



## **AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E COEFICIENTE VOLUMÉTRICO DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA PARA DESSULFURIZAÇÃO EM TORRE DE PULVERIZAÇÃO**

VINÍCIUS Y. VALERA<sup>1</sup>, MILENE C. CODOLO<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química  
Campus Diadema

\*e-mail: milene.codolo@unifesp.br

**RESUMO** - Diversos equipamentos podem ser utilizados para minimizar ou eliminar o problema de emissão de poluentes atmosféricos por fontes industriais, sendo um deles, a instalação de uma torre de nebulização para absorção de gases. Devido à complexidade do processo e a quantidade de parâmetros a serem avaliados na torre de nebulização, propor modelos matemáticos para predição de variáveis importantes, como a eficiência de remoção e o coeficiente volumétrico de transferência de massa médio ( $\overline{k_g a}$ ), é uma tarefa difícil. Esse trabalho teve por objetivo avaliar a influência das variáveis no processo de remoção de SO<sub>2</sub> em torre de nebulização. A torre construída nesse estudo atingiu eficiência máxima de 99.47% e  $\overline{k_g a}$  de 24.46 x 10<sup>-8</sup> kmol s<sup>-1</sup> m<sup>-3</sup> Pa<sup>-1</sup> e mostrou que é possível alcançar altos níveis de remoção sem a necessidade de construir torres tão altas.

### **INTRODUÇÃO**

O dióxido de enxofre é gerado majoritariamente quando ocorre a queima de combustíveis fósseis com presença de enxofre. O processo de remoção de SO<sub>2</sub> é conhecido como dessulfurização de gases (flue gas desulfurization FGD) (de Nevers, 2000). A dessulfurização de gases de combustão (FGD) é uma etapa fundamental para as plantas que operam com combustíveis fósseis (Flagiello, et al., 2018). Segundo Bandyopadhyay e Biswas (2007), os métodos de separação úmida são os mais simples entre os diversos métodos físico-químicos para absorção de gases e apresentam alta eficiência de remoção.

A torre de pulverização é um equipamento utilizado há anos na indústria em sistemas de remoção úmida para o controle de gases poluentes. Seu projeto simples, baixa queda de pressão e baixo custo de manutenção são suas principais vantagens, enquanto o alto consumo de líquido e baixa remoção de partículas são desvantagens, em comparação a

outros absorvedores, como por exemplo a torre de recheio (Bozorgi, et al., 2006).

A eficiência de remoção de um gás, assim como o coeficiente de transferência de massa volumétrico médio ( $\overline{k_g a}$ ), dentro de uma torre de nebulização, dependem de um grande número de variáveis, tais como: as vazões de gás e líquido, o tamanho, distribuição e velocidade das gotas, a formação do filme líquido, a ruptura e coalescência das gotas e tempo de contato entre o gás e o líquido (Turpin et al., 2008).

Estudos experimentais produzidos ao longo dos anos apresentaram as relações entre as variáveis envolvidas no processo e a eficiência de remoção de um gás e o  $\overline{k_g a}$ . Turpin et al. (2008), estudaram os parâmetros de transferência de massa e a eficiência de remoção de H<sub>2</sub>S em uma torre de nebulização em escala de bancada. Os resultados mostraram que a variação da vazão de gás teve grande influência na transferência de massa e na remoção, enquanto a variação da vazão de líquido não teve influência aparente nos parâmetros de transferência de massa devido a

não uniformidade da pulverização da solução nos experimentos.

O estudo de Bandyopadhyay e Biswas (2012) propôs um novo modelo de pulverizador para produzir gotas menores e mais uniformes. Foi investigada a eficiência de remoção e a área interfacial. Nesse trabalho foi observado, que o aumento da vazão de gás reduziu a porcentagem de remoção, enquanto o aumento da vazão de líquido aumentou a remoção e tanto o aumento da vazão de gás quanto a de líquido, aumentaram a área interfacial disponível para transferência de massa.

Darake et al. (2016), realizaram um estudo teórico e experimental em uma torre para remoção de SO<sub>2</sub> com água do mar. Constataram que não levar em consideração o filme de líquido na superfície interna da torre leva a grandes erros na modelagem matemática. Com base nos dados experimentais, foi verificado que a ordem de importância das variáveis é a seguinte: vazão de líquido, seguido da vazão de gás, concentração de SO<sub>2</sub> e a temperatura do gás.

Jafari et al. (2018), estudaram uma torre de nebulização para remoção de amônia. Nesse estudo, foram utilizados três diferentes bicos pulverizadores do tipo cone cheio em diferentes configurações, diferentes pressões de operação e concentração de amônia. Observaram que o diâmetro de orifício do bico tem um papel muito importante na eficiência de remoção, consumo de líquido e diâmetro das gotas.

Wang et al. (2015), estudaram a remoção de SO<sub>2</sub> com solução de hidróxido de sódio em uma torre de nebulização. Os resultados mostraram que o coeficiente volumétrico de transferência de massa ( $k_g a$ ) aumentou com o aumento da vazão de gás e de líquido, enquanto a concentração de entrada do SO<sub>2</sub> não apresentou influência significativa.

