

ABSORÇÃO EM COLUNAS DE RECHEIO E DE PRATOS: METODOLOGIAS ALTERNATIVAS AOS MÉTODOS GRÁFICOS TRADICIONAIS

Oswaldo Curty da Motta Lima – oswaldo@deq.uem.br

Giovani Pissinati Menoci – g_menoci@hotmail.com

Maria Angélica Simões Dornellas de Barros – angelica@deq.uem.br

Sérgio Henrique Bernardo de Faria – sergio@deq.uem.br

Universidade Estadual de Maringá – Departamento de Engenharia Química

Avenida Colombo 5790, Bloco D-90, 87020-900 – Maringá, PR

***Resumo:** A absorção de gases é uma operação unitária muito usada em indústrias químicas, sendo normalmente utilizados dois tipos de equipamentos: colunas de recheio em leito fixo e colunas de pratos, semelhantes às de destilação. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo a implementação de metodologias alternativas aos métodos gráficos para o cálculo/análise da absorção a três componentes, em ambas as colunas, reduzindo o tempo gasto nas etapas envolvidas. Este trabalho traz uma proposta de utilização do EXCEL na viabilização das metodologias propostas para colunas de recheio e colunas de pratos, além de permitir a comparação entre os dois tipos de colunas (por exemplo, pela análise da altura equivalente a um prato teórico). A utilização do programa EXCEL permitiria a exploração de um maior número de situações pelo professor em sala de aula, uma melhor fixação do assunto e uma maior capacidade de ação dos futuros engenheiros ao enfrentar novos problemas.*

***Palavras-chave:** Absorção, Colunas recheadas, Estágios de equilíbrio, EXCEL*

1. INTRODUÇÃO

A absorção de gases é uma operação unitária muito usada em plantas industriais da área química, e se baseia na separação de um ou mais componentes de uma mistura gasosa pela ação de um solvente líquido seletivo, a partir das diferenças de concentração e solubilidade entre as fases envolvidas.

Para que isto ocorra, é importante que o solvente e a mistura original entrem em contato por um tempo suficiente para a absorção da(s) substância(s) que se deseja separar. Deste modo, e face à diferença de densidade entre as fases líquida e gasosa, se faz necessária a utilização de dispositivos de contato que obriguem as fases a interagirem adequadamente.

Industrialmente, são normalmente usados dois tipos de colunas de absorção: as que possuem no seu interior um leito de um material sólido inerte por onde as fases percolam - colunas de recheio, e colunas de pratos/estágios, semelhantes às utilizadas em destilação.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo a implementação de metodologias alternativas aos métodos gráficos usuais para o cálculo/análise de processos de absorção a três componentes (gás, soluto e solvente), em ambos os tipos de colunas, procurando reduzir o tempo gasto nas etapas envolvidas. Desta forma, os conceitos discutidos em sala de aula poderiam ser melhor trabalhados em um tempo menor.

Sendo assim, este trabalho apresenta uma proposta de utilização do software EXCEL na viabilização das metodologias propostas para colunas de recheio - relações de equilíbrio linear e não-linear -, e para colunas de pratos/estágios - considerando, inclusive, o conceito de eficiência dos estágios de separação -, além de permitir uma comparação entre os dois tipos de colunas (como, por exemplo, a partir da análise da altura equivalente a um prato teórico, AEPT/“HETP”).

A utilização do software EXCEL permitiria a exploração de um maior número de situações pelo professor em sala de aula, proporcionando aos alunos uma melhor fixação do assunto e uma maior capacidade de ação dos futuros engenheiros ao enfrentar novos problemas.

2. ABSORÇÃO CONTRACORRENTE EM COLUNAS DE RECHEIO

A Figura 1 apresenta um esquema típico para a absorção contracorrente em coluna de recheio.

