

XI-026 – FILTRO COM ÓXIDO DE FERRO NANOESTRUTURADO APLICADO À DESSULFURIZAÇÃO DE BIOGÁS

Djema Maria Cristiano ⁽¹⁾

Graduada em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Graduação Sanduíche na École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, França. Mestranda em Engenharia Ambiental na UFSC.

Débora Fernanda Horn Gonçalves ⁽²⁾

Graduada em Engenharia Sanitária e Ambiental na Universidade Federal de Santa Catarina.

Armando Borges de Castilhos Jr. ⁽³⁾

Graduado em Engenharia Sanitária e Ambiental pela UFSC. Doutor em Gestão e Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos e Industriais pelo Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, França (1988). Pós-doutorado pela University of Califórnia, Estados Unidos (2012). Professor do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina.

Rejane Helena Ribeiro da Costa ⁽⁴⁾

Graduada em Engenharia Civil pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de São Carlos (1980). Doutora em Tratamento e Qualidade das Águas pelo Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, França (1989). Pós-doutorado pela Université Montpellier I, França (2000). Professora do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina.

Paulo Belli Filho ⁽⁵⁾

Graduado em Engenharia Sanitária e Ambiental pela UFSC. Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de São Carlos (1985). Doutor em Química Industrial e Ambiental – Université de Rennes I (1995). Pós-doutorado na École Polytechnique de Montreal (2005). Professor do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina.

Endereço ⁽¹⁾: Laboratório de Efluentes Líquidos e Gasosos. Campus universitário – Centro tecnológico – Trindade, Florianópolis, SC – Brasil. Caixa Postal 476. Tel: (48) 3721-7743 - e-mail: djemacristiano@gmail.com

RESUMO

O potencial energético do biogás tem sido amplamente reconhecido e técnicas têm sido desenvolvidas para aumentar sua qualidade e melhorar sua conversão em energia. O sulfeto de hidrogênio é o componente mais perigoso, tóxico e corrosivo do biogás e, assim, a sua remoção segura e eficiente é uma parte fundamental do processo de purificação para fins energéticos. O objetivo desta pesquisa é avaliar a remoção de H₂S com óxido de ferro nanoestruturado (OFN), visando ao estabelecimento de parâmetros para dimensionamento de unidade de dessulfurização de biogás. A fim de se determinar o desempenho do OFN, testes de adsorção foram conduzidos em reator de fluxo ascendente e contínuo (coluna de vidro), com a injeção de mistura sintética contendo a concentração de 200 ppmv de H₂S (balanço em N₂). Com base em testes preliminares, as velocidades espaciais de 2500, 3500 e 4500 h⁻¹ foram definidas como adequadas para o experimento. Os resultados demonstram que o tempo para a saturação completa do leito adsorvente aumenta com a diminuição da velocidade espacial, o que também resulta no aumento da capacidade de adsorção do OFN. A maior capacidade de adsorção foi verificada no ensaio com 2500 h⁻¹ e correspondeu a 6,75 mgH₂S.gOFN⁻¹, potencial este similar ao de produtos reconhecidamente comercializados com a finalidade de dessulfurização. Os testes de adsorção com óxido de ferro nanoestruturado mostraram que o seu uso é promissor na remoção de H₂S, no entanto, o OFN não apresentou grandes períodos com eficiência de 100% de H₂S removido. Assim, a investigação de condições experimentais mais satisfatórias ainda se faz necessária para a definição de elementos essenciais ao desenvolvimento de filtro com OFN aplicado à dessulfurização de biogás.

PALAVRAS-CHAVE: Biogás, Sulfeto de Hidrogênio, Adsorção, Óxido de ferro nanoestruturado.

INTRODUÇÃO

Com a crescente preocupação mundial em relação às mudanças climáticas, à qualidade do ar e à redução dos combustíveis fósseis, esforços estão sendo orientados no desenvolvimento de novas alternativas de energia (RASI et al., 2011). Resultante da degradação anaeróbia de resíduos orgânicos, o biogás representa uma forma potencial de energia limpa e sustentável. Tendo em vista que as suas principais fontes primárias de produção incluem estações de tratamento de esgoto e aterros sanitários, o uso energético do biogás é uma alternativa interessante do ponto de vista econômico e ambiental, com vantagens para ambos os setores de energia e saneamento (RYCKEBOSCH et al., 2011).