Atualmente existe uma grande dificuldade na produção de modelos matemáticos que atendam amplas condições de operação da torre de nebulização. Boa parte desse problema está relacionado ao grande número de parâmetros necessários para se calcular a taxa de transferência de massa. A área disponível para transferência de massa, por exemplo, envolve diversos fatores como: velocidade do gás e do líquido, coalescência das

gotas, dispersão das gotas e o filme de líquido (Zhu, et al., 2016).

O objetivo desse trabalho foi avaliar a influência das variáveis na eficiência de remoção do SO<sub>2</sub> e no coeficiente volumétrico de transferência de massa ( $\overline{k_g a}$ ). A avaliação da eficiência de remoção do SO<sub>2</sub> e o  $\overline{k_g a}$  foram avaliados em função das velocidades do gás e do líquido, diâmetro de orifício e número de bicos pulverizadores.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A bancada experimental era composta por uma torre de nebulização em polipropileno (9) com altura útil de absorção de 0.6 m e diâmetro interno de 0.29 mm. As entradas do gás (7) eram localizadas na parte inferior da torre, enquanto a solução de absorção era pulverizada na parte superior, o que criou um sistema contracorrente. A Figura 1 apresenta a bancada experimental.

O gás utilizado era uma mistura de ar e SO<sub>2</sub>. A vazão de gás foi produzida por meio do ventilador centrífugo (1). A regulagem da vazão de ar foi realizada por meio de uma válvula esfera, enquanto a aferição dessa vazão foi realizada pelo termo anemômetro TESTO 405i (2). A vazão de ar era contaminada com o SO<sub>2</sub> puro engarrafado (3). A vazão de SO<sub>2</sub> era regulada por uma válvula agulha e indicação da vazão por um rotâmetro (5).

As amostras do gás (SO<sub>2</sub> e Ar) eram coletadas na entrada e saída da torre (7 e 8) e seguiam para o analisador de gases HORIBA PG-250 (6) para verificação da concentração do SO<sub>2</sub> em ppm. Cada medição realizada neste estudo foi repetida cinco vezes. A solução de absorção utilizada foi NaOH diluída em água com 20% em excesso em relação a concentração estequiométrica. O escoamento de líquido foi realizado por meio de uma bomba centrífuga (13), levando a solução até os bicos pulverizadores de pressão (17), que eram do tipo cone cheio com 15° de abertura. A vazão de líquido era regulada por uma válvula esfera e indicada por um rotâmetro (14). Um manômetro era responsável por medir a pressão de pulverização do líquido (16).