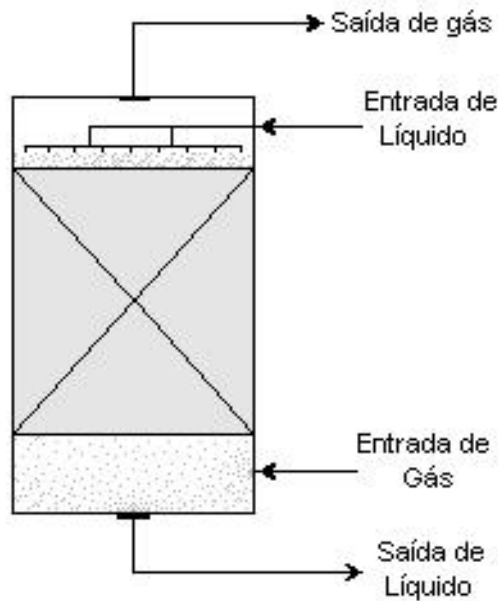


Figura 1 - Absorção em coluna de recheio

Para a operação em regime permanente, as seguintes expressões para as fases gás e líquido podem ser obtidas a partir de um balanço de massa na coluna (Motta Lima e Müller, 2003):

$$G_S \frac{dX}{dz} = k_G a (Y - Y_{eq}) = k_L a (X_{eq} - X) \quad (1)$$

$$L_S \frac{dY}{dz} = k_L a (X_{eq} - X) = k_G a (Y - Y_{eq}) \quad (2)$$

em que k_{La} e k_{Ga} são os coeficientes globais de transferência de massa, fases líquido e gás.

Integrando-se estas expressões, têm-se, para as fases líquido e gás, as seguintes equações:

$$z = \int_0^z dz = \frac{G_S}{k_G a} - \int_{Y_2}^{Y_1} \frac{dY}{Y - Y_{eq}} = H_{OG} N_{OG} \quad (3)$$

$$z = \int_0^z dz = \frac{L_M}{k_L a} - \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{X_{eq} - X} = H_{OL} N_{OL} \quad (4)$$

Na absorção contracorrente, o balanço de massa global para o soluto, é representado pela Equação 5, enquanto que o balanço entre uma seção qualquer da coluna e sua extremidade 1 (inferior), Equação 6, irá representar a equação da *reta de operação da coluna*.

$$G_s(Y_1 - Y_2) = L_s(X_1 - X_2) \quad (5)$$

$$G_s(Y_1 - Y) = L_s(X_1 - X) \quad (6)$$

Na Figura 2, é mostrada a localização da reta de operação e identificada a força motriz do processo de transferência, utilizada para a determinação do N_{OG} . A distância vertical entre a linha de operação e a curva de equilíbrio, $(Y - Y_{eq})$, representa a força motriz do processo e pode ser calculada para cada valor de Y . Para calcular N_{OG} , é plotado o inverso desta força motriz contra Y e integra-se a área sob a curva, Figura 3.

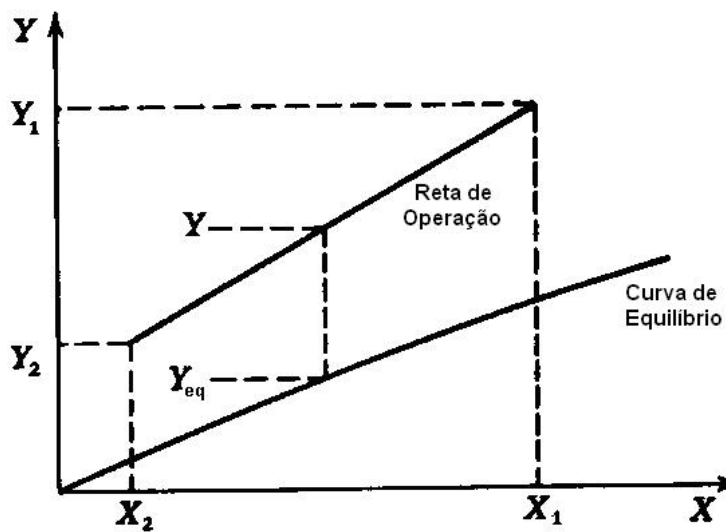


Figura 2 - Representação da diferença global $(Y - Y_{eq})$ para o processo de transferência

