

II-397 - AVALIAÇÃO DA MICROAERAÇÃO COMO ALTERNATIVA TECNOLÓGICA PARA REMOÇÃO DO SULFETO DE HIDROGÊNIO PRODUZIDO EM REATORES ANAERÓBIOS (UASB) TRATANDO ESGOTO DOMÉSTICO

Iacy Maria Pereira de Castro⁽¹⁾

Engenheira Ambiental pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE. Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG.

Letícia de Souza Alves⁽²⁾

Graduando em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Bolsista no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - DESA da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

Celio Moura Tolentino⁽³⁾

Graduando em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Bolsista no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - DESA da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG.

Cláudio Leite de Souza⁽⁴⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Viçosa - UFV. Mestre e Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG.

Endereço⁽¹⁾: Avenida Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - Belo Horizonte - MG - CEP: 31270-901 - Brasil - Tel: (31) 3319-1025 - e-mail: yacycastro@gmail.com

RESUMO

Formas oxidadas do enxofre (ex. sulfatos), em tratamento de esgoto doméstico em condições anaeróbias, inevitavelmente, são bioquimicamente reduzidas a sulfetos, que como sulfeto de hidrogênio (H₂S) gasoso transfere-se para o biogás. Os problemas associados à formação e liberação de H₂S decorrem do fato do mesmo ser um gás de odor desagradável, corrosivo e tóxico. Nessa perspectiva, se faz necessário o estudo de técnicas que diminuam os problemas associados ao sulfeto e possibilitem a valorização dos subprodutos gerados no processo anaeróbio para potencializar as finalidades mais úteis, de modo a contribuir com a sustentabilidade das Estações de Tratamento de Esgoto - ETE. A técnica de microaeração consiste na dosagem limitada de oxigênio ou ar dentro do reator anaeróbio que potencializa tanto os processos biológicos (bactérias quimiotróficas) e químicos de oxidação do sulfeto. Portanto, o objetivo do trabalho foi avaliar o desempenho do reator UASB microaerado, tratando esgoto doméstico, em termos de remoção do sulfeto dissolvido na massa líquida e presente no biogás; investigar as rotas de conversões dos compostos de enxofre (enxofre elementar ou sulfato), a partir da aplicação da microaeração no leito de lodo do reator; e verificar se a introdução de ar compromete a eficiência do reator em termos de remoção de matéria orgânica. O reator UASB foi modificado para operar em condição microaerada e operou com tempo de detenção hidráulica (TDH) de 7 horas. Aplicou-se 20 mL.min⁻¹ de ar a 3 m do fundo do reator. Os resultados indicaram que a eficiência de remoção do H₂S no biogás foi de 98% com a aplicação da microaeração. Contudo, não foi possível observar efetividade da técnica na remoção do sulfeto dissolvido na massa líquida, para a condição testada. No que se refere à remoção da matéria orgânica, o desempenho do reator microaerado foi semelhante ao reator controle, apresentando eficiência de remoção (63,7%) dentro faixa típica para reatores UASB (50 – 70%). Nesse contexto, conclui-se que a técnica de microaeração se mostrou um método eficiente para remoção do sulfeto de hidrogênio da fase gasosa, o que resultaria na atenuação dos problemas de corrosão associados na utilização do biogás. O desempenho de reator UASB em termos remoção de matéria orgânica e atividade das bactérias redutoras de sulfato não foram afetados com a adição de ar a 3m do fundo do reator. No entanto, faz-se necessário maiores investigações dos mecanismos e fatores envolvido na oxidação do sulfeto dissolvido.

PALAVRAS-CHAVE: Reator UASB, Sulfeto de Hidrogênio, Microaeração, Biogás.

INTRODUÇÃO

Os reatores anaeróbios têm destaque nas estações de tratamento de esgoto de países de clima tropical, face às condições ambientais favoráveis e às vantagens econômicas de construção e operação. Nesse cenário, os reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo – UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) trazem consigo vantagens fundamentadas na economia de recursos e na geração de subprodutos potencialmente úteis.