Devido ao alto conteúdo de metano, o biogás é um combustível renovável versátil que pode ser empregado na geração de eletricidade e calor, como combustível para veículos, como fonte de hidrogênio para células a combustível, ou ainda ser introduzido na rede de gás natural (WEILAND, 2010). Entretanto, a presença de contaminantes no biogás prejudica o processo de conversão de energia e, por isso, uma etapa de purificação deve ser prevista antes de seu aproveitamento energético. No que tange à purificação do biogás, a remoção de sulfeto de hidrogênio (dessulfurização) é um ponto crucial, uma vez que evita a corrosão de equipamentos de conversão de energia, reduzindo os custos de manutenção e operação do sistema, além de minimizar os teores de poluentes do gás de combustão (MONTELEONE et al., 2011).

Dentre as diversas técnicas empregadas na remoção de H_2S , a adsorção é reconhecida como a tecnologia mais comumente aplicada para alcançar baixos níveis deste poluente no biogás (MESCIA et al., 2011). Sabe-se que a adsorção por óxido de ferro é um dos métodos mais antigos utilizados na dessulfurização, com possibilidade de boas eficiências e recuperação da matriz adsorvente (ZICARI, 2003). Contudo, este método apresenta algumas desvantagens, como o alto custo e a alta quantidade de resíduos gerados. Dada a maior área superficial de nanopartículas de óxido de ferro, a aplicação destes materiais pode propiciar o aumento na potencialidade de remoção de H_2S e, por conseguinte, o aumento da vida útil do leito adsorvente e a redução de resíduos gerados.

Deste modo, este artigo tem como objetivo avaliar a aplicação de óxido de ferro nanoestruturado (OFN) na remoção de H_2S , visando ao estabelecimento de parâmetros para dimensionamento de unidade de dessulfurização de biogás. Além de possuir as vantagens de um nanomaterial, o OFN é fabricado a partir de resíduos da mineração, o que torna a sua utilização no tratamento de biogás viável do ponto de vista econômico e ambiental, contribuindo para a sustentabilidade na geração de energia.

MATERIAIS E MÉTODOS

A avaliação do potencial de dessulfurização do óxido de ferro nanoestruturado foi realizada a partir de testes de adsorção em escala laboratorial e à temperatura ambiente, com reator de leito fixo (coluna de vidro) e mistura sintética de H_2S .

O material adsorvente testado é produzido e comercializado por uma empresa de mineração de carvão em Santa Catarina - Brasil, como forma de aproveitar economicamente os seus resíduos, além de promover a destinação ambientalmente correta dos mesmos. O OFN apresenta-se no formato de pellets, com diâmetro médio de 2 mm e comprimentos de 3 a 10 mm. A matéria-prima empregada na fabricação do óxido de ferro é o lodo químico resultante do tratamento da drenagem ácida da mineração de carvão (DAM). A partir deste lodo, o adsorvente é obtido pelos processos de precipitação, peletização e tratamento térmico a 300°C (BARBOSA, 2013). Barbosa (2013) mostrou, através de técnicas de caracterização, que os adsorventes peletizados obtidos são constituídos por nanopartículas cristalinas de geometria acicular, em que o principal constituinte é o ferro na forma de hematita. Como este material é formado por nanopartículas, a sua área superficial é da ordem de 150 a 200 m^2/g , valor este bem superior à área superficial descrita na literatura para o óxido de ferro granular convencional.

O experimento de adsorção consistiu na injeção de gás sintético (200 ppmv de H_2S / balanço em N_2) pela base de um reator ($D_i=1,5$ cm) preenchido com o adsorvente OFN. O fluxo de gás foi ajustado através de reguladores de pressão (manômetro) e um controlador de vazão mássico (Aalborg®), com intervalo de medição de 0-4 $L.min^{-1}$. A concentração de H_2S na saída do reator foi determinada a cada 2 minutos por meio

do aparelho GEM 2000 (Landtec®), que possui uma célula acoplada para medição de H₂S com uma faixa de 0-200 ppmv (Figura 1).

