

CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA SIMPLES E ECONÔMICO PARA O ESTUDO DA ABSORÇÃO REATIVA EM LABORATÓRIO

Fabio Fully,¹ Maria Betânia D’Henri,² José Joaquín Linares³

RESUMO

Este trabalho apresenta uma forma simples e econômica de montagem de uma coluna de absorção reativa usando materiais comumente encontrados no mercado. Processos dessa natureza são habitualmente usados na indústria química para o gerenciamento de poluentes (H_2S , CO_2 , COS , entre outros) presentes em correntes gasosas. A coluna permite pôr em contato, em contracorrente, uma corrente líquida descendente com um gás ascendente dentro de uma torre de recheio de anéis cerâmicos. Esse experimento tem sido utilizado pelos alunos dos cursos de Bacharel em Química Tecnológica e de Engenharia Química da Universidade de Brasília, como parte do processo formativo, por meio do estudo da remoção de dióxido de carbono com uma solução de hidróxido de sódio. Com esse sistema, é possível quantificar parâmetros importantes no desenho, tais como os coeficientes de transferência de massa do soluto gasoso na fase líquida para diferentes vazões de líquido circulante na coluna, permitindo correlacionar ambos os parâmetros.

Palavras-chave: Absorção reativa; coluna de recheio; remoção de poluentes; operações unitárias.

ABSTRACT

CONSTRUCTION OF A SIMPLE AND ECONOMICAL SYSTEM FOR THE STUDY OF CHEMICAL ABSORPTION IN LABORATORY

This paper presents a simple and economical way of assembling a reactive absorption column using materials commonly found in the market. Processes of this nature are widely used in the chemical industry for the management of pollutants (H_2S , CO_2 , COS among others) presents in gaseous streams. The column allows for counterflow contact between an upflow gas stream and a downflow liquid one within a packed tower of ceramic ring. The students of the Technological Chemistry and Chemical Engineering degrees have used this experiment as a part of the formation process, by the study of the removal of carbon dioxide with a sodium hydroxide solution. With this system is possible to quantify key design parameters such as the gaseous solute mass transfer coefficient in the liquid phase for different liquid flowrates in the column, allowing for correlating both parameters.

Keywords: Reactive absorption; packed column; pollutants removal; unit operations.

1 Graduando em Engenharia Química. Instituto de Química, Universidade de Brasília, *campus* Universitário Darcy Ribeiro, CP 4478, 70910-900 – Brasília (DF).

2 Bacharel em Química Industrial. Técnica do Laboratório de Química Tecnológica. Instituto de Química, Universidade de Brasília, *campus* Universitário Darcy Ribeiro, CP 4478, 70910-900 – Brasília (DF).

3 Engenheiro Químico. Professor da Divisão de Química Tecnológica. Instituto de Química, Universidade de Brasília, *campus* Universitário Darcy Ribeiro, CP 4478, 70910-900 – Brasília (DF).

INTRODUÇÃO

A operação unitária de absorção química é uma das mais utilizadas na indústria química. Basicamente, consiste no transporte de um ou vários solutos contidos em um gás transportador (insolúvel no líquido) até um líquido que contém um solvente apropriado (mínima volatilidade). As principais aplicações industriais dessa operação são a separação de gases, a remoção de poluentes (remoção de gases ácidos, CO_2 , H_2S , mercaptanos, etc.), assim como a recuperação de produtos químicos de valor agregado (SEADER *et al.*, 2011a). Alguns exemplos concretos são as torres absorvedoras na saída do processo de craqueamento catalítico (BRASIL *et al.*, 2009), a lavagem de correntes poluídas com NH_3 através do contato com água, o controle dos SO_x produzidos nos processos de combustão, e a remoção de CO_2 e H_2S nas refinarias (McCABE *et al.*, 2002a).

Como é conhecida, a absorção se baseia na lei de Henry, que determina a solubilidade de um gás em um líquido. A dinâmica do processo envolve o transporte do gás na fase líquida, gasosa e na interface entre ambas. Uma forma de promover tais processos de transporte é por meio de uma reação química na fase líquida. Dessa forma, a concentração do soluto é sempre “zerada” na fase, maximizando-se, em consequência, a velocidade de transporte. Esse é o princípio de funcionamento da chamada “absorção química ou reativa” (MCCABE *et al.*, 2002b).

