

# DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UMA COLUNA DE LEITO ROTATIVO NA ABSORÇÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO COM HIDRÓXIDO DE SÓDIO

K. S. G. C. OLIVEIRA<sup>1</sup>, C. C. de CARVALHO<sup>1</sup>, F. S. VIEIRA<sup>1</sup>, L. M. SANTOS<sup>1</sup> e J. D. A. BELLIDO<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de São João del-Rei, Departamento de Engenharia Química  
E-mail para contato: kaiquesg.eq@gmail.com

**RESUMO** – As colunas de recheio rotativo, denominadas *Higee*, permitem o aumento da capacidade e eficiência de um processo, comparado a uma coluna convencional. A principal proposta deste trabalho é desenvolver e avaliar uma coluna de leito estruturado rotativo para a absorção de gás carbônico por uma solução de hidróxido de sódio 1M, a partir da eficiência de captura de CO<sub>2</sub>, da área interfacial efetiva ( $a_e$ ) e do coeficiente volumétrico gasoso de transferência de massa ( $k_{GA}$ ), aplicando a tecnologia *Higee*. Assim como, avaliar a influência da velocidade de rotação e das vazões de gás e líquido. A absorção de CO<sub>2</sub> na solução de NaOH foi determinada a partir da titulação com HNO<sub>3</sub> 1M. Foram testadas velocidades de rotação de 300, 1050 e 1800 rpm, vazões de CO<sub>2</sub> de 4, 6 e 8 L.min<sup>-1</sup> e vazões de NaOH de 0,5, 0,75 e 1 L.min<sup>-1</sup>. Os resultados obtidos confirmam que o aumento da velocidade de rotação, aumentou a eficiência, a  $a_e$ , o  $k_{GA}$ , e, conseqüentemente, o contato entre as fases. A proporção direta também se observou entre a vazão de gás e os valores de  $a_e$  e  $k_{GA}$ . As maiores eficiências foram obtidas nas menores vazões de CO<sub>2</sub> e NaOH, 4 L.min<sup>-1</sup> e 0,5 L.min<sup>-1</sup> respectivamente, e na maior velocidade de rotação, 1800 rpm.

## 1. INTRODUÇÃO

O conceito de Intensificação de Processos surgiu da possibilidade de reduzir os custos totais de operação em uma planta industrial por meio da redução de seu tamanho, com isso tem-se o aumento da produtividade e da qualidade dos produtos. Nesse contexto, associa-se a tecnologia *Higee*, oriunda do termo em inglês “*high g*”, que significa alta gravidade, desenvolvida por Ramshaw e Mallinson (1981). Ela utiliza a força centrífuga para intensificar a transferência de massa interfacial gás-líquido, reduzindo o volume do equipamento em até duas vezes em comparação com o modelo convencional (Joel *et al.*, 2014).

Durante as últimas três décadas, colunas rotativas ou RPB (do inglês, *Rotating Packed Bed*) foram empregados para obter absorção (Zhang *et al.*, 2011), dessorção (Majeed *et al.*, 2007), destilação (Luo *et al.*, 2012), desvolatilização de polímeros (Chen *et al.*, 2010), precipitação reativa (Chen *et al.*, 2000), produção de nanopartículas (Sun *et al.*, 2011), entre outros.

A demanda de energia associada ao aumento do uso de combustíveis fósseis, aumentou consideravelmente as concentrações de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Muitos estudos avaliaram a viabilidade

de captura de CO<sub>2</sub> utilizando o processo de absorção em colunas rotativas com soluções aquosas de MEA (Joel, 2014), etanolamina (Yeh; Pennlie, 2001) ou NaOH (Liu, 2015), por exemplo.