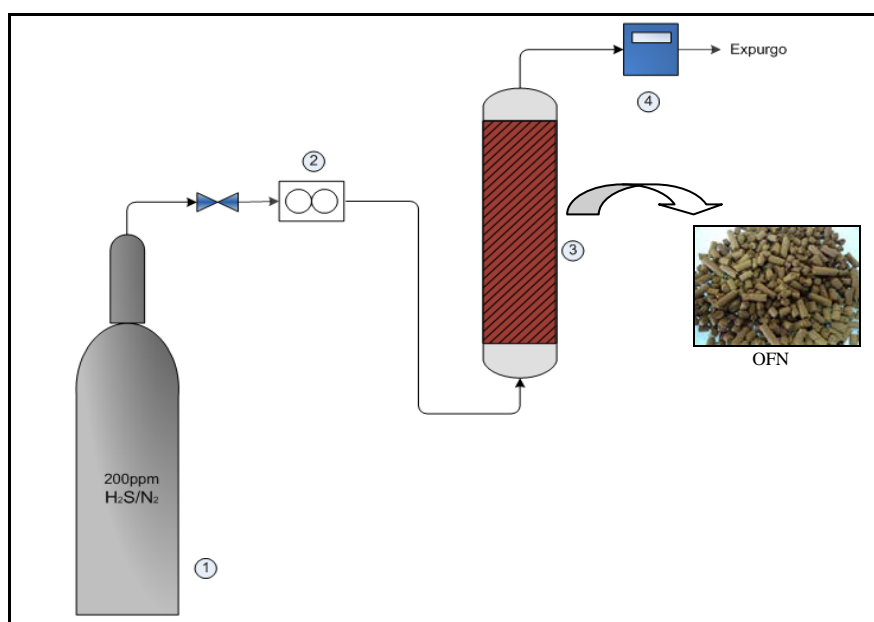


Figura 1: Testes de remoção de H₂S com óxido de ferro nanoestruturado (OFN).

(1) Cilindro com mistura gasosa 200 ppmv H₂S/N₂; (2) Controlador de fluxo mássico; (3) Reator de leito fixo com OFN; (4) Analisador da concentração de H₂S.

As condições experimentais dos ensaios de remoção de H₂S com OFN foram definidas através de testes preliminares, em que diferentes velocidades espaciais (entre 2500 e 9000 h⁻¹) foram testadas. A velocidade espacial (h⁻¹) é dada pela relação entre a vazão de operação do gás (l/h) e o volume do leito adsorvente (l), de acordo com a Equação 1 (MONTELEONE et al., 2011). Para cada velocidade espacial, o teste foi realizado até o tempo de ruptura, que corresponde ao tempo a partir do qual o leito começa a saturar e o soluto é detectado na saída da coluna. Neste trabalho, o tempo de ruptura foi considerado o ponto em que a concentração final equivale a 10% da concentração de entrada ($C = 0,1C_0$) (FAN et al., 2013).

$$v_{\text{espacial}} = \frac{Q_{\text{gás}}}{V_{\text{leito}}} \quad \text{Equação (1)}$$

Sendo v_{espacial} a velocidade espacial (h⁻¹); $Q_{\text{gás}}$ a vazão de alimentação do gás (l/h) e V_{leito} o volume do leito adsorvente (l).

A fim de se determinar a capacidade do óxido de ferro nanoestruturado na remoção de H₂S, testes de adsorção foram realizados até a saturação do adsorvente. Com base nos testes preliminares, as velocidades espaciais de 2500, 3500 e 4500 h⁻¹ foram definidas como adequadas para o experimento. Os ensaios foram feitos em triplicata para cada velocidade espacial, com os outros parâmetros constantes, conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1: Condições experimentais dos testes de adsorção com OFN.

Ensaio	Gás afluyente					Reator de leito fixo		
	v_e (h ⁻¹)	C_0 (ppmv)	Umidade	Q (l/h)	t_c (s)	h_{ads} (cm)	D_i (cm)	M_{OFN} (g)
1	4500	200	seco	40	0,8	5	1,5	8,5
2	3500	200	seco	31	1,0	5	1,5	8,5
3	2500	200	seco	22	1,4	5	1,5	8,5

v_e = velocidade espacial; t_c =tempo de contato; h_{ads} =altura do leito adsorvente; D_i =diâmetro interno; M_{OFN} =massa de óxido de ferro nanoestruturado.