Os compostos afluentes que contêm enxofre são particularmente indesejáveis ao processo anaeróbio, especialmente aos produtos finais, quais sejam, o efluente tratado e o biogás. Formas oxidadas do enxofre (ex. sulfatos), em condições anaeróbias, inevitavelmente, são bioquimicamente reduzidas a sulfetos, que como sulfeto de hidrogênio (H_2S) gasoso transfere-se para o biogás. Os problemas associados à formação e liberação do H_2S decorrem do fato do mesmo ser um gás de odor desagradável, corrosivo e tóxico.

O sulfeto de hidrogênio, quando dissolvido no efluente do reator UASB, tem efetivamente sido responsável pela geração de maus odores em diversas estações de tratamento de esgoto (ETEs) no Brasil. No biogás, por sua vez, o mesmo H_2S potencialmente limita a sua utilização para aproveitamentos energéticos, por exemplo, podendo reduzir o tempo de vida útil dos gasodutos e de outras instalações que entram em contato com este biogás com características corrosivas (ZHANG *et al.*, 2008; SUBTIL *et al.*, 2012; JIANG *et al.*, 2013; OLIVEIRA, 2013). Concentrações de sulfeto de hidrogênio no biogás menores que 100 ou 300 ppm_v poderiam evitar problemas de operação em sistema de aquecimento e geração de energia (PEU *et al.*, 2012)

Nessa perspectiva, faz-se necessário o estudo de técnicas que diminuam os problemas associados ao sulfeto e possibilitem a valorização dos subprodutos gerados no processo anaeróbio para potencializar as finalidades mais úteis, de modo a contribuir com a sustentabilidade das ETEs. Com esse entendimento, as técnicas de remoção biológicas se destacam, visto que, as vantagens estão fundamentadas em custos reduzidos de operação, altas taxas de remoção e ausência de formação de subprodutos tóxicos (POKORNA & ZABRANSKA, 2015).

Estudos têm demonstrado que a microaeração é uma técnica bastante promissora para oxidação do H_2S formado no tratamento de águas residuárias ricas em sulfato. A introdução de ar/ O_2 na fase líquida promove a remoção da concentração de sulfeto dissolvido, além de apresentar um potencial destaque para oxidação do sulfeto no biogás (DIÁZ *et al.*, 2011; KRAYZELOVA *et al.*, 2014; RAMOS *et al.*, 2014).

Nesse contexto, a presente pesquisa propõe: avaliar o desempenho do reator UASB microaerado, tratando esgoto doméstico, em termos de remoção do sulfeto dissolvido na massa líquida e presente no biogás; investigar as rotas de conversões dos compostos de enxofre (enxofre elementar ou sulfato), a partir da aplicação da microaeração no leito de lodo do reator; e verificar se a introdução de ar compromete a eficiência do reator em termos de remoção de matéria orgânica.