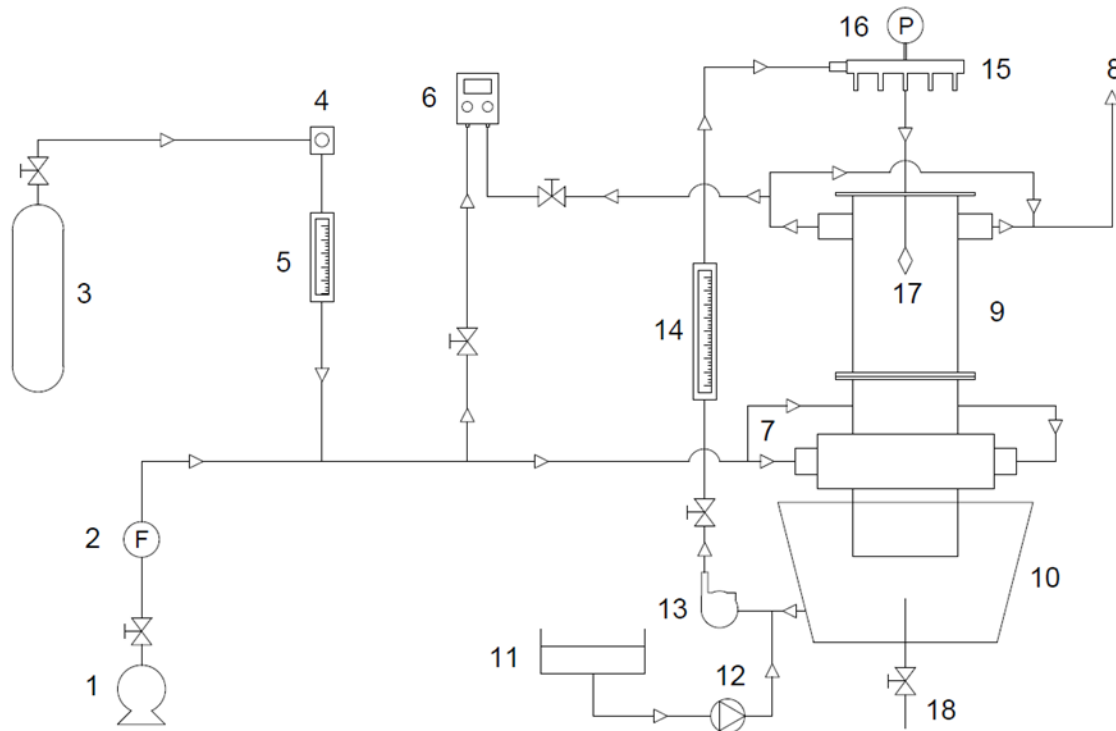


Figura 1: Esquema do aparato experimental. (1) Ventilador, (2) termo anemômetro, (3) cilindro de  $\text{SO}_2$ , (4) Estação de gás, (5) Rotâmetro de  $\text{SO}_2$ , (6) Analisador de Gás, (7) Entradas da torre, (8) Saídas da Torre, (9) Coluna de Pulverização, (10) Tanque de solução de recirculação, (11) reservatório de  $\text{NaOH}$ , (12) Bomba peristáltica, (13) Bomba Centrífuga, (14) Rotâmetro da solução, (15) Distribuidor de Solução, (16) manômetro, (17) bicos de pulverização, (18) válvula de drenagem de solução.

A concentração do  $\text{SO}_2$  utilizada nos experimentos foi de aproximadamente 1000 ppm. A vazão do gás na entrada da torre de nebulização variou entre  $3.3 \times 10^{-3}$  e  $11.2 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , o que resultou em velocidades de  $0.05 \text{ m s}^{-1}$ ,  $0.08 \text{ m s}^{-1}$ ,  $0.11 \text{ m s}^{-1}$ ,  $0.14 \text{ m s}^{-1}$  e  $0.17 \text{ m s}^{-1}$ , utilizadas em todas as condições experimentais.

Três diferentes configurações de bicos pulverizadores foram utilizadas, um bico centralizado, dois bicos equidistantes e três bicos equidistantes. Para configuração de 1 bico foi usado diâmetro de orifício ( $D_o$ ) de  $2.4 \times 10^{-3} \text{ m}$ , enquanto para 2 e 3 bicos,  $D_o$  de  $1.6 \times 10^{-3} \text{ m}$ . A vazão de líquido variou entre  $5.56 \times 10^{-5}$  e  $13.89 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . A Tabela 1 mostra as vazões de líquido utilizadas com as respectivas velocidades superficiais de líquido dentro da torre para cada uma das configurações de bicos pulverizadores e diâmetro de orifício.

Tabela 1: Condições Experimentais.

$Q_L \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)}$	$U_L \text{ (m s}^{-1}\text{)}$	No bicos	$D_o \text{ (m)}$
$5.6 \times 10^{-5}$	$8.4 \times 10^{-4}$	1	$2.4 \times 10^{-3}$
$8.3 \times 10^{-5}$	$12.6 \times 10^{-4}$	1	
$5.6 \times 10^{-5}$	$8.4 \times 10^{-4}$	2	$1.6 \times 10^{-3}$
$8.3 \times 10^{-5}$	$12.6 \times 10^{-4}$	2	
$5.6 \times 10^{-5}$	$8.4 \times 10^{-4}$	3	$1.6 \times 10^{-3}$
$8.3 \times 10^{-5}$	$12.6 \times 10^{-4}$	3	
$11.1 \times 10^{-5}$	$16.8 \times 10^{-4}$	3	
$13.9 \times 10^{-5}$	$21.0 \times 10^{-4}$	3	

A eficiência de remoção do  $\text{SO}_2$  ( $E_f$ ) foi calculada por meio da Equação 1.

$$E_f (\%) = \frac{C_{\text{SO}_2,E} - C_{\text{SO}_2,S}}{C_{\text{SO}_2,E}} * 100 \quad (1)$$

Em que  $C_{\text{SO}_2,E}$  e  $C_{\text{SO}_2,S}$  são a concentração de entrada e de saída do  $\text{SO}_2$  [ $\text{kmol m}^{-3}$ ].

Os resultados de eficiência de remoção do SO<sub>2</sub> também foram analisados em função da relação  $L/G$ . A relação  $L/G$  é dada pela razão entre a vazão de líquido ( $Q_L$ ) em L s<sup>-1</sup> e a vazão de gás ( $Q_G$ ) em m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, conforme a Equação 2.

$$\frac{L}{G} = \frac{Q_L}{Q_G} \quad (2)$$

Em sistemas em que o soluto, na fase gasosa, é muito solúvel na fase líquida, como é o caso do SO<sub>2</sub> em água, o valor da constante de Henry é muito baixo e, então, pode-se considerar que as resistências global e individual da fase gasosa são próximas, como segue:

$$\frac{1}{K_g} \approx \frac{1}{k_g} \quad (3)$$

A Equação 3 mostra que o processo de transferência de massa é controlado pela resistência da fase gasosa. Sabendo também que a reação entre SO<sub>2</sub> e NaOH é instantânea e irreversível, é possível calcular o coeficiente volumétrico de transferência de massa médio do gás ( $\overline{k_g a}$ ) [kmol s<sup>-1</sup> m<sup>-3</sup> Pa<sup>-1</sup>] utilizando-se a Equação 4 (Codolo e Bizzo, 2016, Turpin et al., 2009).