Os testes de adsorção foram conduzidos até o ponto em que a concentração final de H₂S na saída da coluna se igualava à concentração de entrada, momento este em que o adsorvente está completamente saturado. Nos casos em que a saturação não foi atingida devido à grande estabilidade no final do processo, os ensaios eram interrompidos em 10 horas de operação.

Para a análise do processo de adsorção, curvas de ruptura foram feitas considerando-se a relação C/C₀ (Concentração de saída, medida pelo aparelho/ Concentração inicial – 200 ppmv H₂S) ao longo do tempo. A capacidade de adsorção do óxido de ferro (g H₂S/g OFN) foi determinada para uma condição próxima à saturação (C=0,8C₀), segundo a Equação 2.

$$q = \frac{C_0 Q}{m_{ads}} \int_0^t \left(1 - \frac{C}{C_0}\right) dt \quad \text{equação (2)}$$

Sendo q a capacidade de adsorção (g H₂S/g OFN); C_0 a concentração inicial de H₂S (g/l); C a concentração de saída de H₂S (g/l); Q vazão de alimentação do gás (l/h); t , tempo de operação do ensaio (h) e m_{ads} , a massa de OFN (g).

RESULTADOS

Os testes de adsorção de H₂S em óxido de ferro nanoestruturado com a aplicação de diferentes velocidades espaciais, obtidas variando-se a altura de leito e a vazão de gás, resultaram em diferentes tempos de ruptura (Tabela 2). As melhores eficiências na remoção de H₂S são alcançadas com grandes tempos de ruptura (≥ 1 h), os quais foram gerados pela aplicação de velocidade espacial igual ou inferior a 4500 h⁻¹. Esta velocidade espacial foi adotada como o valor máximo adequado para os testes de adsorção de H₂S em OFN.

Tabela 2: Tempo de ruptura para diversas configurações experimentais com o OFN.

h_{ads} (cm)	Q (L/h)	v_e (h ⁻¹)	Tempo de ruptura (min.)
9	41	2580	170
14	83	3300	144
7	41	3300	102
6	41	3900	74
5	40	4500	60
5	50	5600	6
6	63	6000	6
5	80	9000	< 2

v_e = velocidade espacial; h_{ads} =altura do leito adsorvente; Q = vazão de gás.

A velocidade espacial [T⁻¹] tem sido um parâmetro bastante utilizado na avaliação de processos de dessulfurização (SÁNCHEZ-HERVÁS et al., 2005; SISANI et al., 2014; LIANG et al., 2014). No presente estudo, diferentes velocidades espaciais foram aplicadas a ensaios de adsorção com o OFN, para se determinar a capacidade deste adsorvente na remoção de H₂S. A Figura 2 apresenta as curvas de ruptura referentes às três velocidades espaciais adotadas: 4.500, 3.500 e 2.500 h⁻¹. Cada curva corresponde à média das triplicatas dos ensaios, com o respectivo desvio padrão. A temperatura ambiente durante os ensaios foi 21,5 ± 1°C.

