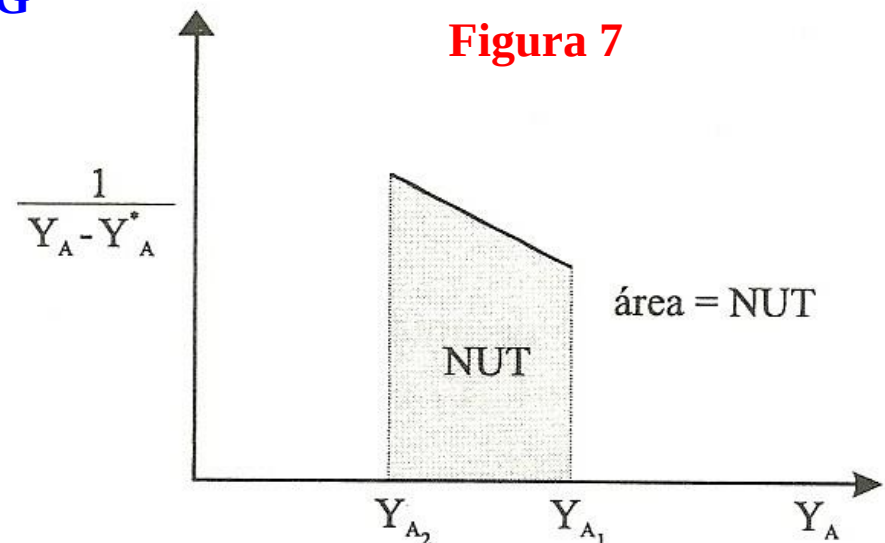
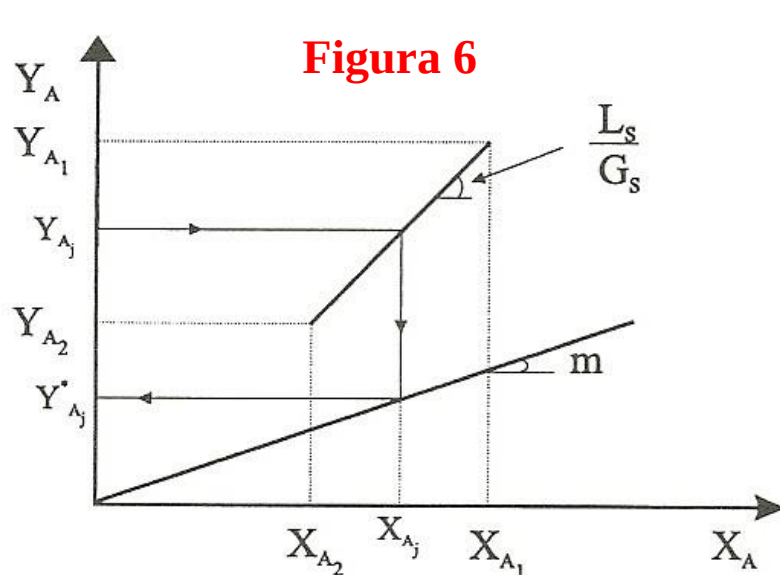
$$\boxed{NUT = \int_{X_{A2}}^{X_{A1}} \frac{dX_A}{(X_A - X_A^*)}} \quad (55)$$

Qualquer que seja a forma de contato entre as correntes G e L (absorção ou desabsorção), a altura efetiva da coluna é obtida por intermédio de:

$$z = (AUT)(NUT) \quad (56)$$

Método gráfico

O cálculo do NUT é feito por integração gráfica ou numérica. Quanto ao valor da diferença $(Y_A - Y_A^*)$, as Figuras 6 e 7 ilustram o procedimento para avaliar Y_A^* .



Determinação gráfica de Y_A^*

Determinação gráfica do NUT

Note que a Figura 6 a força motriz ($Y_A - Y_A^*$) é determinada ponto a ponto entre Y_{A1} e Y_{A2} e a reta de equilíbrio, após conhecidas as retas de operação e de equilíbrio. Dessa forma, obtém-se o NUT pela integração da área representada na Figura 7. A área nessa Figura pode ser calculada numericamente pela *regra de Simpson*:

$$\text{NUT} = \frac{h}{3} [f_o + 4f_{(2j+1)} + 2f_{(2j)} + f_n] \quad (57)$$

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

onde n é o número de intervalos entre Y_{A1} e Y_{A2} (número par)