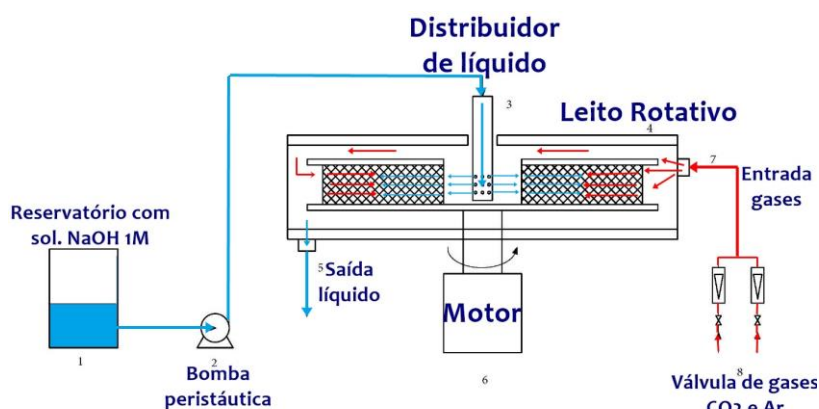
De modo a trazer subsídios ao projeto de novas colunas de absorção ou de modificações de colunas já existentes, esse trabalho teve o objetivo de construir e analisar o desempenho da coluna de absorção com recheio estruturado e rotativo, atuando na mistura binária NaOH/CO<sub>2</sub>. Para tanto, foram determinados o coeficiente de transferência de massa para a fase líquida, além da influência da velocidade de rotação, das vazões de gás e líquido na eficiência de remoção de CO<sub>2</sub>.

## 2. MATERIAIS E METODOLOGIA

### 2.1. Montagem e operação da coluna rotativa

A unidade *Higee* foi construída por rotor com recheio estruturado e auxiliares, como descrito na Figura 1. A solução de NaOH 1M é alimentada através de um distribuidor pelo interior da coluna e flui radialmente para fora, como gotículas ou filetes através do recheio, por meio da força centrífuga. Enquanto isso, a mistura gasosa (ar e 10% de CO<sub>2</sub>) entra no interior do rotor, pelo lado externo, e flui radialmente para dentro por um gradiente de pressão. A coleta do líquido é feita pela parte de baixo.

Figura 1 – Diagrama da montagem experimental.



### 2.2. Planejamento Experimental

Utilizou-se o design de experimentos fracionado (Tabela 1) para avaliar a influência de três parâmetros no processo: vazão de solução de hidróxido, a rotação do motor e a vazão da mistura gasosa, totalizando sete experimentos.

Tabela 1 – Variáveis e níveis de estudo.

Níveis	Vazão de NaOH 1M (L.min <sup>-1</sup> )	Rotação do motor (rpm)	Vazão de CO <sub>2</sub> (L.min <sup>-1</sup> )
-1	0,50	300	4,0
0	0,75	1050	6,0
1	1,00	1800	8,0

### 2.3. Eficiência de captura de CO<sub>2</sub>

A eficiência de captura do CO<sub>2</sub> foi calculada pela Equação 1. A concentração inicial de CO<sub>2</sub> (C<sub>i</sub>) foi calculada por meio da vazão de mistura CO<sub>2</sub> e ar da alimentação. A concentração final (C<sub>f</sub>) foi determinada indiretamente, por meio da titulação da solução de NaOH com HNO<sub>3</sub> 1M, utilizando a fenolftaleína como indicador.