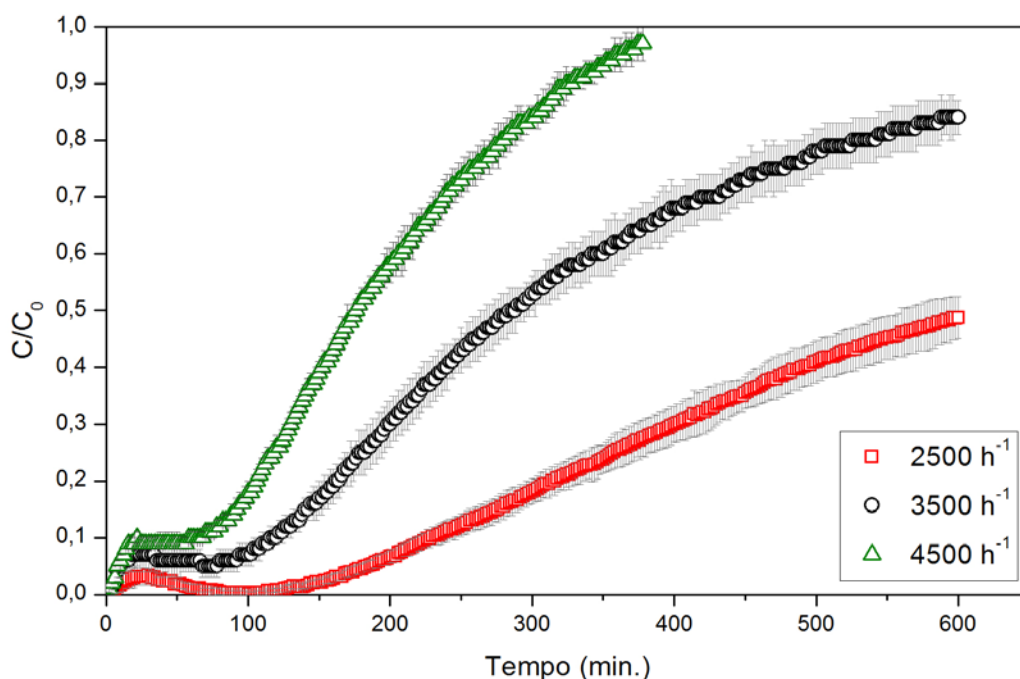


Figura 2: Curvas de ruptura para diferentes velocidades espaciais ($D_i=1,5$ cm; $h_{ads}=5$ cm; $C_0=200$ ppmv; gás seco).

A partir das curvas de ruptura, foi possível avaliar a evolução do processo de saturação do OFN pelo H_2S ao longo do tempo. No que se refere à maior velocidade espacial testada (4500 h^{-1}), a concentração de H_2S no gás de saída da coluna atingiu valores próximos a 200 ppmv após 6,5 horas de operação, quando o adsorvente foi considerado saturado. Para as velocidades espaciais de 3500 e 2500 h^{-1} , o processo de adsorção alcançou grande estabilidade e, portanto, a saturação do meio não foi observada em 10 horas de ensaio. Ao final deste período, a concentração de H_2S na saída chegou somente a 84 e 49% da concentração de entrada, quando a velocidade espacial era 3500 e 2500 h^{-1} , respectivamente.

A saturação do OFN foi proporcional ao aumento da velocidade espacial. A razão para isto é que maiores velocidades espaciais geram menores tempos de contato entre o H_2S e o OFN, o que conduz a um pequeno tempo até a saturação do leito (NWABANNE E IGBOKWE, 2012). Altas velocidades espaciais fazem com que o tempo de contato não seja suficiente para o H_2S ser adsorvido antes de o gás deixar a coluna (LIANG et al., 2014). Em estudos de Truong e Abatzoglou (2005) sobre a adsorção de H_2S em óxido de ferro, observou-se que a concentração de saída de H_2S diminuía com o aumento do tempo de contato. Logo, pode-se inferir que o tempo para a saturação do leito aumentou com a diminuição da velocidade espacial, em acordo com os resultados aqui apresentados.

Nos três diferentes ensaios, observou-se instabilidade no processo de adsorção durante os primeiros minutos. As concentrações de H_2S no gás efluente aumentaram rapidamente e, em seguida, mantiveram-se constante ou diminuíram por determinado período. Este comportamento foi também constatado em Bernal (2012), que estudou o uso deste mesmo material adsorvente (OFN) na remoção de contaminantes da água. A autora verificou que a adsorção nos pellets de OFN é instável durante os minutos iniciais, e após o equilíbrio é alcançado lentamente devido às restrições difusionais. Sugere-se que, com alturas de leito maiores, a adsorção seja mais estável no período inicial, e o ponto de ruptura possa ser mais bem observado.