$$\overline{k_g a} = \frac{Q_G}{RT h_T A_T} \ln \ln \left( \frac{C_{SO_2,E}}{C_{SO_2,S}} \right) \quad (4)$$

Em que  $Q_G$  é a vazão do gás [m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>],  $R$  é a constante universal dos gases [8314,46 m<sup>3</sup> Pa K<sup>-1</sup> kmol<sup>-1</sup>],  $T$  a temperatura [K],  $h_T$  a altura da torre [m],  $A_T$  a área da torre [m<sup>2</sup>]

## RESULTADOS

A eficiência de remoção do SO<sub>2</sub> foi primeiramente avaliada em função da velocidade superficial do gás no interior da torre de nebulização ( $U_G$ ). A Figura 2 apresenta a eficiência de remoção do SO<sub>2</sub> em função de  $U_G$  para todas as condições experimentais realizadas nesse trabalho, com as respectivas velocidades superficiais do líquido ( $U_L$ ) utilizadas em cada configuração de bicos pulverizadores.

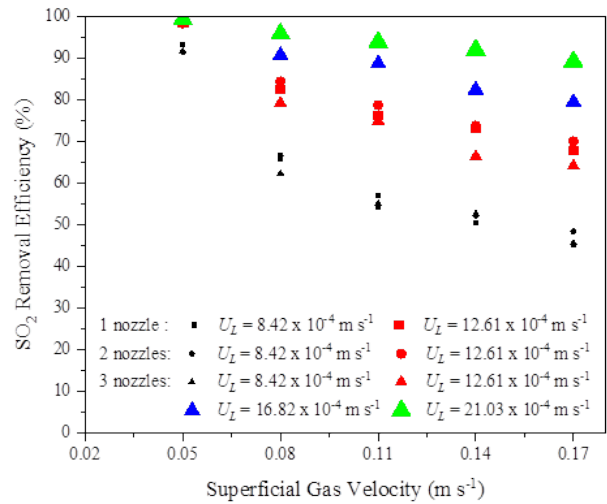


Figura 2: Eficiência de remoção em função da velocidade do Gás para todas as condições de operação.

Como pode ser observado na Figura 2, o aumento da velocidade superficial do gás diminuiu significativamente a eficiência de remoção, o que pode ter sido ocasionado pela redução no tempo de residência do gás dentro da torre, que reduziu o tempo de contato entre o gás e o líquido dificultando a absorção do poluente, como já foi evidenciado em outros estudos, como nos de Bandyopadhyay e Biswas (2012), Codolo e Bizzo (2013) e Jia et al. (2017).

Assim como nos estudos de Lim et al. (2013) e Turpin et al. (2008), a velocidade superficial do líquido desempenhou um papel muito importante na eficiência de remoção. O aumento no valor dessa variável aumentou a eficiência de remoção para todos os casos, devido ao aumento na pressão de pulverização, o que levou à geração de gotas com menores diâmetros, aumentando a área interfacial disponível para transferência de massa.

Outra observação que vale ressaltar é que o aumento da velocidade superficial do líquido diminuiu a influência da velocidade superficial do gás na eficiência de remoção SO<sub>2</sub>. Esse fato pode ser explicado pelo maior tempo de residência das gotas dentro da torre, ocasionado pelo arrasto, principalmente, das gotas com menor diâmetro, aumentando a área para transferência de massa e o tempo de contato entre o gás e o líquido, o que promoveu a maior taxa de absorção (Codolo e Bizzo, 2016). Esse fenômeno pode ser observado claramente na Figura 2 para as  $U_L$  de  $16.82 \times 10^{-4}$  m s<sup>-1</sup> e de

$21.03 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$  para os experimentos com três bicos pulverizadores.

O estudo de Codolo e Bizzo (2013) mostrou que diâmetros de orifício menores levam a um maior valor de eficiência de remoção, o que é explicado pelo aumento da área interfacial promovido pelo aumento da pressão de pulverização. Esse estudo também mostrou que o número de bicos utilizados pode afetar a eficiência de remoção, pois muda o volume da torre preenchido por gotas, ou seja, quanto maior o número de bicos utilizados, maior o volume da torre preenchido por gotas.

Observando a Figura 2 não foram notadas mudanças significativas nos resultados, ao comparar as diferentes configurações de bicos pulverizadores utilizadas nos experimentos (1 bico centralizado com  $Do = 2.4 \times 10^{-3}$ , 2 bicos equidistantes com  $Do = 1.6 \times 10^{-3}$  e 3 bicos equidistantes com  $Do = 1.6 \times 10^{-3}$ ). Entretanto, foi observado uma pequena redução na eficiência de remoção para a configuração de 3 bicos para  $U_L$  de  $12.61 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ . Era esperado que essa configuração fosse a mais eficiente, devido ao diâmetro de orifício dos bicos ser igual a  $1.6 \times 10^{-3} \text{ m}$  e por ter 3 bicos, o que produziria gotas com menor diâmetro e promoveria uma maior ocupação do volume da torre por gotas. Essa redução na eficiência para essa condição pode ter ocorrido pela pequena formação do filme de líquido na parede da torre, pois essa foi a única condição que apresentou esse fenômeno (Codolo e Bizzo, 2016).