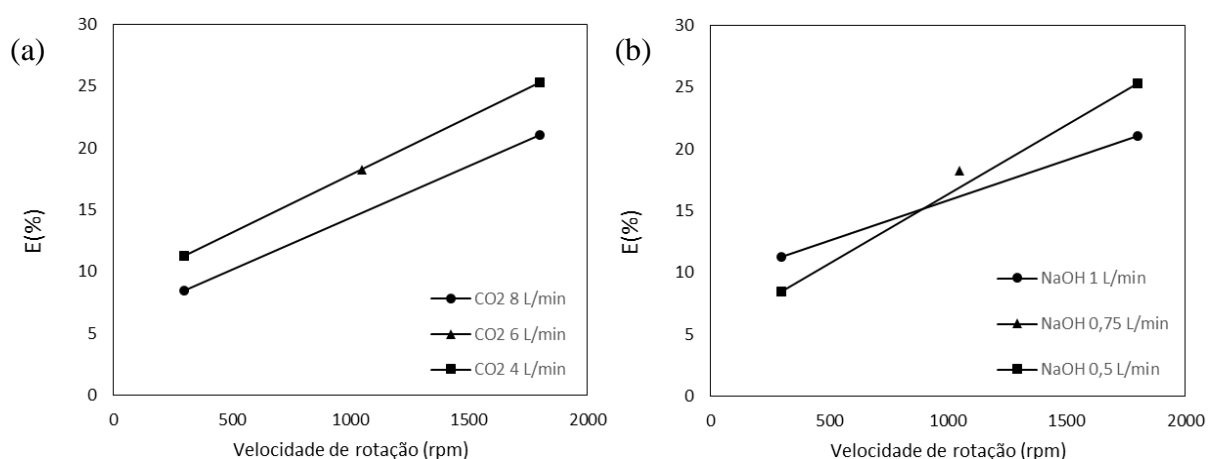
$$E(\%) = \frac{C_i - C_f}{C_i} * 100 \quad (1)$$

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1. Principais efeitos das variáveis na eficiência

A Figura 2a apresenta o efeito da velocidade de rotação na eficiência de captura de CO<sub>2</sub>, para cada vazão de CO<sub>2</sub> testada, na concentração de 10% v/v. Conforme esperado, o aumento da velocidade de rotação proporcionou um aumento na eficiência de captura de CO<sub>2</sub>, pelo fato da aceleração centrífuga fornecer um filme estagnado de fina espessura junto à interface gás-líquido, conduzindo a uma maior transferência de massa, de acordo com a teoria da penetração, desenvolvida por Higbie (1935). Verifica-se também que na menor vazão de gás (4 L min<sup>-1</sup> de CO<sub>2</sub>), obteve-se a maior eficiência na captura do CO<sub>2</sub>. O aumento na vazão do gás resulta em um tempo menor de contato entre as fases gás-líquido, diminuindo assim a transferência de massa. Tendências semelhantes foram encontradas por Lin e Chen (2011) ao estudar a absorção de CO<sub>2</sub> pela solução de NaOH no RPB de fluxo cruzado com recheio estruturado.

Figura 2 – Efeito da velocidade de rotação na eficiência para cada vazão testada de: (a) CO<sub>2</sub> e (b) NaOH.

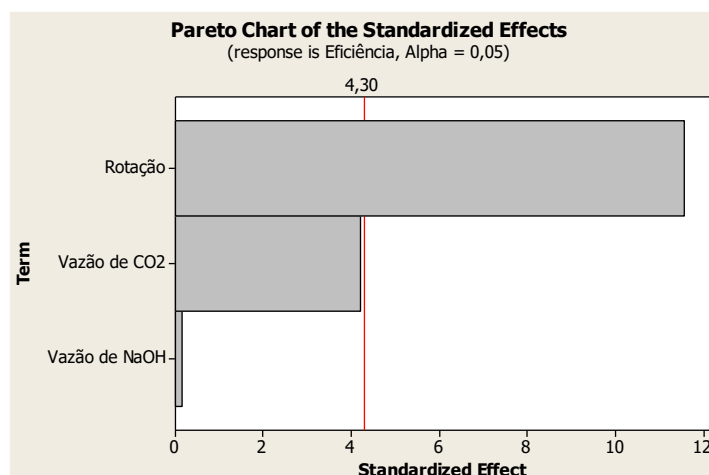


Pela Figura 2b, verificou-se que a melhor eficiência foi obtida trabalhando-se com a velocidade de rotação e vazão de NaOH inversamente proporcionais. É interessante prever, mesmo sem os testes, que é possível obter a mesma eficiência, para uma velocidade de rotação de aproximadamente 900 rpm, usando tanto uma vazão de 0,5 quanto de 1 L.min<sup>-1</sup> do hidróxido.