Os processos de absorção ocorrem, habitualmente, em colunas empacotadas, nas quais as correntes líquido e gás fluem em contracorrente. O objetivo do recheio é maximizar a área de contato entre as duas fases para favorecer os processos de transferência de massa (SEADER *et al.*, 2011b). Um esquema básico do processo de absorção é apresentado na Figura 1.

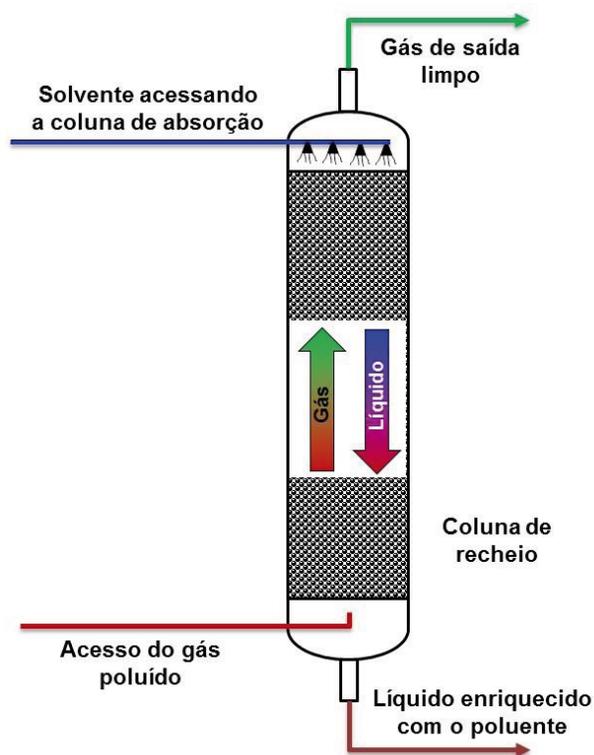


Figura 1: Esquema básico de um sistema de absorção.

A importância dessa operação unitária faz necessária sua implementação em disciplinas laboratoriais dos cursos de engenharia química, principalmente, e de bacharelado em química tecnológica ou industrial. Nessa linha, este artigo apresenta uma forma simples e econômica de montar uma coluna de absorção com componentes que podem ser facilmente encontrados no mercado com preços acessíveis. Para comprovar a validade do sistema, foram realizados experimentos de laboratório com alunos do curso de Bacharelado em Química Tecnológica e Engenharia Química. Estudou-se o processo de absorção com reação química de CO_2 com soluções de NaOH . Variou-se a vazão de líquido, sendo estimado o valor do coeficiente de transferência de massa do CO_2 no líquido. Isso permitiu correlacionar ambos os parâmetros, o que é de grande importância no projeto desse tipo de torres de absorção reativas.

MONTAGEM DA COLUNA DE ABSORÇÃO E DO EXPERIMENTO

Para a montagem da coluna de absorção reativa se requerem os elementos listados na Tabela 1 (estimativa de preços com base no mercado atual).

Outros elementos necessários para a montagem da unidade de absorção são um rotâmetro para controle da vazão de dióxido de carbono, um cilindro de gás de CO₂, uma bomba para movimentação do líquido e uma sonda de condutividade. A Figura 2 mostra um esquema básico da instalação experimental.

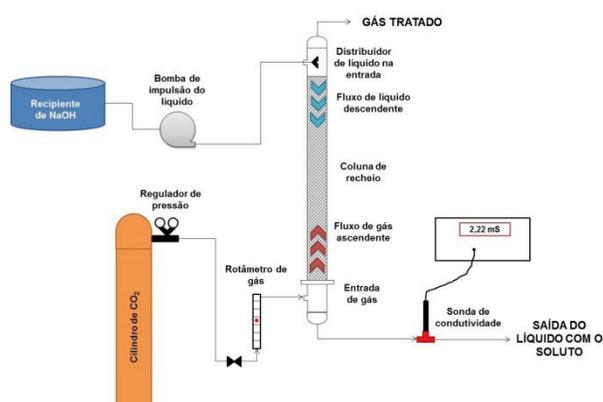


Figura 2: Esquema da instalação experimental utilizada para realizar a prática de laboratório.