A diferença mais significativa nos resultados apresentados na Figura 2, está entre as  $U_L$  de  $8.42 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$  e  $12.61 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ , que são as menores velocidades. Nessas condições, se pode observar a maior influência da velocidade superficial do gás na eficiência de remoção. O aumento de  $U_G$  diminui o tempo de residência do gás dentro da coluna, reduzindo o tempo de contato entre a fase gasosa e a fase líquida. A menor  $U_L$  diminui a pressão de pulverização, produzindo gotas de maior diâmetro, o que reduz a área disponível para transferência de massa. Esses dois fatores combinados reduzem significativamente a eficiência de remoção.

O conjunto de 3 bicos pulverizadores foi o único conjunto capaz de atingir as maiores velocidades superficiais de líquido ( $U_L$  de  $16.82 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$  e  $21.03 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ ), desse modo

foi o que resultou nas maiores eficiências de remoção, assim como, foi o conjunto de bicos que apresentou menor influência de  $U_G$  devido ao aumento na geração de gotas com menores diâmetro que são mais suscetíveis ao arrasto da corrente de gás e também levam ao aumento da área interfacial.

O melhor resultado, com 99.47% de eficiência de remoção do  $\text{SO}_2$ , foi obtido para a condição de 3 bicos pulverizadores, com  $U_G$  de  $0.05 \text{ m s}^{-1}$  e  $U_L$  de  $21.03 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ . Esse resultado era esperado devido à baixa velocidade do gás, que permitiu seu maior tempo de residência dentro da torre. A alta velocidade superficial do líquido e a maior quantidade de bicos pulverizadores gerou uma maior quantidade de gotas e um maior volume da torre ocupado por essas gotas, o que levou a uma maior área interfacial para transferência de massa. Todos esses fatores combinados permitiram que a fase gasosa tivesse maior contato e tempo de residência possível com a fase líquida, elevando a eficiência de remoção. Entretanto, para que essa condição fosse atingida, foi necessária uma relação  $L/G$  muito elevada, como é mostrado na Figura 3, que apresenta a eficiência de remoção do  $\text{SO}_2$  em função da relação  $L/G$  para todas as condições experimentais realizadas nesse trabalho, com as respectivas vazões de líquido utilizadas em cada configuração de bicos pulverizadores.

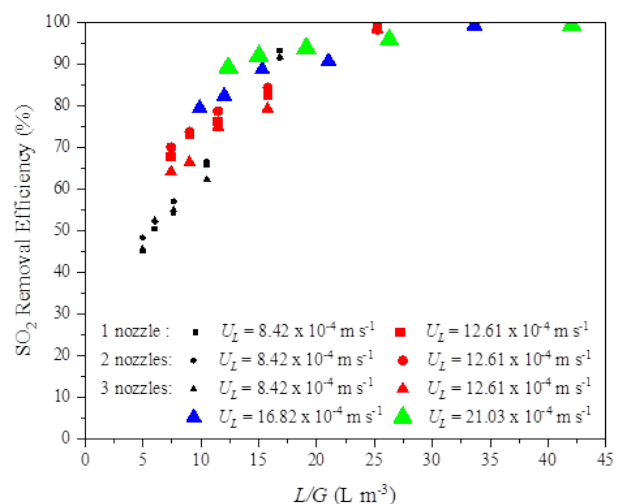


Figura 3. Eficiência de remoção de  $\text{SO}_2$  em função da relação  $L/G$  para todas as condições de operação.

Na Figura 3 é possível observar que conforme a relação  $L/G$  aumenta, o aumento da eficiência de remoção é mais significativo para



as velocidades superficiais do líquido de  $8.42 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$  e  $12.61 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ . Entretanto, para  $U_L = 21.03 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$  (3 bicos), que resultou na melhor eficiência de remoção, a influência da relação  $L/G$  foi baixa. Segundo constatado por Jafari et al. (2018) e Codolo (2010), as condições de pulverização são muito importantes na produção da área interfacial para transferência de massa, conseqüentemente, somente o aumento da relação  $L/G$  não é suficiente para elevar a remoção, principalmente ao se operar com velocidades superficiais do líquido muito elevadas.

Para a mesma velocidade superficial do líquido ( $U_L$  de  $8.42 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ ) é possível notar que, os resultados de eficiência foram muito semelhantes, mesmo para condições de bicos pulverizadores e diâmetros de orifício dos bicos diferentes.

A configuração de 3 bicos com  $D_o$  de  $1.6 \times 10^{-3} \text{ m}$  apresentou resultados um pouco inferiores, principalmente para as relações  $L/G$  menores. Esse fato pode ser explicado devido a essa condição ser a única que apresentou a formação do filme de líquido na parede da torre e também, por ser a condição que possuiu a maior interação entre os jatos de gotas, o que pode ter interferido na área interfacial. A interação entre os jatos pode ter promovido a coalescência das gotas, que é a união das gotas, produzindo assim gotas de maior diâmetro e reduzindo a área interfacial (Codolo e Bizzo, 2013).