Método analítico

A maior dificuldade em se calcular a altura efetiva da coluna reside na determinação do NUT (equações 53 e 55). No entanto, como estamos tratando de *soluções diluídas*, realizaremos algumas aproximações. Dentre elas, está em considerar que a reta de equilíbrio dada pela equação (40) é válida para $Y_{Ai} = mX_{Ai}$. Esta situação é aceitável nas situações de *diluição extrema*. Se esta hipótese é admitida, tornam-se razoáveis as aproximações $Y_A^* = mX_A$ e $Y_A = mX_A^*$, possibilitando-nos buscar a equação (38), para a técnica $G \rightarrow L$ e *contato contracorrente*, devemos escrevê-la da seguinte maneira:

$$\frac{L_s}{G_s} = \frac{Y_{A_1} - Y_{A_2}}{X_{A_1} - X_{A_2}} \quad (38)$$

$$y_{A_i} = m x_{A_i} \quad (40)$$

$$\left. \begin{array}{l} Y_{A_2}^* = m X_{A_2} \\ Y_A^* = m X_A \end{array} \right\} \quad (\text{diluição extrema}) \quad (60)$$

$$\frac{L_s}{G_s} = \frac{Y_A - Y_{A_2}}{Y_A^*/m - Y_{A_2}^*/m} \quad (58)$$

ou

$$\frac{L_s}{m G_s} = \frac{Y_A - Y_{A_2}}{Y_A^* - Y_{A_2}^*} \quad (59)$$

$$A = \frac{L_s}{m G_s} \quad (\text{fator de absorção})$$

Isolando Y_A^* na equação 59 fica:

$$Y_A^* = \frac{1}{A} Y_A - \frac{1}{A} Y_{A_2} + Y_{A_2}^* \quad Y_{A_2}^* = mX_{A_2}$$

$$Y_A^* = \frac{1}{A} Y_A - \frac{1}{A} Y_{A_2} + mX_{A_2} \quad (61)$$

Substituindo Y_A^* dada pela equação (61) na definição do NUT da equação (53), observamos:

$$\text{NUT} = \int_{Y_{A_2}}^{Y_{A_1}} \frac{dY_A}{\left(Y_A - Y_A^* \right)} \quad \text{NUT} = \int_{Y_{A_2}}^{Y_{A_1}} \frac{dY_A}{\left(1 - \frac{1}{A} \right) Y_A + \frac{1}{A} Y_{A_2} - mX_{A_2}}$$

G → L

$$\text{NUT} = \frac{1}{(1 - 1/A)} \ln \left[\frac{Y_{A_1} - mX_{A_2} (1 - 1/A) + 1/A}{Y_{A_2} - mX_{A_2} (1 - 1/A) + 1/A} \right] \quad (62)$$

Para a técnica $L \rightarrow G$, para contato *contracorrente*, temos:

$$NUT = \frac{1}{(1-A)} \ln \left[\frac{X_{A_2} - Y_{A_1}/m}{X_{A_1} - Y_{A_1}/m} (1-A) + A \right] \quad (63)$$

Para o contato *paralelo*, existem as seguintes equações:

$G \rightarrow L$

$$NUT = \frac{1}{(1+1/A)} \ln \left[\frac{Y_{A_1} - mX_{A_1}}{Y_{A_2} - mX_{A_2}} \right] \quad (64)$$

$L \rightarrow G$

$$NUT = \frac{1}{(1+A)} \ln \left[\frac{X_{A_2} - Y_{A_2}/m}{X_{A_1} - Y_{A_1}/m} \right] \quad (65)$$

Dessa maneira, a altura efetiva da coluna é determinada utilizando-se a equação (56), a qual é obtida do produto de (AUT) e (NUT) para as situações descritas no quadro a seguir:

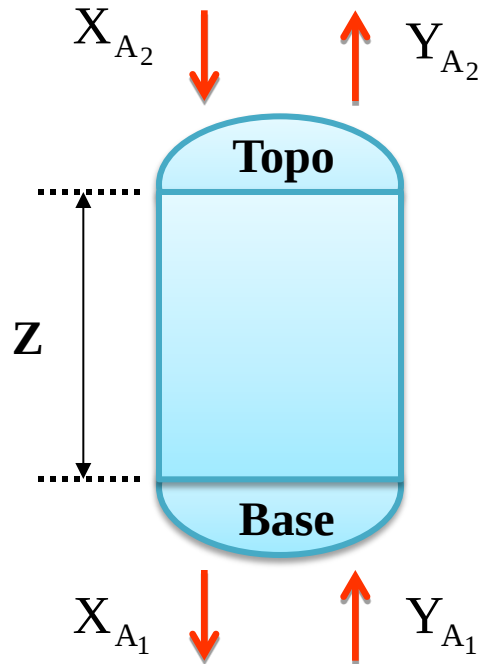
$$z = (AUT)(NUT) \quad (56)$$

Tabela 4: Cálculo da altura efetiva para sistemas diluídos

Tipo de contato	Técnica de separação	AUT	NUT
contracorrente ↓↑	G → L	Equação 53	Equação 62
contracorrente ↓↑	L → G	Equação 55	Equação 63
paralelo ↑↑	G → L	Equação 53	Equação 64
paralelo ↑↑	L → G	Equação 55	Equação 65

O resumo no quadro é aplicado para situações diluídas e quando a relação de equilíbrio termodinâmico obedece ao formato da relação da *lei de Henry*.

Contracorrente ↓↑



(Absorção)

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

(Desabsorção)

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

Y = número de mol de soluto por mol de gás isento de soluto

X = número de mol de soluto por mol de solvente puro (isento de soluto)

Exemplo 02: Uma corrente de ar que passa por um sistema de ventilação industrial a 755 mmHg possui 4% de amônia em volume. Pretende-se recuperar a amônia por lavagem em contracorrente com água a 28°C numa torre de enchimento, empregando-se 40% de água a mais do que a quantidade mínima necessária para obter 99,5% de recuperação da amônia inicialmente presente no gás. Calcular a vazão de água a ser empregada, para uma vazão de gás igual a 200 kmol/h e fazer uma estimativa da altura da torre.