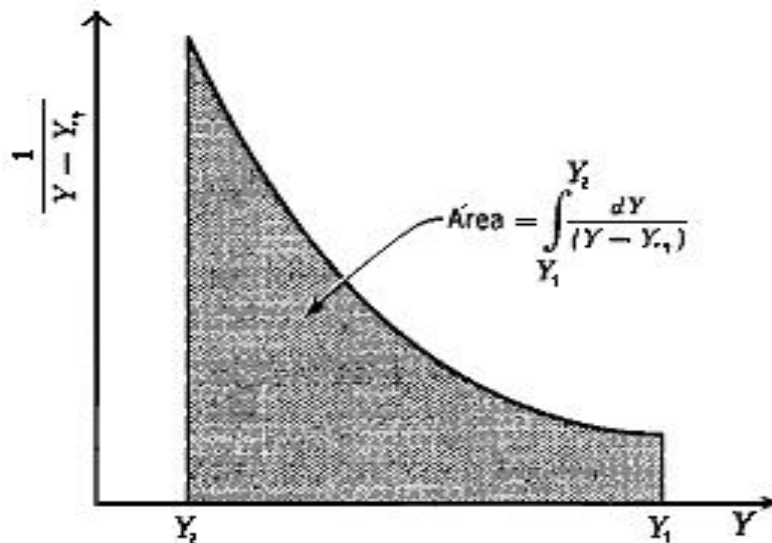


Figura 3 - Determinação gráfica de N_{OG}

A determinação de N_{OG} pode ser facilitada quando a relação (curva) de equilíbrio do sistema for linear, Tabela 1.

Tabela 1 - Equações de N_{OG} : Relação de equilíbrio linear (Motta Lima e Muller, 2003)

Curva de Equilíbrio	N_{OG}
$Y_{eq} = mX + c$	$\frac{Y_1 - Y_2}{(Y - Y_{eq})_{Ln}}$
$Y_{eq} = mX \quad \& \quad X_2 = 0$	$\frac{1}{1 - \frac{mG_s}{L_s}} \ln \left[\left(\frac{Y_1}{Y_2} \right) \left(1 - \frac{mG_s}{L_s} \right) + \frac{mG_s}{L_s} \right]$
$Y_{eq} = mX \quad \& \quad X_2 \neq 0$	$\frac{1}{1 - \frac{mG_s}{L_s}} \ln \left[\left(\frac{Y_1 - mX_2}{Y_2 - mX_2} \right) \left(1 - \frac{mG_s}{L_s} \right) + \frac{mG_s}{L_s} \right]$

Para a determinação da vazão molar de solvente na fase líquido, conhecendo-se a vazão molar de gás, pode-se utilizar, a partir de um conjunto de critérios definidos por diferentes autores, o que melhor se adapta ao sistema analisado (Motta Lima e Müller, 2003).

3. ABSORÇÃO CONTRACORRENTE EM ESTÁGIOS DE EQUILÍBRIO

A Figura 4 apresenta um esquema típico para a absorção contracorrente em estágios de equilíbrio.

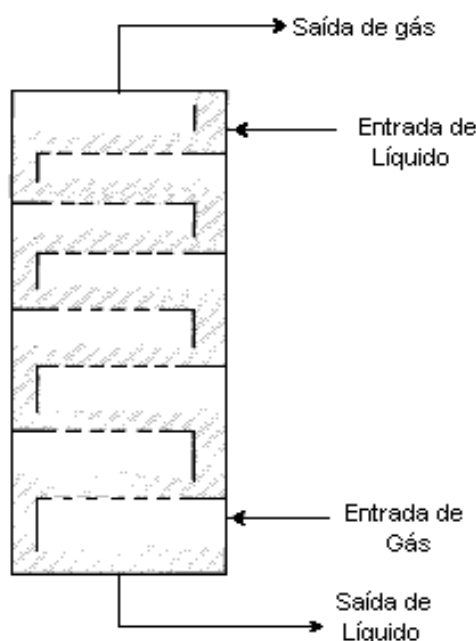


Figura 4 - Coluna de absorção de pratos

Existem vários métodos de cálculo para a determinação do número de estágios ideais para colunas de absorção (Kremser, 1930 ; Souders e Brown, 1932 ; Chen, 1964 ; Souders, 1964); entretanto, estes métodos são trabalhosos.

A metodologia gráfica tradicional, Figura 5, é demorada e cansativa, especialmente quando muitos pratos são necessários. Além disso, a determinação dos estágios nas extremidades das curvas é impraticável, a não ser que estas regiões sejam significativamente ampliadas; no entanto, este procedimento aumenta a imprecisão dos resultados obtidos. Outros métodos gráficos para esta situação, como o uso de escalas logarítmicas (Robinson e Gilliland, 1957; Horvath e Schubert, 1958) ou de probabilidades (Lowenstein, 1962), são demorados.