O melhor resultado de eficiência de remoção, com 99.47%, foi atingido pela condição com 3 bicos e para  $U_L$  de  $21.03 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ . Entretanto, para essa condição ser atingida foi necessário que a relação  $L/G$  fosse maior do que  $40 \text{ L m}^{-3}$ . Como já foi explicado anteriormente, somente aumentar essa relação não é suficiente para melhorar a remoção do  $\text{SO}_2$  e esse fato fica bastante evidente na Figura 3, uma vez que as relações  $L/G$  maiores que  $25 \text{ L m}^{-3}$  não aumentaram significativamente a eficiência de remoção.

A Fig. 3 também mostra que é possível atingir remoções acima de 90% com relações  $L/G$  menores do que  $20 \text{ L m}^{-3}$ . Isso é bastante importante, pois reduz o consumo de solução e custos com o bombeamento de solução, que são fatores muito relevantes para a otimização das torres de nebulização.

Assim como a eficiência de remoção do  $\text{SO}_2$ , o parâmetro  $k_g a$  foi analisado em função da velocidade superficial do gás no interior da torre de nebulização ( $U_G$ ). A Figura 4 apresenta os resultados obtidos para o  $k_g a$  em função da velocidade superficial do gás para todas as configurações de bicos pulverizadores e as respectivas velocidades superficiais do líquido utilizada em cada condição.

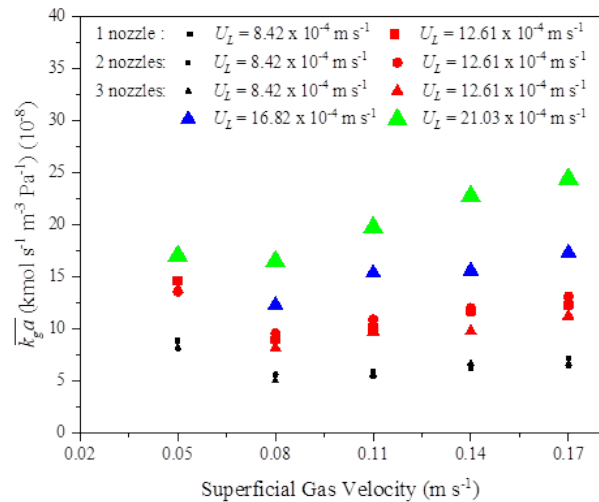


Figura 4:  $k_g a$  em função a velocidade do gás para todas as condições de operação.

Na Figura 4 é possível observar que as condições experimentais para  $U_G$  de  $0.05 \text{ m s}^{-1}$ , exceto para condição de 3 bicos com  $U_L$  de  $21.03 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ , apresentaram os maiores resultados para o  $k_g a$ . Esses resultados foram inesperados, pois o coeficiente volumétrico de transferência de massa da fase gasosa é diretamente proporcional à velocidade do gás, conforme a Equação 4, ou seja, se entende que o aumento ou diminuição do  $k_g a$  estaria diretamente relacionado ao aumento ou diminuição da velocidade do gás.

Ao observar as condições experimentais com  $U_G$  acima de  $0.08 \text{ m s}^{-1}$ , foi notado que o aumento da velocidade do gás proporciona o aumento do  $k_g a$ . O estudo de Javed et al. (2006) mostrou que, em torres contracorrente, o aumento da velocidade do gás proporciona um maior tempo de residência das gotas dentro do equipamento, principalmente daquelas com menor diâmetro, devido ao arrasto, permitindo uma maior absorção do poluente. Assim como

na eficiência de remoção, o aumento da velocidade superficial do líquido gerou uma maior pressão de pulverização, o que acarretou gotas de menor diâmetro e criou uma maior área interfacial para transferência de massa, consequentemente aumentando o  $\overline{k_g a}$ .

Bicos pulverizadores com diâmetro de orifício menor produzem gotas menores, devido ao aumento na pressão de pulverização. Segundo CHO et al. (2018), maiores pressões de pulverização criam distribuições e tamanhos mais uniformes das gotas e melhoram a absorção do poluente.

Era esperado que o bico pulverizador com o menor diâmetro de orifício ( $D_o$   $1.6 \times 10^{-3}$  m), atrelada à configuração que tem um maior preenchimento do volume da torre por gotas, no caso 3 bicos, produziu gotas menores, aumentando o  $\overline{k_g a}$ , por conta da maior área interfacial. Entretanto, ao observar a Figura 4, isso não aconteceu e na realidade se notou uma pequena piora no coeficiente, mais nitidamente para  $U_L$  de  $12.61 \times 10^{-4}$  m s<sup>-1</sup>. Isso pode ter acontecido devido à coalescência das gotas e à formação do filme de líquido Codolo e Bizzo (2016).

Conforme mostrado no estudo de Codolo e Bizzo (2016), o filme de líquido reduz significativamente a área interfacial disponível para transferência de massa devido à redução da vazão de líquido na forma de gotas. A área interfacial é composta pela área de gotas e a área do filme de líquido, conforme as gotas se incorporam ao filme por conta do choque com a parede da coluna, diminui a área de gotas. Entretanto, a área do filme não aumenta, permanecendo constante. A diminuição na área interfacial pode promover um efeito negativo tanto na eficiência de remoção quanto no  $\overline{k_g a}$ , como foi observado para a condição de 3 bicos.