A estrutura básica da coluna de absorção se divide em três partes básicas: a) a parte superior, que permite a entrada do líquido e a saída do gás tratado, b) a parte central, na qual se encontra o recheio, e c) parte inferior da coluna, por onde entra a corrente de gás a tratar e sai o líquido contendo o poluente. A Figura 3 apresenta uma imagem de cada uma das partes. Por um lado, a construção de um sifão, com o objetivo de impedir a saída do gás pela parte inferior da coluna; Por outro lado, a malha de aço será colocada na união de PVC, usando-se para isso dois espaçadores de borracha para evitar vazamentos do gás CO₂.

O experimento começa com a preparação das soluções requeridas: 4 litros de solução 0,1 mol L⁻¹ de NaOH, usada como solvente, e 1 litro de solução 0,1 mol L⁻¹ HCl para a titulação do NaOH não reagido. Será utilizado cloreto de bário para precipitar os carbonatos formados (SKOOG *et al.*, 2013). O cilindro de CO₂ deve estar conectado a um rotâmetro,

para regular a vazão de gás e posterior conexão ao fundo da coluna, por intermédio de uma mangueira de silicone.

Tabela 1: Estimativa dos custos de montagem da coluna de absorção.

Componente	Imagem	Preço
Tubulação de PVC de 50 mm de diâmetro e comprimento de 100 mm		R\$ 34 por 3 metros das tubulações
Duas Tês de redução PVC 50x25mm		R\$ 6 por peça
Duas buchas de redução longas PVC 50x25mm		R\$ 4 por peça
Três caps de 25 mm		R\$ 1 por peça
União de PVC de 50 mm		R\$ 27 por peça
Três joelhos de PVC de 25 mm		R\$ 1 por peça
Anéis cerâmicos de aquário		R\$ 20 por sacola de 1 kg
Malha de aço inoxidável		R\$ 50 reais por uma peça
Borracha de 3 mm de espessura		R\$ 30 por 1 x 1 m
Adesivo de PVC		R\$ 3 por pote de 500 ml
Custo total aproximado		R\$ 190

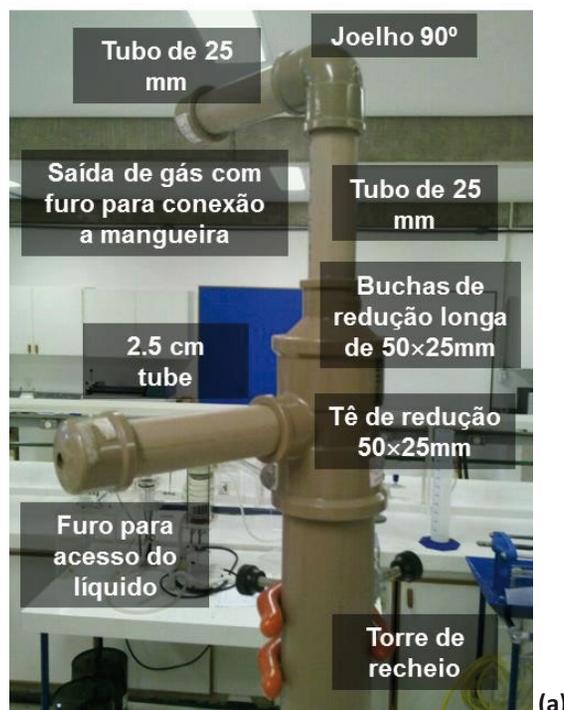
A seguinte etapa é o acionamento do sistema. Para isso, será necessário inicialmente carregar o sifão com a solução de operação 0,1 mol L⁻¹ de KOH, com a ajuda de um sistema de impulsão (existe a possibilidade de usar uma bomba de aquário, dentro de uma opção mais econômica). Antes de come-

çar a passar o gás através da coluna, será medida a condutividade da solução de saída como ponto de partida do experimento. Da mesma forma, será recolhida uma alíquota de 10 mL do líquido saliente, os quais serão levados para titulação com 0,1 mol L⁻¹ HCl prévia adição de 0,5 g de cloreto de bário. A seguir, será aberto o cilindro de CO₂ (tempo zero), monitorando-se a condutividade a intervalos variáveis, em função de suas mudanças. Quando a condutividade atingir um valor estacionário, será considerado que o equipamento atingiu as condições previstas, momento em que se recolherá novamente uma quantidade de 10 mL da saída, que será levada à titulação com HCl.