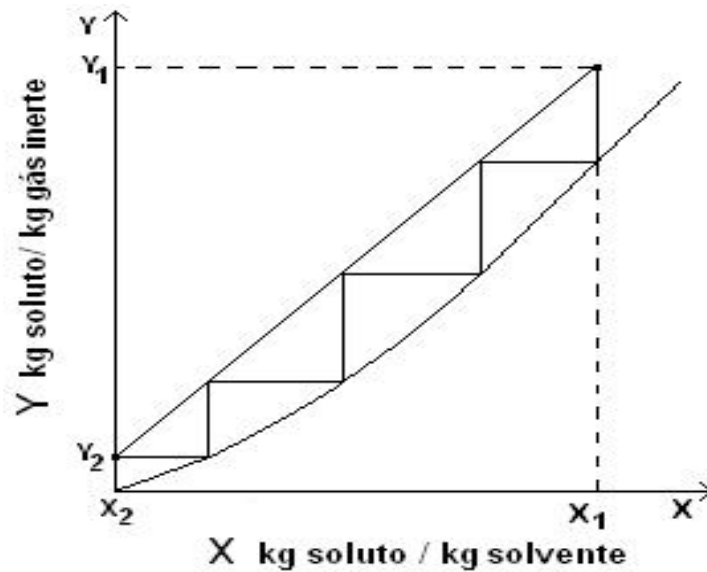


Figura 5 - Absorção em estágios de equilíbrio

Neste contexto, este trabalho pretende utilizar a metodologia alternativa ao método gráfico usual apresentada por Motta Lima *et al.* (2005), baseada no trabalho de Nguyen (1979), que desenvolveu um conjunto de equações simplificadas para o cálculo do número de pratos reais de absorvedores e “*strippers*”, usando a eficiência de estágios de Murphree, e considerando as *fases diluídas* e as *vazões de gás e líquido constantes*. As composições das fases (ideais e reais) também podem ser determinadas prato a prato (Motta Lima *et al.*, 2005).

Tendo em vista as simplifica anteriores, as equações propostas por Nguyen (1979) podem ser aplicadas diretamente, se considerarmos as vazões constantes e composições (razões molares) com base nos respectivos inertes.

Desta forma, são apresentadas, a seguir, para as fases gás/líquido, as principais equações da metodologia utilizada (Motta Lima *et al.*, 2005).

3.1 Equações para a Fase Gás

$$(\beta_v)^n = \frac{Y_1 + \alpha}{Y_n + \alpha} \quad ; \quad \beta_v = \frac{1}{1 + E_v \left(\frac{mG_s}{L_s} - 1 \right)} \quad (7,8)$$

$$\alpha = \frac{Y_2 - \left(\frac{L_s}{mG_s} \right) (mX_2 + c)}{\left(\frac{L_s}{mG_s} \right) - 1} \quad (9)$$

β_v na Equação 7 pode ser definido como um fator de absorção modificado. Assim, quando $E_v = 1$, $\beta_v = L/mG = \lambda$, fator de absorção, e, neste caso, a Equação 7 se reduz a equação de Chen (1964), para o cálculo do número de estágios teóricos na absorção. Para o cálculo do número de pratos reais (n) e do número de pratos ideais (n'), a Equação 7 é rearranjada:

$$n = \frac{\ln \left[\frac{Y_1 + \alpha}{Y_n + \alpha} \right]}{\ln \beta_v} \quad ; \quad n' = \frac{\ln \left[\frac{Y_1 + \alpha}{Y_n + \alpha} \right]}{\ln \lambda} \quad (10,11)$$

A eficiência global, E^0 , é calculada pela Equação 12, também citada por Treybal (1955).

$$E^0 = \frac{n'}{n} = \frac{\ln \beta_V}{\ln \lambda} = \frac{\ln \left[1 + E_V \left(\frac{mGs}{Ls} - 1 \right) \right]}{\ln \left(\frac{mGs}{Ls} \right)} \quad (12)$$

3.2 Equações para a Fase Líquida

$$(\beta_L)^n = \frac{X_n + \alpha'}{X_2 + \alpha'} \quad ; \quad \beta_L = 1 + E_V \left(\frac{Ls}{mGs} - 1 \right) \quad (13,14)$$

$$\alpha' = \frac{X_1 - \left(\frac{Gs}{Ls} \right) (Y_1 - c)}{\left(\frac{mGs}{Ls} \right) - 1} \quad ; \quad n' = \frac{\ln \left(\frac{X_n + \alpha'}{X_2 + \alpha'} \right)}{\ln \lambda} \quad ; \quad n = \frac{\ln \left(\frac{X_n + \alpha'}{X_2 + \alpha'} \right)}{\ln \beta_L} \quad (15,16,17)$$