Ao observar a Figura 4, o aumento da velocidade superficial do gás levou ao aumento do  $\overline{k_g a}$  sendo que para o conjunto de três bicos pulverizadores na velocidade superficial do líquido de  $21.03 \times 10^{-4}$  m s<sup>-1</sup> foram obtidos os melhores resultados. Isso ocorreu devido ao menor diâmetro de gotas produzido.

O melhor resultado foi obtido para a condição de 3 bicos com velocidade superficial do gás de  $0.17$  m s<sup>-1</sup> e velocidade superficial do líquido de  $21.03 \times 10^{-4}$  m s<sup>-1</sup> e apresentou

$\overline{k_g a}$  de  $24.46 \times 10^{-8}$  kmol s<sup>-1</sup> m<sup>-3</sup> Pa<sup>-1</sup>. Essa mesma condição também apresentou  $L/G$  de  $12.37$  L m<sup>-3</sup> e eficiência de remoção de 89.36%.

## CONCLUSÕES

O estudo experimental realizado nesse trabalho apresentou a capacidade da torre de nebulização para remover SO<sub>2</sub> em diferentes condições de operação. A influência da velocidade superficial do gás e do líquido, o diâmetro de orifício e número de bicos pulverizadores foram avaliados em função dos dados experimentais. Foi possível observar nos experimentos a importância que  $U_L$  exerce no processo de absorção do SO<sub>2</sub>, pois essa variável está diretamente relacionada a área interfacial disponível para transferência de massa. Seu aumento produz uma maior pressão de pulverização nos bicos, que por consequência, geram gotas menores, criando uma maior área interfacial. Isso é mais evidente em bicos com menor diâmetro de orifício, pois a pressão de pulverização nesses bicos é maior.

Para atingir a melhor condição de eficiência que apresentou 99.47% de remoção, foi necessário utilizar a maior  $U_L$ . Entretanto, para as  $U_L$  mais elevadas, não houve mudanças significativas na eficiência de remoção. Esse aumento da  $U_L$  levou a maiores relações  $L/G$  e exigiu um maior consumo de solução, sem produzir resultados que justificassem o elevado consumo de água.

A maior área interfacial gerada por elevadas  $U_L$ , contribuiu com o aumento do  $\overline{k_g a}$ . Combinada as maiores  $U_G$ , essas duas variáveis podem produzir os maiores coeficientes, devido ao maior tempo de residência das gotas de menor diâmetro no interior da torre, causado pelo arrasto dessas gotas na corrente de gás.

Para as diferentes configurações de número de bicos pulverizadores, não se notou grandes variações nos resultados. Ao se utilizar mais bicos, o volume interno da torre de nebulização é mais bem preenchido por gotas. Contudo, a condição de três bicos se mostrou um pouco inferior às outras duas, isso revelou o grande impacto que a coalescência das gotas e a formação do filme de líquido tem na redução da área interfacial para transferência de massa.

Esse trabalho conseguiu produzir uma quantidade considerável de dados

experimentais para o processo de remoção do SO<sub>2</sub> via torre de nebulização. O estudo experimental demonstrou a importância da influência das diversas variáveis que envolvem o processo de absorção e que é possível atingir elevadas eficiências de remoção sem precisar de colunas tão altas e com menor consumo de solução.

## NOMENCLATURA

$A_T$	área da torre (m <sup>2</sup> )
$C_{SO_2,E}$	concentração de SO <sub>2</sub> na entrada da torre (kmol m <sup>-3</sup> )
$C_{SO_2,S}$	concentração de SO <sub>2</sub> na saída da torre (kmol m <sup>-3</sup> )
$D_o$	diâmetro de orifício do bico (m)
$H$	constante da lei de Henry (Pa)
$h_T$	altura da torre (m)
$K_g$	coeficiente global de transferência de massa da fase gasosa (kmol s <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> Pa <sup>-1</sup> )
$k_g$	coeficiente individual de transferência de massa da fase gasosa (kmol s <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> Pa <sup>-1</sup> )
$\overline{k_g a}$	coeficiente volumétrico médio de transferência de massa da fase gasosa (kmol m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> Pa <sup>-1</sup> )
$L/G$	relação entre líquido e gás (L m <sup>-3</sup> )
$Q_G$	vazão volumétrica de gás (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
$Q_L$	vazão volumétrica de líquido (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
$R$	constante universal dos gases (8314,46 m <sup>3</sup> Pa K <sup>-1</sup> kmol <sup>-1</sup> )
$T$	temperatura (K)
$U_G$	velocidade superficial do gás (m s <sup>-1</sup> )
$U_L$	velocidade superficial do líquido (m s <sup>-1</sup> )