Embora a instabilidade verificada, a análise da saturação do OFN demonstra que este possui potencial de adsorção comparável ao do carvão ativado. Bonatto (2013) avaliou duas marcas comerciais de carvão ativado na remoção de H_2S , com condições experimentais equivalentes a deste estudo ($D_i=1,5$ cm, $h_{ads}=5,0$ cm e

$C_0=200$ ppmv). Utilizando-se a mesma velocidade espacial de 4500 h^{-1} , o tempo de saturação foi 220 e 520 minutos para as marcas Norit e Pelegrini, respectivamente. No tocante ao OFN, a saturação foi alcançada em 380 minutos, indicando que este adsorvente apresenta boas eficiências na remoção de H_2S . Todavia, vale ressaltar que o carvão ativado exibiu maiores tempos com eficiência de 100% e melhor estabilidade no início da adsorção, o que é mais apropriado para um sistema de dessulfurização.

Com base no balanço de massa de H_2S na coluna, a capacidade de adsorção foi obtida e relacionada à velocidade espacial (Tabela 2). Nota-se que a capacidade de adsorção do OFN diminui com o aumento da velocidade espacial. Assim, a maior capacidade de adsorção foi verificada no ensaio com 2500 h^{-1} , que gerou o valor de $6,75 \text{ mg}_{\text{H}_2\text{S}} \cdot \text{g}_{\text{OFN}}^{-1}$. A análise estatística (ANOVA) dos valores de capacidade de adsorção do OFN determinou que há diferença estatística entre as médias ao nível de significância de 95% ($p < 0,05$). Deste modo, a velocidade espacial aplicada tem influencia na capacidade de adsorção do OFN em 95% dos casos.

Tabela 3: Análise estatística ANOVA dos valores de capacidade de adsorção do OFN.

v_e (h^{-1})	Capacidade de adsorção ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) Média	Desvio padrão ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	p
4500	3,718	0,020	6,22E-05
3500	5,506	0,116	
2500*	6,754	0,029	

C/C_0 = relação da concentração de H_2S na saída e entrada da coluna; v_e = velocidade espacial; p=p-value adotado em testes de significância.

*Estimado pelo prolongamento da curva de ruptura.

Os valores de capacidade de adsorção do óxido de ferro nanoestruturado foram bastante superiores aos estimados para o óxido de ferro granular (98% hematita) estudado em Becker (2013). O autor obteve a capacidade máxima de remoção de H_2S igual a $0,23 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, mediante testes de adsorção à mesma concentração inicial de H_2S (200 ppmv) e menor velocidade espacial (600 h^{-1}). Pode-se concluir que, nas mesmas condições operacionais, o uso do OFN seria muito mais eficiente na remoção de H_2S .

No que diz respeito ao produto comercial Sulfatreat 410 HP®, o qual contém óxidos de ferro além de ingredientes ativadores, Truong e Abatzoglou (2005) encontraram o valor máximo de $110 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ para a capacidade de adsorção de H_2S na saturação completa do adsorvente. Entretanto, esta alta capacidade foi obtida por meio da aplicação de grande tempo de contato ($t_c=1 \text{ min.}$), o que produziu uma reduzida velocidade espacial de 60 h^{-1} . Já Di Felice e Pagliai (2015), com a adoção de velocidade espacial de 2500 h^{-1} ($t_c=1,42 \text{ s}$) e concentração inicial máxima de 150 ppmv de H_2S , atingiram uma remoção muito inferior, que correspondeu a $6,50 \text{ mg}$ deste gás por grama de Sulfatreat 410 HP® até o ponto de saturação. Verifica-se que este último valor é sensivelmente menor à capacidade de adsorção do OFN na mesma velocidade espacial ($6,75 \text{ mg}_{\text{H}_2\text{S}} \cdot \text{g}_{\text{OFN}}^{-1}$). Isto denota que o potencial do OFN pode ser similar ao de produtos reconhecidamente comercializados com a finalidade de dessulfurização.

CONCLUSÕES

Os testes de adsorção com óxido de ferro nanoestruturado mostraram que o seu uso é promissor na remoção de H_2S . Contudo, o OFN não apresentou grandes períodos com eficiência de 100% de H_2S removido, em virtude da instabilidade inicial do processo de adsorção, que acelerou a ruptura do adsorvente. Acredita-se que velocidades espaciais menores que 2500 h^{-1} e alturas de leito superiores a 10 cm garantam uma melhor estabilidade do OFN até a sua ruptura e, assim, grandes eficiências de adsorção. Outras condições operacionais devem ser também investigadas quanto à influência no processo adsorptivo, tais como umidade do gás e concentração inicial de H_2S . Deste modo, testes de adsorção são ainda necessários para o conhecimento do real potencial do OFN na remoção de H_2S , o que permitirá a definição de parâmetros essenciais ao desenvolvimento de filtro com óxido de ferro nanoestruturado aplicado à dessulfurização de biogás.