Dados:

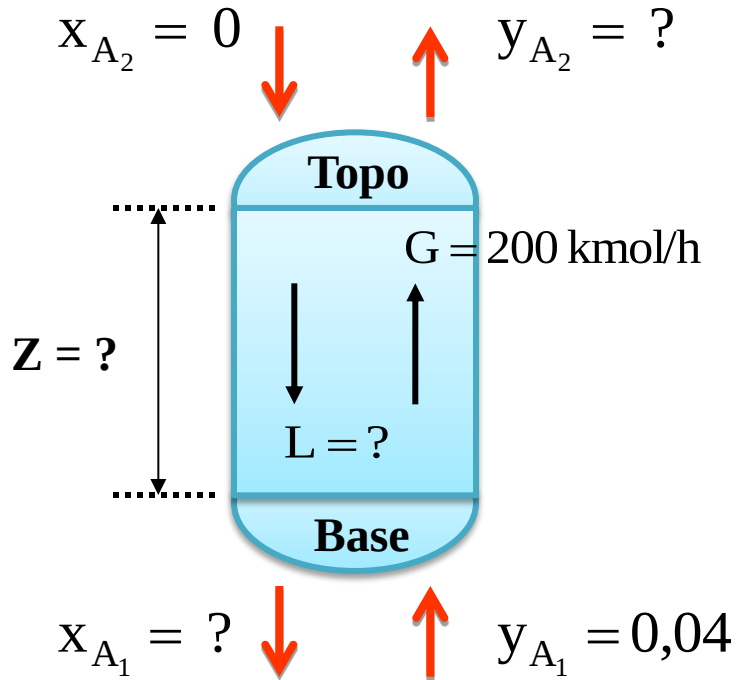
(1) Para as condições especificadas, os dados de equilíbrio do sistema poderão ser representados pela seguinte equação:

$$y = 1,154x$$

(2) A altura de uma unidade de transferência (AUT), para força propulsora global em unidades de concentração no gás, poderá ser adotada igual a 0,52 m.

Solução:

Absorção em contracorrente



$$Y_{A_1} = \frac{y_{A_1}}{1 - y_{A_1}}$$

$$Y_{A_1} = \frac{y_{A_1}}{1 - y_{A_1}} = \frac{0,04}{1 - 0,04}$$

$$Y_{A_1} = 0,0417$$

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

$$99,5\% = \left(\frac{0,0417 - Y_{A_2}}{0,0417} \right) 100\%$$

$$Y_{A_2} = 2,085 \times 10^{-4}$$

$$y_{A_1} = 0,04$$

$$x_{A_1} = ?$$

$$Y_{A_2} = \frac{y_{A_2}}{1 - y_{A_2}}$$



$$Y_{A_2} = 2,085 \times 10^{-4} = \frac{y_{A_2}}{1 - y_{A_2}}$$

$$y_{A_2} = 2,0846 \times 10^{-4}$$

$$y = 1,154x$$



$$(x_{A_1})_{\text{máx}} = \frac{0,04}{1,154} = 0,0346$$

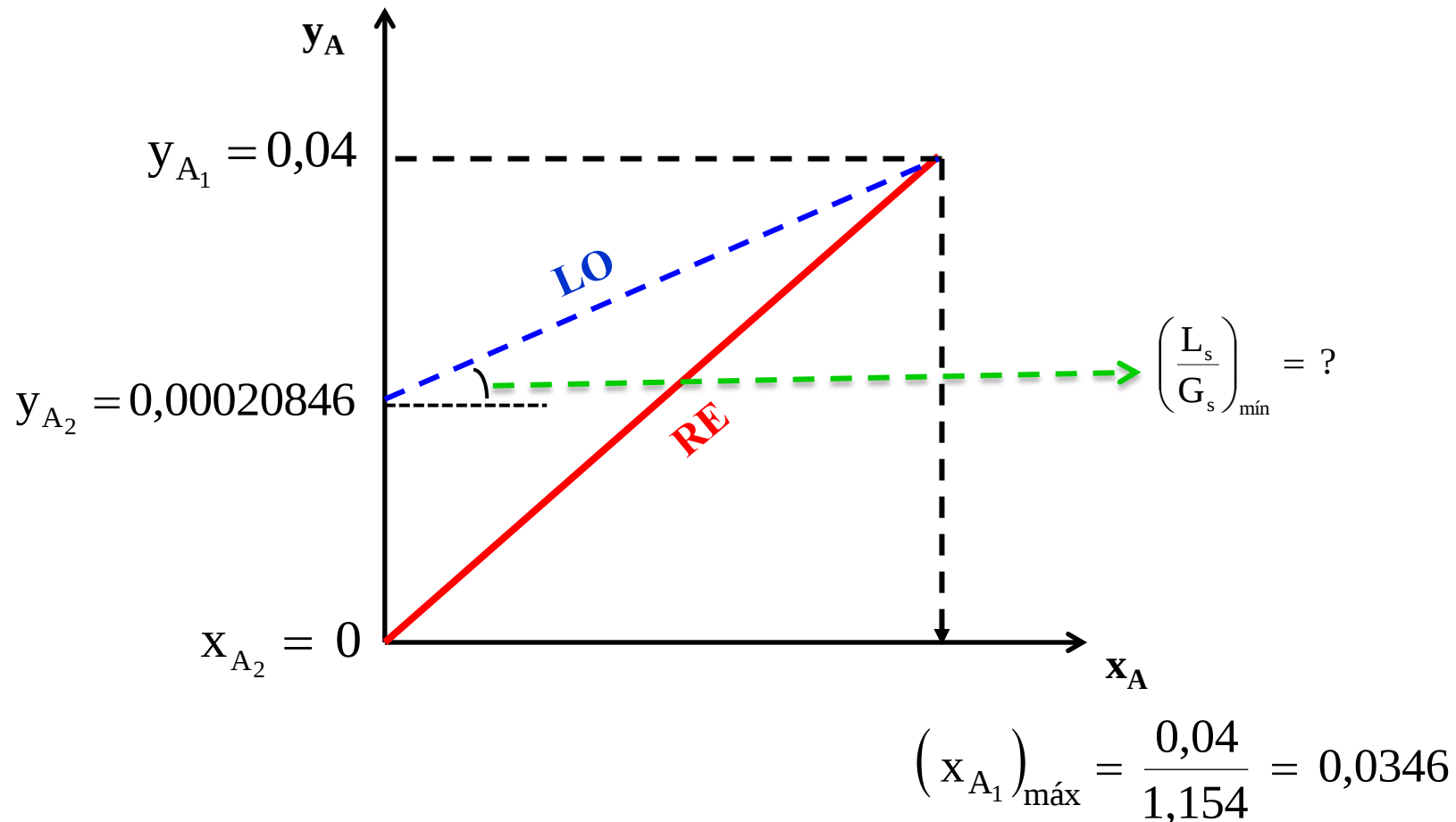
$$X_{A_1} = \frac{x_{A_1}}{1 - x_{A_1}}$$



$$(X_{A_1})_{\text{máx}} = \frac{0,0346}{1 - 0,0346}$$

$$(X_{A_1})_{\text{máx}} = 0,0358$$

Determinação do $(x_{A1})_{\text{máx}}$ utilizando a reta de equilíbrio (RE) e a linha de operação (LO)



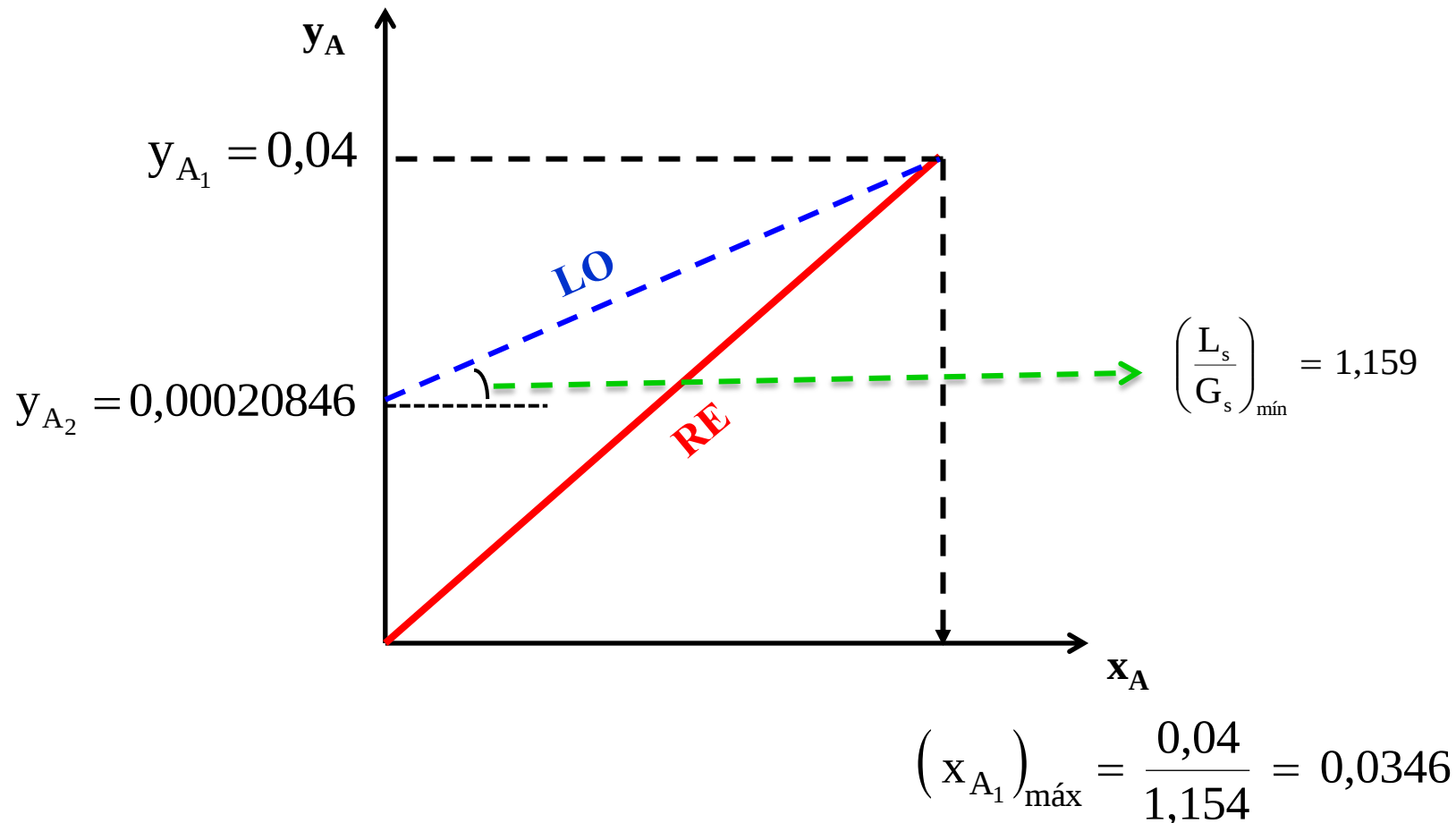
$$\left(\frac{L_s}{G_s}\right)_{\text{mín}} = \frac{Y_{A_1} - Y_{A_2}}{\left(X_{A_1}\right)_{\text{máx}} - X_{A_2}} = \frac{\Delta Y_A}{\Delta X_A} \text{ (diluída)}$$