### 3.2. Efeito padronizado das variáveis na eficiência

É possível concluir com a Figura 3, que a rotação é a variável preditora mais significativa na eficiência da captura de CO<sub>2</sub> pela solução de NaOH 1M, na coluna de leito rotativo.

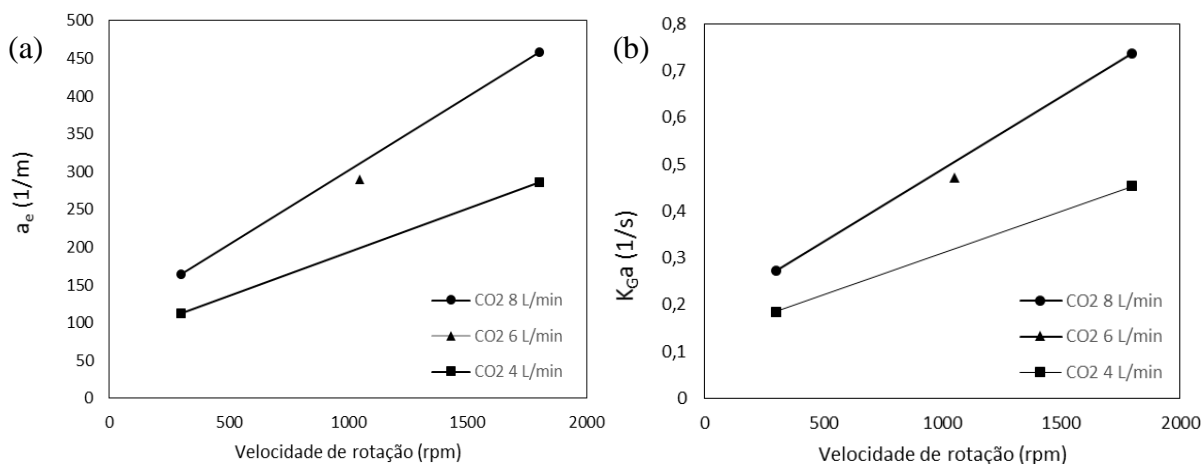
Figura 3 – Efeito padronizado das variáveis na eficiência.