Tendo em vista que o OFN é fabricado a partir de resíduos da indústria mineradora e, por isso, é um material a baixo custo, o seu uso torna-se vantajoso na remoção de H_2S perante outros reconhecidos adsorventes. Além

disso, o satisfatório desempenho do OFN à temperatura ambiente é essencial para a viabilidade ambiental e econômica dos sistemas de purificação de biogás.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BARBOSA P.R.M. Aplicação de óxidos de ferro peletizados como adsorvente para a remoção de arsênio dissolvido em água. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Florianópolis, 2013.
2. BECKER, H. R. Remoção de H₂S por meio de adsorção em óxido de ferro granular. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina – Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental. Florianópolis, 2013.
3. BERNAL, P.A.M. Obtenção, caracterização e aplicação de óxidos de ferro como adsorventes para a remoção de contaminantes dissolvidos em água. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina – Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Florianópolis-SC, 2012.
4. BONATTO, I. da C. Remoção de H₂S através de adsorção por carvão ativado. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina – Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental. Florianópolis, 2013.
5. DI FELICE, R.; PAGLIAI, P. Prediction of the early breakthrough of a diluted H₂S and dry gas mixture when treated by Sulfatreat commercial sorbent. Biomass and bioenergy, v. 74, p. 244-252, 2015.
6. FAN H.L., et al. Three-Dimensionally Ordered Macroporous Iron Oxide for Removal of H₂S at Medium Temperatures. Environmental Science & Technology, v. 47, n. 9, p. 4859-65, 2013.
7. LIANG, M. et al. The removal of H₂S derived from livestock farm on activated carbon modified by combinatory method of high-pressure hydrothermal method and impregnation method. Adsorption, v. 20, p. 525-531, 2014.
8. MESCIA, D. et al. MSW landfill biogas desulfurization. International journal of hydrogen energy, v. 36, p. 7884-7890, 2011.
9. MONTELEONE G., et al. Deep H₂S removal from biogas for molten carbonate fuel cell (MCFC) systems. Chemical Engineering Journal, v. 173, p. 407– 414, 2011.
10. NWABANNE, J. T.; IGBOKWE, P. K. Adsorption Performance of Packed Bed Column for the removal of Lead (ii) using oil Palm Fibre. International Journal of Applied Science and Technology, v. 2, n.. 5, 2012.
11. RASI, S.; LÄNTELÄ, J.; RINTALA, J. Trace compounds affecting biogas energy utilisation – a review. Energy Convers. Manage, v. 52, p. 3369–3375, 2011.
12. RYCKEBOSCH, E.; DROUILLON, M.; VERVAEREN, H. Techniques for transformation of biogas to biomethane. Biomass and Bioenergy, v. 35, p. 1633-1645, 2011.
13. SÁNCHEZ-HERVÁS, J.M. et al. A study on sulphidation and regeneration of Z-Sorb III sorbent for H₂S removal from simulated ELCOGAS IGCC syngas. Chemical Engineering Science, v. 60, p. 2977-2989, 2005.
14. SISANI, E. et al. Adsorptive removal of H₂S in biogas conditions for high temperature fuel cell systems. International journal of hydrogen energy, v. 39, p. 21753-21766, 2014.
15. TRUONG, N. e ABATZOGLOU. A H₂S reactive adsorption process for the purification of biogas prior to its use as a bioenergy vector. Biomass and Bioenergy, v. 29, p. 142–151, 2005.
16. WEILAND, P. Biogas production: current state and perspectives. Appl. Microbiol. Biotechnol, v. 85, p. 849-860, 2010.
17. ZICARI, S. M. Removal of hydrogen sulfide from biogas using cow-manure compost. Dissertação de mestrado em Ciência. Department of biological and Environmental Engineering, Cornell, Ithaca, 2003.