Para a eficiência global, E^0 :

$$E^0 = \frac{n'}{n} = \frac{\ln \beta_L}{\ln \lambda} = \frac{\ln \left[1 + E_V \left(\frac{Ls}{mGs} - 1 \right) \right]}{\ln \left(\frac{Ls}{mGs} \right)} \quad (18)$$

As Equações 12 e 18 levam a uma relação entre E_L e E_V (Smith, 1963):

$$E_V = \frac{\lambda E_L}{1 + E_L(\lambda - 1)} \quad ; \quad E_L = \frac{E_V}{E_V + \lambda(1 - E_V)} \quad (19,20)$$

4. UTILIZAÇÃO DO EXCEL COMO FERRAMENTA COMPUTACIONAL

Na Figura 6, é mostrada a implementação no programa EXCEL das metodologias propostas. As células amarelas correspondem aos dados de entrada - dados de equilíbrio do sistema (razão molar), especificações do problema (vazões, concentrações, etc.). As células azuis, aos dados de saída (calculados), e as células verdes, ao cálculo dos valores das alturas equivalentes a um prato teórico e real (HETP).

Considerando comportamento linear para os dados de equilíbrio, estes são ajustados pelos modelos M1 e M2, a partir do uso da ferramenta SOLVER, por meio do botão "AJUSTAR", com base na minimização do somatório dos erros quadrados (células D22 e E22), de modo a obter os coeficientes dos modelos/retas M1 e M2 (células C24, E24 e C26).

Os botões "AJUSTAR Y2" e "AJUSTAR X1" calculam, respectivamente, os valores de Y2 e de X1 que ajustam o balanço de massa do problema, dependendo das necessidades do usuário. Devem ser acionados sempre que houver alteração nos dados do balanço de massa (→ célula H17 não estiver indicando "OK").

Paralelamente, para a coluna de recheio, é feita a solução numérica do cálculo da área da Figura 5 (ver colunas M:8-21 e P:8-21) por meio da regra do trapézio diretamente a partir dos dados de equilíbrio (N:8-21 e O:8-21) e da reta de operação da coluna (Equação 6), linha 4:M-Q, para a determinação do NOG (Σ coluna Q:8-21 = célula Q22).

A Figura 6 apresenta um exemplo do uso da planilha, para um sistema Ar-NH₃-H₂O a 1 atm e 25°C (Motta Lima e Müller, 2003), em que podem ser observados os seguintes aspectos:

- os modelos M1 e M2 ajustaram bem os dados de equilíbrio, com melhor desempenho do M1, levando a resultados diferentes para a altura do recheio e para o número de pratos da coluna ;
- no entanto, os valores de HETP obtidos se mostraram pouco sensíveis às diferenças de ajuste entre os modelos M1 e M2, para diferentes dados de entrada (desvios $\approx 1\%$) ;
- quanto à solução numérica, o resultado de NOG ficou próximo da média para os modelos M1 e M2, porém levando a valores diferentes de HETP, em função do diferentes valores obtidos para os pratos teóricos pelos modelos lineares, mas com desvios aceitáveis (- 4,5%, para M1 e 12,2%, para M2).