### 3.3. Efeito da velocidade de rotação e da vazão de CO<sub>2</sub> sobre o k<sub>GA</sub> e a<sub>e</sub>

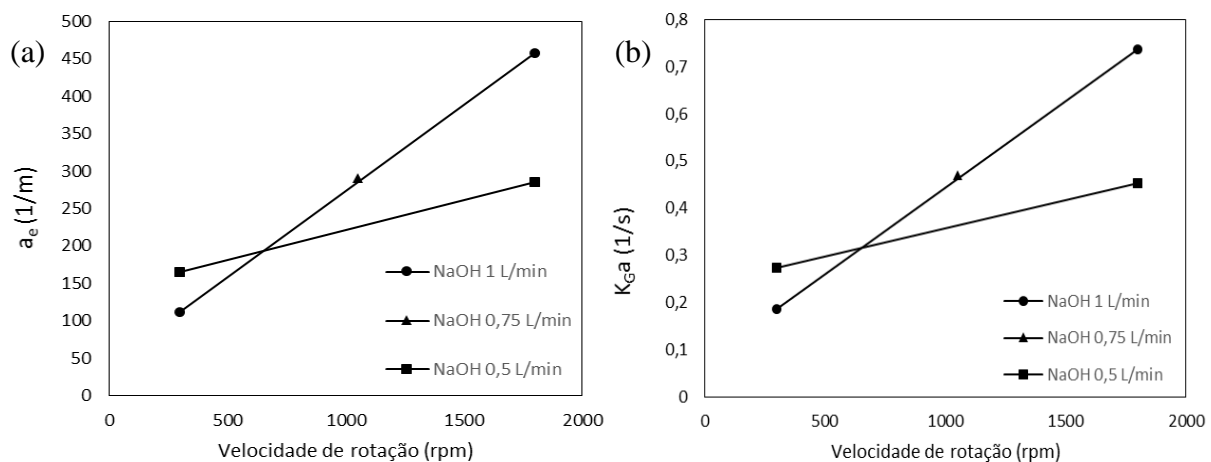
A Figura 4 mostra a relação entre a velocidade de rotação com a área interfacial efetiva (a<sub>e</sub>) e o coeficiente volumétrico gasoso de transferência de massa (k<sub>GA</sub>), variando-se a vazão de CO<sub>2</sub>. Aumentando-se a velocidade de rotação, aumenta-se a força de cisalhamento do líquido pelo recheio, melhorando a dispersão do líquido e conseqüentemente aumentando a a<sub>e</sub> e o k<sub>GA</sub>. O aumento da vazão do CO<sub>2</sub> também provoca um aumento da a<sub>e</sub> e do k<sub>GA</sub>, devido ao aumento da velocidade radial do mesmo, conduzindo a uma maior perturbação das fases gás-líquido e com isso, uma melhor dispersão do líquido e um aumento da interface gás-líquido (Yang *et al.*, 2011).

Figura 4 – Efeito da velocidade de rotação (a) na a<sub>e</sub> e (b) no k<sub>GA</sub>, variando a vazão de CO<sub>2</sub>.



A Figura 5 mostra a relação entre a velocidade de rotação com a  $a_e$  e o  $k_GA$ , variando-se a vazão de NaOH. Para a menor rotação são obtidos valores menores de  $a_e$  e  $k_GA$ , quando se utilizou a menor vazão de NaOH. Esse efeito pode ser explicado pela insuficiência da rotação em dispersar o líquido que entra no recheio, formando filmes líquidos mais espessos, dificultando a entrada do gás e diminuindo a interface gás-líquido. Já para a maior rotação, são obtidos valores maiores de  $a_e$  e  $k_GA$ , quando se tem a maior vazão de NaOH. Isso ocorre porque a velocidade de rotação consegue dispersar melhor o líquido e o aumento da velocidade do líquido promove a formação de filmes líquidos mais finos e a fração da embalagem molhada também aumenta (Rajan *et al.*, 2011).

Figura 5 – Efeito da velocidade de rotação (a) na  $a_e$  e (b) no  $k_GA$ , variando a vazão de  $CO_2$ , variando a vazão de NaOH.



## 4. CONCLUSÃO

O uso da coluna rotativa com recheio estruturado mostra-se com uma importante aplicação industrial na redução do volume de equipamentos e a redução dos custos. Este trabalho propôs a construção e a avaliação de uma coluna de leito estruturado e rotativo para a absorção de gás carbônico por hidróxido de sódio. Os resultados foram avaliados em relação à eficiência de captura de  $CO_2$ , à área interfacial efetiva ( $a_e$ ), e ao coeficiente volumétrico gasoso de transferência de massa ( $k_GA$ ), utilizando planejamento experimental. Os resultados indicaram que o aumento da velocidade de rotação, acarretou no aumento da eficiência, da  $a_e$  e do  $k_GA$ . Conclui também que quanto proporcionalidade direta entre a vazão de gás, com os valores de  $a_e$  e  $k_GA$ . As condições de operação testadas, que ofereceram a maior eficiência, foram as menores vazões de  $CO_2$  e NaOH,  $4 L \cdot min^{-1}$  e  $0,5 L \cdot min^{-1}$ , respectivamente, e a maior velocidade de rotação, 1800 rpm. Por isso, sugere-se modificações no recheio para aumentar a eficiência e para que seja possível trabalhar com maiores vazões de  $CO_2$ .