## REFERÊNCIAS

- DE NEVERS, N. (2000), Air Pollution Control Engineering, 2nd ed., McGraw-Hill, New York.
- D. FLAGIELLO, D., DI NATALE, F., CAROTENUTO, C., ERTO, A., LANCIA, A. (2018), Seawater desulphurization of simulated flue gas in spray and packed columns: An experimental and modelling comparison, Chem. Eng. Trans. Vol 69, p. 799–804. <https://doi.org/10.3303/CET1869134>.
- Bandyopadhyay, A., Biswas, M.N. (2007), Spray scrubbing of particulates with a critical flow atomizer, Chem. Eng. Technol. Vol 30, p. 1674–1685. <https://doi.org/10.1002/ceat.200700230>.
- BOZORGI, Y., KESHAVARZ, P., TAHERI, M., FATHIKALJAH, J. (2006), Simulation of a spray scrubber performance with Eulerian/Lagrangian approach in the aerosol removing process, J. Hazard. Mater. Vol 137, p. 509–517. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.02.037>.
- TURPIN, A., COUVERT, A., LAPLANCHE, A., PAILLIER, A. (2008), Experimental study of mass transfer and H<sub>2</sub>S removal efficiency in a spray tower, Chem. Eng. Process. Process Intensif. Vol. 47, p. 886–892. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2007.02.002>.
- BANDYOPADHYAY, A., BISWAS, M.N. (2012), CO<sub>2</sub> capture in a spray column using a critical flow atomizer, Sep. Purif. Technol. Vol 94, p. 104–114. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.11.039>.
- DARAKE, S., HATAMIPOUR, M.S., RAHIMI, P., HAMZELOUI, A. (2016), SO<sub>2</sub> removal by seawater in a spray tower: Experimental study and mathematical modeling, Chem. Eng. Res. Des. Vol. 109, p. 180–189. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.11.027>.
- JAFARI, M.J., MATIN, A.H., RAHMATI, A., AZARI, M.R., OMIDI, L., HOSSEINI, S.S., PANAHI, D. (2018), Experimental optimization of a spray tower for ammonia removal, Atmos. Pollut. Res. Vol. 9, p. 783–790. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.01.014>.
- CHO, M., LEE, S., CHOI, M., LEE, J.W. (2018), Novel Spray Tower for CO<sub>2</sub> Capture Using Uniform Spray of Monosized Absorbent Droplets, Ind. Eng. Chem. Res. Vol. 57, p. 3065–3075. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b05309>.
- WANG, Z., PENG, Y., REN, X., GUI, S., ZHANG, G. (2015), Absorption of sulfur dioxide with sodium hydroxide solution in spray columns, Ind. Eng.



- Chem. Res. Vol. 54, p. 8670–8677.  
<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b02146>
- ZHU, J., LIU, Z., BAI, J. YANG, Y. PENG, Q., YE, CHEN, S. M. (2016), Modeling and experimental studies of ammonia absorption in a spray tower, Korean J. Chem. Eng. Vol. 33, p. 63–72.  
<https://doi.org/10.1007/s11814-015-0056-4>.
- CODOLO, M. C., BIZZO, W.A. (2013), Experimental study of the SO<sub>2</sub> removal efficiency and volumetric mass transfer coefficients in a pilot-scale multi-nozzle spray tower, Int. J. Heat Mass Transf. Vol. 66, p. 80–89.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.07.011>.
- CODOLO, M.C., BIZZO, W.A. (2016), Mass Transfer and Liquid-Film Formation in a Spray Tower for SO<sub>2</sub> Removal in Sodium Hydroxide Solution, Chem. Eng. Technol. Vol. 39, p. 1939–1945.  
<https://doi.org/10.1002/ceat.201500389>.
- TURPIN, A., COUVERT, A. LAPLANCHE, A. PAILLIER, A. (2009), Mass transfer and deodorization efficiency in a countercurrent spray tower for low superficial gas velocities, Can. J. Chem. Eng. Vol. 87, p. 53–59.  
<https://doi.org/10.1002/cjce.20084>.
- JIA, Y., YIN, L., XU, Y., CHEN, Y. DING, X. (2017), Simulation of the absorption of SO<sub>2</sub> by ammonia in a spray scrubber, Chem. Eng. Process. - Process Intensif. Vol. 116, p. 60–67.  
<https://doi.org/10.1016/j.cep.2017.03.001>.
- LIM, Y., CHOI, M., HAN, K., YI, M. LEE, J. (2013), Performance characteristics of CO<sub>2</sub> capture using aqueous ammonia in a single-nozzle spray tower, Ind. Eng. Chem. Res. Vol. 52, p. 15131–15137.  
<https://doi.org/10.1021/ie401981u>.
- CODOLO, M. C. (2010), Avaliação Experimental da Absorção de SO<sub>2</sub> e Estudo Preliminar da Absorção de NO em Torre de Nebulização, Universidade Estadual de Campinas – SP, 141 p. (tese de doutorado).
- JAVED, K.H., MAHMUD, T., PURBA, E. (2006), Enhancement of mass transfer in a spray tower using swirling gas flow, Chem. Eng. Res. Des. Vol. 84, p. 465–477.  
<https://doi.org/10.1205/cherd.05119>.