O foco principal do experimento é a análise da influência da vazão de líquido no coeficiente de transferência de massa na fase líquida. Quatro vazões diferentes de líquido são recomendadas: 10, 20, 30 e 40 mL min⁻¹. Sugere-se realizar o experimento da maior à menor vazão.

A etapa final será a lavagem da coluna. Para isso, pode ser utilizada água, passando de forma generosa, até coincidência da condutividade da água de entrada e de saída do sistema. O tempo de execução desse experimento é de aproximadamente três horas, podendo ser realizado por grupos de dois/três alunos.

Topo da coluna



(a)

Fundo da coluna



(b)



(c)

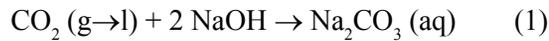
Figura 3: Fotografia da instalação experimental: a) parte superior, b) parte inferior, e c) coluna completa.

PRECAUÇÕES

Durante a realização do experimento, será obrigatório o uso de óculos de segurança, jaleco, luvas e sapato fechado. O hidróxido de sódio e o ácido clorídrico são altamente corrosivos. Ademais, este último pode liberar cloreto de hidrogênio, gás que resulta irritante. O cloreto de bário é tóxico. A fenolftaleína, usada como indicador e, portanto, em quantidades de alíquota, deve ser manuseada com precaução, pois é potencialmente carcinogênica, teratogênica, mutagênica e tóxica. Dessa forma, todos os reagentes devem ser manipulados com máxima precaução e dentro de uma capela, sob a supervisão do professor.

DISCUSSÃO

O processo reativo que ocorre no sistema de absorção química vem representado pela equação 1.



O balanço de massa global é descrito pela equação 2, em que o primeiro termo representa a quantidade de CO₂ removida da fase gás pela reação química, e o segundo termo representa o NaOH consumido pela reação química (ver Figura 3):

$$F_{\text{CO}_2,2} - F_{\text{CO}_2,1} = \frac{F_1}{2C_T} (C_{\text{NaOH},1} - C_{\text{NaOH},2}) \quad (2)$$

O parâmetro F₁ é a vazão volumétrica da fase líquida (mol s⁻¹), C_T é a concentração total da fase líquida, C_{NaOH,1} é a concentração de NaOH no topo da coluna, C_{NaOH,2} representa a concentração de NaOH no fundo, F_{CO₂,1} é a vazão molar de CO₂ no topo da coluna e F_{CO₂,2} é a vazão correspondente no fundo da coluna.

O processo de absorção química envolve quatro processos acoplados: difusão do soluto na fase gás; dissolução do soluto na fase líquida; transferência de massa do soluto dissolvido através da fase líquida; e a reação química, como um perfil típico como o apresentado na Figura 4.

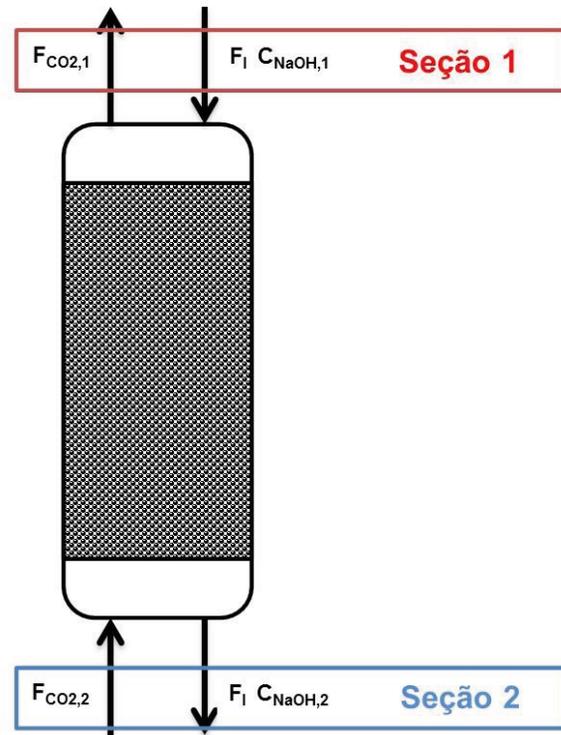


Figura 4: Esquema do processo de absorção reativa.