## 5. REFERÊNCIAS

CHEN, J. F.; GAO, H.; ZOU, H. K.; CHU, G. W.; ZHANG, L.; SHAO, L.; XIANG, Y.; WU, Y. X. Cationic Polymerization in Rotating Packed Bed Reactor: Experimental and Modeling. *AIChE J.* v. 56, p. 1053, 2010.

- CHEN, J. F.; WANG, Y. H.; GUO, F.; WANG, X. M.; ZHENG, C. Synthesis of Nanoparticles with Novel Technology: High-gravity Reactive Precipitation. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 39, p. 948, 2000.
- HIGBIE, R. The rate of absorption of a pure gas into a still liquid during short periods of exposure. *J. Amer. Inst. Chem. Eng.*, v. 31, p. 365-390, 1935.
- JOEL, A. S.; WANG, M.; RAMSHAW, C.; OKO, E. Process analysis of intensified absorber for post-combustion CO<sub>2</sub> capture through modelling and simulation. *Int J Gas Control*, v. 21, p. 91-100, 2014.
- LIN, C. C.; CHEN, B. C. Carbon dioxide absorption into NaOH solution in a cross-flow rotating packed bed. *J. Ind. Eng. Chem.*, v. 13, p. 1083–1090, 2011.
- LIU, Y.; GU, D.; XU, C; QI, G.; JIAO, W. Mass transfer characteristics in a rotating packed bed with split packing. *Chin. J. of Chem. Eng.*, v. 23, p. 868–872, 2015.
- LUO, Y.; CHU, G. W.; ZOU, H. K.; XIANG, Y.; SHAO, L.; CHEN, J. F. Characteristics of a two-stage counter-current rotating packed bed for continuous distillation. *Chem. Eng. Process.*, v. 52, p. 55, 2012.
- MAJEED, S. J.; ROCHELLE, G.; EIMER, D.; RAMSHAW, C. Carbon Dioxide Absorption and Desorption in Aqueous Mono Ethanol Amine Solutions in a Rotating Packed Bed. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 46, p. 2823, 2007.
- RAJAN S.; KUMAR M.; ANSARI M. J.; RAO D. P.; KAISTHA N. Limiting gas–liquid flows and mass transfer in a novel rotating packed bed (HiGee), *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 50, p. 986–997, 2011.
- RAMSHAW, C.; MALINSON, R. H. Mass transfer process. U.S. Patent 4.283.255, 1981.
- SUN, B. C.; WANG, X. M.; CHEN, J. M.; CHU, G. W.; CHEN, J. F.; SHAO, L. Synthesis of Nano-CaCO<sub>3</sub> by Simultaneous Absorption of CO<sub>2</sub> and NH<sub>3</sub> into CaCl<sub>2</sub> Solution in a Rotating Packed Bed. *Chem. Eng. J.*, v. 168, p. 731, 2011.
- YANG, K.; CHU, G. W; ZOU, H. K.; SUN, B. C.; SHAO, L.; CHEN, J. F. Determination of the effective interfacial area in rotating packed bed. *Chem. Eng. J.* v. 168, p. 1377–1382, 2011.
- YEH, J. T., PENNLIN, H. W. Study of CO<sub>2</sub> Absorption and Desorption in a Packed Column. U.S. DOE/ NETL, Kevin P. Resnik, Parsons Infrastructure and Technology Group, Inc., USA, 2001.
- ZHANG, L. L.; WANG, J. X.; XIANG, Y.; ZENG, X. F.; CHEN, J. F. Absorption of Carbon Dioxide with Ionic Liquid in a Rotating Packed Bed Contactor: Mass Transfer Study. *Ind. Eng. Chem. Res.* v. 50, p. 6957, 2011.