$$\left(\frac{L_s}{G_s}\right)_{\text{mín}} = \frac{Y_{A_1} - Y_{A_2}}{\left(X_{A_1}\right)_{\text{máx}} - X_{A_2}} = \frac{0,0417 - 2,0846 \times 10^{-4}}{\left(X_{A_1}\right)_{\text{máx}} - 0}$$

$$\left(\frac{L_s}{G_s}\right)_{\text{mín}} = \frac{0,0417 - 2,0846 \times 10^{-4}}{0,0358 - 0}$$

$$\left(\frac{L_s}{G_s}\right)_{\text{mín}} = 1,159$$

Neste caso, tanto a reta de equilíbrio (RE) como a linha de operação (LO) são retas, de modo que não será necessário traçar diagramas de escala.



A relação a empregar é de 40% maior em relação a mínima, portanto:

$$\left(\frac{L_s}{G_s} \right)_{\text{real}} = 1,4(1,159) = 1,6226 \text{ kmol de água / kmol de ar}$$

(a) Consumo de água ($\rho_{\text{água}} \approx 10^3 \text{ kg/m}^3$ a 28°C)

O gás (ar) isento de soluto corresponde a 96% do total, portanto a quantidade de água a ser alimentada na coluna será:

$$L_s = \underbrace{(0,96)(200 \text{ kmol de gás/h})}_{\text{kmol de ar}} (1,6226 \text{ kmol de água / kmol de ar})$$

$$L_s = 311,54 \text{ kmol de água/h} \left(\frac{18 \text{ kg/kmol}}{1000 \text{ kg/m}^3} \right)$$

$$L_s = 5,608 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (vazão volumétrica)}$$

(b) Altura da torre, Z

Para operação em *contracorrente*, temos as seguintes equações:

$$z = (AUT)(NUT) \quad (56)$$

$$AUT = \frac{G_s}{K_y a} = 0,52m \quad (52)$$

$$NUT = \frac{1}{(1-1/A)} \ln \left[\frac{Y_{A_1} - mX_{A_2}}{Y_{A_2} - mX_{A_2}} (1-1/A) + 1/A \right] \quad (62)$$

$$A = \frac{L_s}{mG_s} \quad (60)$$

Cálculo do NUT:

$$Y_{A_1} = 0,0417 \quad Y_{A_2} = 2,085 \times 10^{-4} \quad X_{A_2} = 0 \quad m = 1,159$$

$$\left(\frac{L_s}{G_s} \right)_{\text{real}} = 1,6226 \text{ kmol de água/kmol de ar}$$

$$A = \frac{L_s}{mG_s} = \frac{1}{1,154} (1,6226) = 1,4061$$

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

$$\text{NUT} = \frac{1}{(1 - 1/1,4061)} \ln \left[\frac{0,0417}{0,0002085} (1 - 1/1,4061) + 1/1,4061 \right]$$

$$\text{NUT} = 3,4624 \ln[(200)(0,2888) + 0,7112]$$

$$\text{NUT} = 3,4624 \ln[50,4712]$$

$$\text{NUT} = 13,58$$

$$z = (\text{AUT})(\text{NUT}) = (0,52\text{m})(13,58)$$

$$z = 7,06 \text{ m}$$

Exemplo 03: A lavagem de uma mistura de ar e amônia contendo 2% de NH_3 a 20°C e 1 atm será realizada numa torre com recheios de anéis Raschig de cerâmica de 1in. As vazões de água e gás serão ambas iguais a 1170 kg/h.m^2 no topo e na base da torre, respectivamente. A operação será realizada a 20°C , temperatura para a qual a relação de equilíbrio em termos de pressão parcial de NH_3 , p em mmHg, sobre soluções aquosas de concentração $\rho \text{ kg NH}_3/100 \text{ kg H}_2\text{O}$ é dado pela tabela:

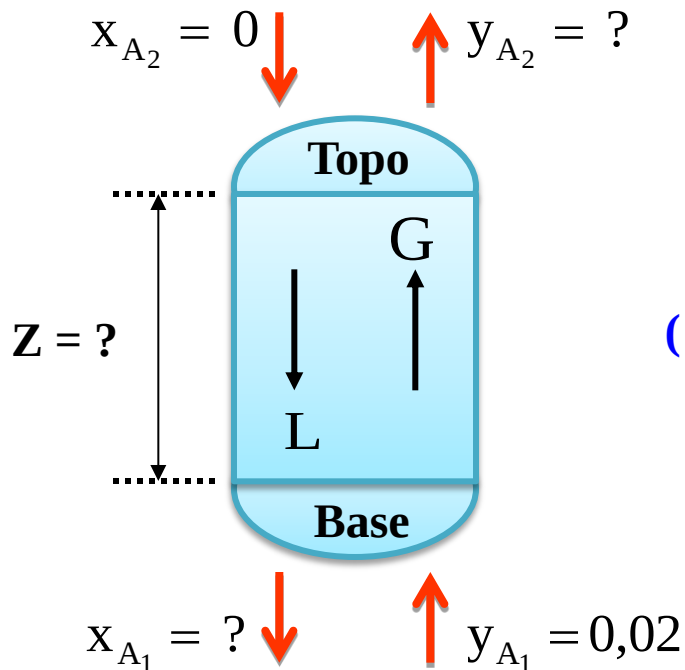
$\rho \text{ (kg NH}_3/100 \text{ kg H}_2\text{O)}$	2,0	3,0	5,0	7,5	10	20
$p \text{ (mmHg)}$	12,0	18,2	31,7	50,0	69,6	166

O valor do coeficiente de capacidade K_G foi obtido como sendo igual a $62,4 \text{ kmol/h.m}^3$ para este recheio e nas condições de operação especificadas.

Pede-se a altura do recheio “z” necessário para absorver 98% de NH_3 existente no gás alimentado.

Dado: $M_{\text{ar}} = 29 \text{ kg/kmol}$; $M_{\text{NH}_3} = 17 \text{ kg/kmol}$

Solução: Trata-se de uma mistura diluída, e para um sistema contracorrente $G \rightarrow L$, temos:



(Método Gráfico)

(Método Analítico)

(fator de absorção)

Equações:

$$Z = (AUT)(NUT)$$

$$NUT = \int_{Y_{A_2}}^{Y_{A_1}} \frac{dY_A}{(Y_A - Y_A^*)}$$

$$AUT = \frac{G_s}{K_Y a}$$

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

$$A = \frac{L_s}{mG_s}$$

Método Gráfico

$$y_{A_1} = 0,02$$

$$Y_{A_1} = \frac{y_{A_1}}{1 - y_{A_1}} = \frac{0,02}{1 - 0,02}$$

$$Y_{A_1} = 0,02041$$

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

$$98\% = \left(\frac{0,02041 - Y_{A_2}}{0,02041} \right) 100\%$$

$$Y_{A_2} = 4,082 \times 10^{-4}$$

$$Y_{A_2} = \frac{y_{A_2}}{1 - y_{A_2}} \rightarrow y_{A_2} = \frac{Y_{A_2}}{1 + Y_{A_2}}$$

$$y_{A_2} = \frac{Y_{A_2}}{1 + Y_{A_2}} = \frac{0,0004082}{1 + 0,0004082}$$

$$y_{A_2} = 0,000408$$

$$L_S = \frac{1170 \text{ kg/h.m}^2}{\underbrace{18 \text{ kg/kmol}}_{\text{H}_2\text{O}}}$$

$$L_S = 65 \text{ kmol/h.m}^2$$

$$G_S = \frac{(1 - 0,02)(1170 \text{ kg/h.m}^2)}{\underbrace{29 \text{ kg/kmol}}_{\text{Ar}}}$$