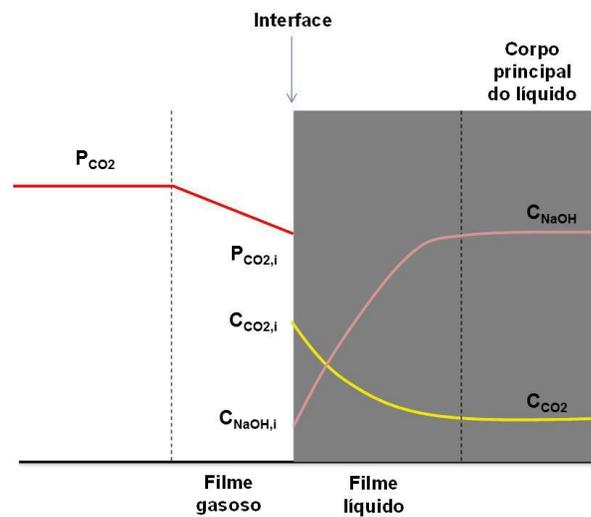


Figura 5: Perfil típico do processo de absorção reativa.

Matematicamente, esse processo está representado pela equação 3, normalizada frente ao volume da coluna V_r (LEVENSPIEL, 1986).

$$-r_{\text{CO}_2} = -\frac{1}{V_r} \frac{dN_{\text{CO}_2}}{dt} = \frac{1}{\frac{1}{k_{\text{CO}_2,g}a} + \frac{H_{\text{CO}_2}}{k_{\text{CO}_2,l}aE} + \frac{H_{\text{CO}_2}}{kC_{\text{NaOH},1}f_1}} P_{\text{CO}_2} \quad (3)$$

O parâmetro $(-r_{\text{CO}_2})$ representa a velocidade de transporte de CO_2 em uma seção determinada da coluna ($\text{mol m}^{-3} \text{s}^{-1}$); N_{CO_2} é a quantidade de CO_2 transferida (mol); $k_{\text{CO}_2, \text{g}}$ é o coeficiente de transferência de massa na fase gás ($\text{mol m}^{-3} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$); H_{CO_2} é a constante de Henry para o CO_2 na água ($\text{Pa m}^{-3} \text{mol}^{-1}$); $k_{\text{CO}_2, \text{l}}$ é o coeficiente de transferência de massa na fase líquida (s^{-1}); E é o fator promocional associado ao incremento na velocidade de absorção devido à reação química (adimensional); k é a constante de velocidade do processo ($\text{m}^3 \text{mol}^{-1} \text{s}^{-1}$); C_{NaOH} é a concentração de NaOH no seio do líquido (mol m^{-3}); f_1 é o espaço ocupado pelo líquido no volume livre da coluna (adimensional); e P_{CO_2} é a pressão parcial do CO_2 na fase gasosa (Pa).

A equação genérica 3 pode ser simplificada para algumas situações particulares. No caso de trabalhar com um gás puro, a resistência de fase gasosa será nula. Da mesma forma, assumindo-se que a reação que ocorre na fase líquida é instantânea, a resistência desse processo será também desprezível. Aplicando as simplificações anteriores, a velocidade de transporte de CO_2 vem definida pela equação 4.

$$-r_{\text{CO}_2} = (k_{\text{CO}_2, \text{l}} a) E \frac{P_{\text{CO}_2}}{H_{\text{CO}_2}} \quad (4)$$

O parâmetro E , para este caso particular, é definido pela equação 5.

$$E = 1 + \frac{H_{\text{CO}_2} D_{\text{NaOH}} C_{\text{NaOH}}}{2D_{\text{CO}_2} P_{\text{CO}_2}} \quad (5)$$

Nessa equação, D_{NaOH} é o coeficiente de difusão do NaOH na água e D_{CO_2} é o coeficiente de difusão correspondente para o CO_2 na água. Combinando as equações 4 e 5, é possível obter a equação 6, que define a velocidade global de transporte de CO_2 :

$$-r_{\text{CO}_2} = (k_{\text{CO}_2, \text{l}} a) \left(1 + \frac{H_{\text{CO}_2} D_{\text{NaOH}} C_{\text{NaOH}}}{2D_{\text{CO}_2} P_{\text{CO}_2}} \right) \frac{P_{\text{CO}_2}}{H_{\text{CO}_2}} \quad (6)$$

O parâmetro de desenho de uma coluna de recheio de absorção reativa é a altura desta, onde ocorrerá o transporte. Para isso, é necessário o ba-

lanço de massa em um elemento diferencial da coluna (equação 7).