Cabe ressaltar que, para o sistema estudado, o ajuste linear representa muito bem os dados de equilíbrio, e que o desempenho da solução numérica melhora à medida que se tem um maior número de dados na região (faixa de concentração) de interesse da curva de equilíbrio.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q		
1	Absorção em Colunas de Recheio e Pratos										Solução Numérica							
2																		
3	Considerações: - curvas de equilíbrio lineares (modelos M1 & M2)																	
4	- vazões molares contantes e sistemas diluídos										Reta Op: $Y = 1,0831 \cdot X + 0,0131$							
5	- vazões molares em base de inertes e razões molares																	
6																		
7																		
8	Dados de Equilíbrio				Erro Modelo		X1: 0,0216		Resultados				Yrop		X	Yeq	1/(Y-Yeq)	Intg1
9	Xe	Ye	1	2	Y1: 0,0365		modelo M1				Y2>>		0,0131	0,0000	0,0000	76,3086	0,0000	
10	0,0000	0,0000	5,859E-06	0	Gs: 3,85		Lambda: 0,9810				0,0131		0,0000	0,0000	76,3086	0,7619		
11	0,0085	0,0111	4,978E-07	1,601E-06	Ls: 4,17		Alfa: -0,5642				0,0223		0,0085	0,0111	89,1968	0,2264		
12	0,0108	0,0140	1,19E-07	2,262E-06	Y2: 0,0131		Betav: 0,9847				0,0248		0,0108	0,0140	92,5726	0,5881		
13	0,0164	0,0210	2,227E-07	4,099E-06	X2: 0,0000		Nº pratos - ideal: 2,2592				0,0309		0,0164	0,0210	101,3398	0,5606		
14	0,0252	0,0320	3,083E-06	8,08E-06	kga: 1,50		Nº pratos - real: 2,8186				0,0365		0,0216	0,0263	97,7464	0,0000		
15	0,0280	0,0345	1,355E-06	4,422E-06	Ev - Efic. prato 0,80						0,0365		0,0216	0,0263	0,0000	0,0000		
16	0,0349	0,0420	1,094E-06	2,622E-06	Balanco: OK		modelo M2				0,0365		0,0216	0,0263	0,0000	0,0000		
17	0,0401	0,0479	1,451E-06	2,258E-06	erro: 2E-34		Lambda: 0,9361				0,0365		0,0216	0,0263	0,0000	0,0000		
18	0,0455	0,0530	1,171E-07	1,258E-07	AJUSTAR Y2		Alfa: -0,2051				0,0365		0,0216	0,0263	0,0000	0,0000		
19	0,0602	0,0685	1,507E-07	1,331E-06	AJUSTAR X1		Betav: 0,9482				0,0365		0,0216	0,0263	0,0000	0,0000		
20	0,0722	0,0800	4,569E-06	1,252E-05			Nº pratos - ideal: 1,9680				0,0365		0,0216	0,0263	0,0000			
21	-	-	0	0			Nº pratos - real: 2,4441				-		-	-				
22	Erro total: 1,852E-05				3,932E-05										Nog: 2,1370			
23																		
24	M1) Ye =		1,1041 Xe +		0,0024													
25																		
26	M2) Ye =		1,1570 Xe		nº pratos - ideal M1) Hetp: 2,5421		Considerando o n. de pratos reais de M2 como correto:											
27					nº pratos - ideal M2) Hetp: 2,4829													
28	AJUSTAR																	
29					nº pratos - real M1) Hetp: 2,0376		Intg1:		Nog		Hog		N. Pratos		Hetp			
30	M1) Nog =		2,2376		Hog = 2,5667		nº pratos - real M2) Hetp: 1,9992		2,1370		2,5667		2,4441		2,2442			
31																		
32	M2) Nog =		1,9038		Hog = 2,5667													
33																		

Figura 6 - Planilha EXCEL para Absorção em Colunas de Recheio e de Pratos

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pode-se observar que a metodologia didática apresentada neste trabalho conduz de forma efetiva à solução de problemas de absorção contracorrente em colunas de recheio e em estágios de equilíbrio. Além disso, sua aplicação via *software* EXCEL é de fácil implementação e manuseio para usuários que tenham alguma intimidade com este software (em função do SOLVER), permitindo a obtenção de resultados confiáveis para os cálculos envolvidos.

Quando as curvas de equilíbrio não forem lineares, as colunas podem ser consideradas compostas de várias seções curtas com curvas de equilíbrio lineares. Assim, as metodologias propostas podem ser utilizadas para o cálculo da altura de recheio e do número de pratos reais de cada seção, e o cálculo da altura da coluna de recheio e do número total de pratos da coluna será dado pelo somatório de cada seção.

Uma diferença/vantagem importante da programação em EXCEL, quando comparada a softwares equivalentes, está na facilidade com que o usuário, mesmo com pouca experiência no uso de planilhas eletrônicas e/ou programação, consegue interagir com o programa, podendo modificar, sem muita dificuldade, tanto a parte estética/visual, como os passos de programação, conforme seus gostos e/ou necessidades.

Finalmente, a utilização do EXCEL/ /SOLVER na implementação da metodologias propostas se mostrou uma ferramenta interessante, podendo contribuir de forma significativa para uma melhor fixação deste assunto e maior capacidade de ação dos futuros engenheiros, tanto em sala de aula, quanto, posteriormente, no exercício profissional.