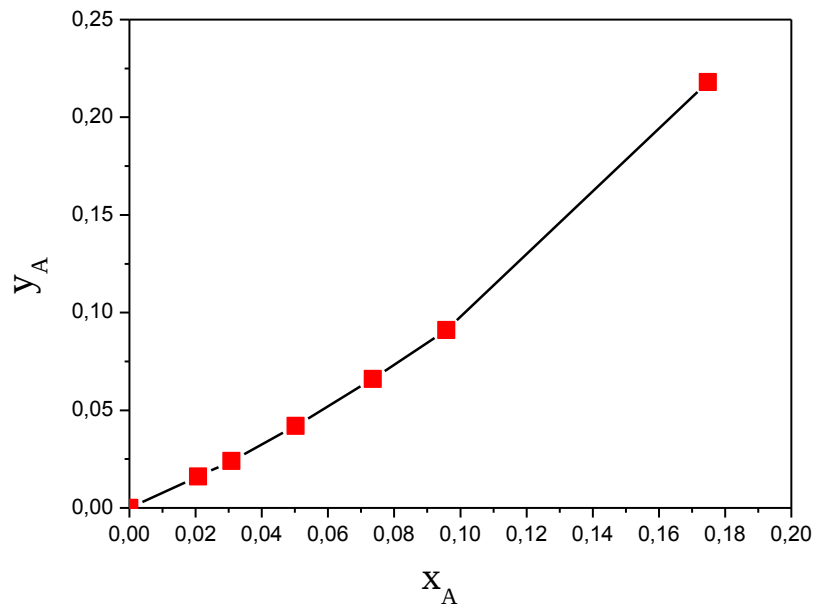
$$G_S = 39,54 \text{ kmol/h.m}^2$$

$$y_A = \frac{p_A}{P} = \frac{p_A \text{ mmHg}}{760 \text{ mmHg}} \quad (\text{lei de Dalton})$$

$$X_A = \frac{X_A}{1 + X_A}$$

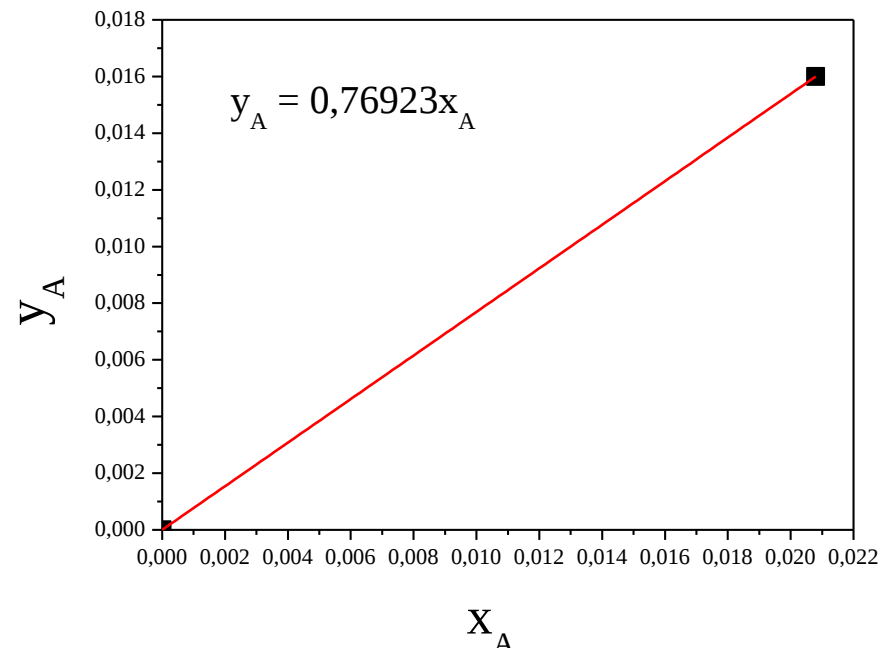
$$X_A = \frac{\text{Kmol A}}{\text{Kmol B}} = \frac{\frac{\rho_A \text{ Kg NH}_3}{17 \text{ Kg/Kmol}}}{\frac{100 \text{ Kg de H}_2\text{O}}{18 \text{ Kg/Kmol}}} = \rho_A (0,01059) \text{ Kmole NH}_3 / \text{Kmole H}_2\text{O}$$

P_A (mmHg)	y_A	ρ_A (kg NH ₃ /100 kg H ₂ O)	X_A (Kmol A/Kmol B)	x_A
0	0	0	0	0
12	0,016	2	0,0212	0,0208
18,2	0,024	3	0,0318	0,0308
31,7	0,042	5	0,0529	0,0502
50	0,066	7,5	0,0794	0,0736
69,6	0,091	10	0,1059	0,0958
166	0,218	20	0,2118	0,1748



Curva de equilíbrio para solução concentrada

Reta de equilíbrio para solução diluída



$$\frac{L_s}{G_s} = \frac{Y_{A_1} - Y_{A_2}}{X_{A_1} - X_{A_2}} \quad X_{A_2} = 0 \quad Y_{A_1} = 0,02041 \quad Y_{A_2} = 0,0004082$$

$$\frac{65}{39,54} = 1,6439 = \frac{0,02041 - 0,0004082}{X_{A_1} - 0}$$

$$X_{A_1} = 0,01217 \text{ kmol de NH}_3/\text{kmol de H}_2\text{O}$$

A concentração máxima de NH₃ absorvida na água é:

$$\rho_{A_1} = \frac{0,01217 \text{ kmol NH}_3 (17 \text{ kg/kmol})}{100 \text{ kmol H}_2\text{O} (18 \text{ kg/kmol})}$$

$$\rho_{A_1} = 0,0114 \text{ kg NH}_3/100 \text{ kg H}_2\text{O}$$

A pressão máxima do gás para $y_{A_1} = 0,02$ (2% de NH₃) é:

$$p_{A_1} = y_{A_1} P = 0,02(760 \text{ mmHg})$$

$$p_{A_1} = 15,2 \text{ mmHg}$$

A lei de Henry é aplicável no intervalo de concentração envolvido:

$$p_A = Hx_A = H \frac{C_A}{C} = \frac{H}{C} \frac{\rho_A}{M_A} = H^* \rho_A \quad (\text{lei de Henry})$$

$$p_A = H^* \rho_A \quad (\text{lei de Henry}) \quad ; \quad H^* = \frac{H}{CM_A} \quad ; \quad C_A = \frac{\rho_A}{M_A} \quad ; \quad M_A = 17 \text{ kg/kmol (NH}_3\text{)}$$

$$\frac{p_A}{P} = \frac{H^*}{P} \frac{\rho_A}{17} 17 \frac{\left(\frac{\rho_A}{17} + \frac{100}{18} \right)}{\left(\frac{\rho_A}{17} + \frac{100}{18} \right)}$$

$$m = \frac{17H^* \left(\frac{\rho_A}{17} + \frac{100}{18} \right)}{P} \quad ; \quad x_A = \frac{\frac{\rho_A}{17}}{\left(\frac{\rho_A}{17} + \frac{100}{18} \right)} = \frac{C_A}{C}$$

$$y_A^* = mx_A$$

Calculando o valor de m com o primeiro par de valores da tabela (região diluída), resulta:

$$p_A = H^* \rho_A$$

$$H^* = \frac{p_A}{\rho_A} = \frac{12}{2} = 6$$

$$m = \frac{17H^* \left(\frac{\rho_A}{17} + \frac{100}{18} \right)}{P}$$

$$m = \frac{17(6) \left(\frac{2}{17} + \frac{100}{18} \right)}{760}$$

$$m = 0,761$$

$$y_A^* = 0,761x_A$$

$$y_A^* = 0,761x_A \Rightarrow Y_A^* = 0,761X_A \text{ (diluição extrema)}$$

$X_A = f(Y_A)$ na reta de operação

Reta ou Linha de operação

$X_A = f(Y_A)$ na reta de operação

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

$$1,6439 = \frac{Y_A - 4,082 \times 10^{-4}}{X_A - 0}$$

$$X_A = \frac{Y_A - 4,082 \times 10^{-4}}{1,6439}$$

$$X_A = 0,60831 Y_A - 2,483 \times 10^{-4}$$

$$Y_A^* = 0,761 X_A$$

$$Y_A^* = 0,761(0,60831 Y_A - 2,483 \times 10^{-4})$$

$$Y_A^* = 0,4629 Y_A - 1,89 \times 10^{-4}$$

Cálculo do AUT:

$$AUT = \frac{G_s}{K_Y a} = \frac{39,54 \text{ kmol/h.m}^2}{62,4 \text{ kmol/h.m}^3}$$

$$AUT = 0,63 \text{ m}$$

Cálculo do fator de absorção:

$$A = \frac{L_s}{m G_s} = \frac{1}{0,761} (1,6439)$$

$$A = 2,16$$

Cálculo do NUT:

$$Y_A^* = 0,4629Y_A - 1,89 \times 10^{-4}$$

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

$$NUT = \int_{Y_{A2}}^{Y_{A1}} \frac{dY_A}{(Y_A - 0,4629Y_A + 1,89 \times 10^{-4})}$$

$$NUT = \int_{Y_{A2}}^{Y_{A1}} \frac{dY_A}{(0,5371Y_A + 1,89 \times 10^{-4})}$$

$$NUT = \frac{1}{0,5371} \left[\ln(0,5371Y_A + 1,89 \times 10^{-4}) \right]_{Y_{A2} = 4,1 \times 10^{-4}}^{Y_{A1} = 0,02041}$$

$$NUT = \frac{1}{0,5371} \left[\ln \left(\frac{(0,5371)0,02041 + 1,89 \times 10^{-4}}{(0,5371)4,1 \times 10^{-4} + 1,89 \times 10^{-4}} \right) \right]$$

$$NUT = \frac{1}{0,5371} \left[\ln \left(\frac{0,0112}{4,0921 \times 10^{-4}} \right) \right] = \frac{1}{0,5371} [\ln(27,37)]$$

$$NUT = 6,2$$

Cálculo da altura da coluna:

$$AUT = 0,63 \text{ m}$$

$$Z = (AUT)(NUT)$$

$$Z = (0,63 \text{ m})(6,2)$$

$$Z = 3,91 \text{ m}$$

Método Analítico

Cálculo do AUT:

$$AUT = \frac{G_s}{K_Y a} = \frac{39,54 \text{ kmol/h.m}^2}{62,4 \text{ kmol/h.m}^3}$$

$$AUT = 0,63 \text{ m}$$

Cálculo do NUT:

$$A = \frac{L_s}{mG_s} = \frac{1,6439}{0,761}$$

$$A = 2,16$$

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

$$NUT = \frac{1}{(1-1/2,16)} \ln \left[\frac{0,02041-0}{0,0004082-0} (1-1/2,16) + 1/2,16 \right]$$

$$NUT = 1,8621 \ln [50(0,537) + 0,463]$$

$$NUT = 1,8621 \ln [27,313]$$

$$NUT = 6,16$$

Cálculo da altura da coluna:

$$z = (AUT)(NUT) = (0,63 \text{ m})(6,16) = 3,9 \text{ m}$$