$$dF_{\text{CO}_2} = \frac{-F_1}{2C_T} dC_{\text{NaOH}} = (-r_{\text{CO}_2}) S dz \quad (7)$$

O primeiro termo é a quantidade de dióxido de carbono perdida na fase gás; o segundo é o NaOH que reage com o CO_2 , quantificado no terceiro termo. Reorganizando a equação 7, chega-se a equação 8, de desenho da coluna.

$$z = \frac{F_1}{2SC_T} \int_{C_{\text{NaOH}, 2}}^{C_{\text{NaOH}, 1}} \frac{dC_{\text{NaOH}}}{(-r_{\text{CO}_2})} \quad (8)$$

Para calcular a altura da coluna, é necessário integrar a equação anterior, para o que deverá ser incluída a equação 6 dentro desta última. Realizando a correspondente separação de variáveis, é possível chegar ao valor da altura da coluna mediante a equação 9.

$$z = \frac{F_1}{SC_T} \frac{1}{(k_{\text{CO}_2, \text{l}} a) D_{\text{NaOH}}} \ln \left(\frac{2D_{\text{CO}_2} + H_{\text{CO}_2} D_{\text{NaOH}} C_{\text{NaOH}, 1}}{2D_{\text{CO}_2} + H_{\text{CO}_2} D_{\text{NaOH}} C_{\text{NaOH}, 2}} \right) \quad (9)$$

Todos os parâmetros da equação 8 são conhecidos, exceto o coeficiente de transferência de massa do CO_2 na fase líquida. Seu cálculo é o objetivo final dessa prática, avaliado para diferentes vazões de líquido. A Tabela 2 mostra valores obtidos para esse sistema, com diferentes vazões volumétricas do líquido, pelos estudantes. As vazões foram expressas como velocidades mássicas (normalização pela área transversal da coluna, $G_L = m_L/S$, onde G_L é a velocidade mássica, m_L é a vazão mássica de líquido e S é a seção transversal da coluna), em virtude da existência de uma relação potencial entre o coeficiente de transferência de massa na fase líquida é a velocidade mássica, tal como mostrado na equação 9 (MCCABE *et al.*, 2002c), onde os parâmetros c e c_0 devem ser determinados, experimentalmente, do ajuste dos dados à equação potencial.

$$k_{\text{CO}_2, \text{l}} = c_0 G_L^c \quad (10)$$

Tabela 2: Valores obtidos pelos alunos para experimentos de absorção de CO₂ com diferentes vazões de líquido.

10 ⁷ vazão volumétrica / m ³ s ⁻¹	Velocidade mássica / kg m ⁻² s ⁻¹	K _a / h ⁻¹
1,614	0,0822	0,422
3,228	0,1644	0,481
4,842	0,2466	0,515
6,456	0,3288	0,532

A Figura 6 apresenta os resultados obtidos do ajuste dos dados à equação 9. Os valores correspondentes de c e c_0 são 0,17 e 0,829.

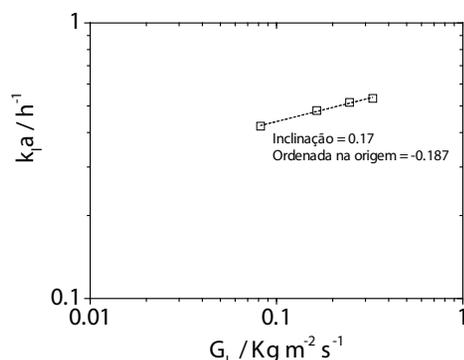


Figura 6: Ajuste dos dados experimentais à equação 9.

Em resumo, esse experimento permite que os alunos visualizem o que ocorre em um processo de absorção reativo, como os usados na remoção de poluentes: o processo de transporte de massa dentro da camada limite líquida, o transporte através da interface líquida-gás, assim como o processo reativo. Ademais, os estudantes podem quantificar e entender a influência de um parâmetro importante operativo, como a vazão de líquido alimentada à coluna.

CONCLUSÕES

Mediante o uso de materiais simples e econômicos, é possível montar e operar uma coluna de absorção reativa empacotada, permitindo mostrar a importância dessa operação na indústria, por exemplo, na remoção de poluentes gasosos. Neste caso, mostrou-se o exemplo da remoção de CO₂ mediante contato, em contracorrente, com uma solução de NaOH, sendo determinada a quantidade absorvida mediante titulação volumétrica. A partir das equações definidoras do sistema, é possível estimar o coeficiente de transferência de massa da fase líquida

para o CO₂ para diferentes vazões volumétricas de líquido, sendo quantificado o efeito das condições hidrodinâmicas sobre aquele parâmetro. O contato com essa operação é fundamental na formação de futuros engenheiros químicos e químicos tecnológicos/industriais.