NOMENCLATURA

Grandezas definidas com base nos seus inertes:

G_S - vazão de gás puro ; [moles/ $\theta \cdot L^2$]

L_S - vazão de solvente puro ; [moles/ $\theta \cdot L^2$]

X - razão molar de soluto no solvente

X_n - razão molar de soluto no prato n

X_2 - razão molar inicial de soluto no solvente

X_1 - razão molar final de soluto no solvente

Y - razão molar de soluto no gás

Y_{eq} - razão molar de equilíbrio no gás

Y_n - razão molar de soluto no prato n

Y_1 - razão molar inicial de soluto no gás

Y_2 - razão molar final de soluto no gás

c - coeficiente linear, curva de equilíbrio

E_V, E_L - eficiências de Murphree (gás/líquido)

E^0 - eficiência global

H_{OG} - altura de uma unidade de transferência global, fase gás ; [L]

H_{OL} - altura de uma unidade de transferência global, fase líquido ; [L]

k_{GA} - coeficiente global de transferência de massa, fase gás ; [moles/ $\theta \cdot L^3$]

k_{La} - coeficiente global de transferência de massa, fase líquido ; [moles/ $\theta \cdot L^3$]

m - inclinação da curva de equilíbrio

n - número de pratos reais

n' - número de estágios/pratos teóricos/ideais

N_{OG} - n° de unidades de transferência, fase gás

N_{OL} - n° de unidades de transferência, fase líquido

α, α' - definidos pelas Equações 9, 15

β_L, β_V - definidos pelas Equações 13/14 e 7/8

$\lambda = L/mG$

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHEN, N.H. Calculating actual plates in absorbers or strippers. **Chem. Eng.** v. 71, n. 10, May 11, p. 159, 1964.

- HORVATH, P.J. ; SCHUBERT, R.F. Find distillation stages graphically. **Chem. Eng.** v. 65, n. 3, February 10, p. 129, 1958.
- KRENSER, A. Theoretical analysis of the absorption process. **Nat. Petrol. News.** v. 22, n. 21, p. 48, 1930.
- LOWENSTEIN, J.G. Distillation column designing. **Ind. Eng. Chem.** v. 54, n. 1, p.61, 1962.
- MOTTA LIMA, O.C. ; MÜLLER, J.M. **Apostila de Absorção - Material Didático de Operações Unitárias II.** Edição Interna, Rede DEQ/UEM, Maringá-BR, 2003.
- MOTTA LIMA, O.C. ; MÜLLER, J.M. ; BARROS, M.A.S.D. ; OSTERLE, A.H., DIAS Jr., J.E. Plate columns absorption: alternative methodology to graphical methods. In: EMPROMER 2005, 8, 2005, Rio de Janeiro. **Proceedings (CDROM).** Rio de Janeiro: UFRJ, 2005.
- NGUYEN, H.X. Calculating Actual Plates in Absorbers and Strippers. **Chem. Eng.** April 9, p. 113, 1979.
- ROBINSON, C.S. ; GILLILAND, E.R. Find distillation stages graphically. **Chem. Eng.** v. 65, n. 3, February 10, p. 129, 1985.
- SMITH, B.D. **Design of Equilibrium Stage Processes.** New York: McGraw-Hill, 1963.
- SOUDERS, M. The countercurrent separation process. **Chem. Eng. Progr.** v. 60, n. 2, February, p. 75, 1964.

ABSORPTION IN PACKED AND PLATE COLUMNS: ALTERNATIVE METHODOLOGIES TO TRADITIONAL GRAPHICAL METHODS

Abstract: *Gas absorption is a very used unit operation in industrial plants, and two types of absorption columns (towers) are often used: packing/packed columns and plate/stage columns, similar to the distillation ones. Inside this context, this work intends to improve alternatives methodologies to the usual handmade graphical methods to reduce the time related to the design and analysis of absorption processes dealing with three components in both columns. Furthermore, the use of EXCEL is proposed for the suggested methodologies implementation for packing and stage towers, allowing, if desired, a match up between the two types of columns (for example, by an analysis of the height of an equivalent theoretical plate). With the use of the EXCEL program, classroom concepts and absorption problems could be better discussed and easily resolved by teachers and their students, and the work of future chemical engineers could be simplified when facing new problems.*

Key-words: *Absorption, Packing towers, Equilibrium stages, EXCEL*