INFORMAÇÃO SUPLEMENTAR

Para melhor apreensão do que foi apresentado neste artigo, fornece-se informação suplementar contendo o roteiro da prática, bem como uma aplicação do Excel que permite visualizar o perfil de concentração de NaOH e a quantidade de CO₂ removida ao longo da torre de absorção. Ambos estão disponíveis, como suplemento deste artigo, na versão *online* da *Revista de Ensino de Engenharia*, v. 33, n. 2 (2014), em: <<http://www.abenge.org.br/revista/index.php/abenge>>.

REFERÊNCIAS

- BRASIL, N. I. do; SANTOS ARAÚJO, M. A., SOUSA, E. C. M. de. **Processamento de gás e petróleo**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2011.
- LEVENSPIEL, O. **Ingeniería de las reacciones químicas**. Barcelona: Reverte, 1986.
- MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P. **Operaciones unitarias en Ingeniería Química**. 6. ed. Cuauhtémoc, México: McGraw-Hill/Interamericana Editores S.A. de C.V., 2002a, p. 589-590.
- MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P. **Operaciones unitarias en Ingeniería Química**. 6. ed. Cuauhtémoc, México: McGraw-Hill/Interamericana Editores S.A. de C.V., 2002b, p. 635-636.
- MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P. **Operaciones unitarias en Ingeniería Química**. 6. ed. Cuauhtémoc, México: McGraw-Hill/Interamericana Editores S.A. de C.V., 2002c, p. 627-628.
- SEADER, J. D.; HENLEY, E. J.; KEITH ROPER, D. **Separation process principles**. Chemical and biochemical operations. 3. ed. Hoboken, United States: JohnWiley & Sons, Inc., 2011a; p. 206-207.
- SEADER, J. D.; HENLEY, E. J.; KEITH ROPER, D. **Separation process principles**. Chemical and biochemical operations. 3. ed. Hoboken, United States: JohnWiley & Sons, Inc., 2011b; p. 209.
- SKOOG, D.; WEST, D. M.; JAMES HOLLER, F.; CROUCH, S. R. **Fundamentals of analytical chemistry**. 9. ed.; Sanders College Publishing: New York, United States, 2013; p. 391.

DADOS DOS AUTORES



Fabio Fully – Aluno do terceiro semestre o curso de Engenharia Química do Instituto de Química da Universidade de Brasília. Realizou a disciplina de Técnica de Pesquisa I no Laboratório de Ensino de Química Tecnológica, onde ajudou na montagem, posta em marcha e operação de módulos de ensino em Engenharia Química e Química Tecnológica.



Maria Betânia d'Heni Teixeira – Possui graduação em Química Industrial pela Universidade Católica de Pernambuco (1993), mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos pela Universidade de Brasília (2003), especialização em Educação a Distância pela Universidade de Brasília (2008) e é doutoranda em Tecnologias Química e Biológica pela Universidade de Brasília. Atualmente, ocupa o cargo de Técnico em Laboratório no Instituto de Química da Universidade de Brasília. Tem experiência na área de Química, Microbiologia e Química Tecnológica e tem atuado no Laboratório de Materiais e Combustíveis e no Laboratório de Ensino em Química Tecnológica.



José Joaquín Linares León – Engenheiro Químico formado na Universidad de Castilla-La Mancha (Espanha), na especialidade de Engenharia Meio Ambiental. Doutorado no Programa Interuniversitário de Engenharia Química, Ambiental e dos Materiais da Universidad Rey Juan Carlos (Espanha) e de Castilla-La Mancha. Trabalha como responsável pela área de inovação da Agência de Energia de Castilla-La Mancha. Pós-doutorando no Instituto de Química de São Carlos (Universidade de São Paulo). Atualmente, é professor da Divisão de Química Tecnológica do Instituto de Química da Universidade de Brasília. Tem interesse na área de células a combustível de membrana polimérica, células a combustível microbiológica e processos eletroquímicos de tratamento de águas.