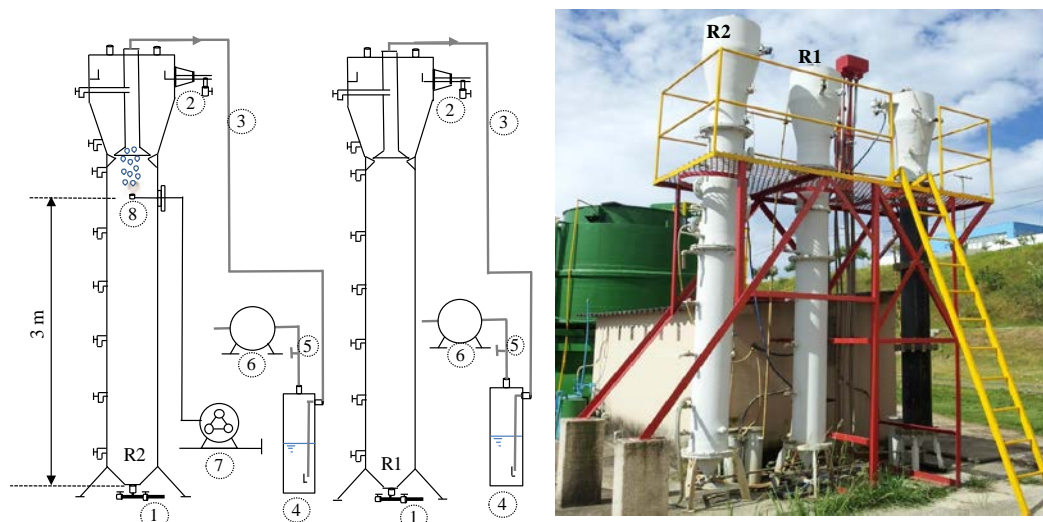
METODOLOGIA

APARATO EXPERIMENTAL

O aparato experimental utilizado na presente pesquisa é constituído de dois reatores UASB, em escala piloto, que recebem esgoto tipicamente doméstico após o tratamento preliminar. Um dos reatores foi modificado para operar em condições de microaeração. As configurações dos dois reatores e todo o aparato experimental são apresentados na Tabela 1 e na Figura 1, respectivamente.

Tabela 1: Configuração dos reatores UASB - anaeróbio e microaerado

Características	Reatores Piloto	
	R1 (controle)	R2(microaerado)
Diâmetro principal (m)	0,30	0,30
Altura útil (m)	4,0	4,25
Volume útil (L)	340	364
Ar (mL.min ⁻¹)	(ausente)	20
TDH (h)	7,0	7,0
Material	Polietileno/Fibra de vidro	Fibra de vidro

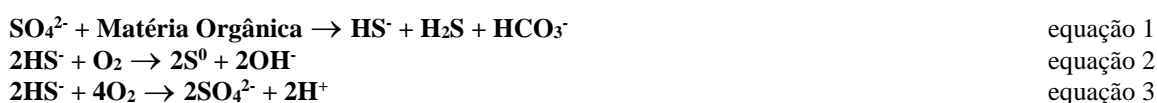


Legenda:

- | | | | |
|------------|-----------------------|---------------------------------|----------------------|
| 1 Afluente | 3 Tubulação de biogás | 5 Ponto de amostragem de biogás | 7 Bomba peristáltica |
| 2 Efluente | 4 Selo hídrico | 6 Gasômetro | 8 Difusor de ar |

Figura 1 - Representação real e esquemática dos reatores UASB - R1 e R2

No desenvolvimento da pesquisa analisou-se o desempenho do reator UASB microaerado com a introdução de $20 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ de ar, continuamente, durante 61 dias de operação. Para tal finalidade, utilizou-se de uma bomba peristáltica interligada por tubulação a um difusor de ar (pedra porosa de cerâmica) instalado no interior do reator. A vazão de ar foi introduzida a 3,0 m do fundo do reator, dentro da manta de lodo, definida a partir da relação molar entre o oxigênio e o enxofre, assumindo-se que o sulfato afluente foi primeiramente reduzido a sulfeto e subsequentemente oxidado a enxofre elementar ou a sulfato, conforme as equações estequiométricas: equação 1, 2 e 3. Na definição da vazão de ar considerou-se como concentração teórica mínima afluente de sulfato de $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ e máxima de $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, a partir da caracterização do esgoto bruto realizado por Glória (2009). Além de considerar a provável perda de oxigênio consumido por outros processos indesejados.



MÉTODOS ANALÍTICOS

Para compreender o efeito da microaeração no tratamento anaeróbio do reator UASB, o monitoramento do sistema, durante o período operacional de 12 de maio a 20 de julho de 2016, incluiu as seguintes análises físico-químicas para ambos os reatores: sulfato pelo método turbidimétrico (APHA, 2012), Sulfeto dissolvido pelo método colorimétrico (Plas *et al.*, 1992), enxofre elementar por cromatografia líquida de alto desempenho (HENSHAW *et al.*, 1998; LAUREN e WATIKSON, 1985) e demanda química de oxigênio (DQO) pelo método colorimétrico (APHA, 2012) para o afluente (Esgoto bruto - E.B) e efluente, duas vezes por semana, exceto para o enxofre elementar (uma vez por semana). No biogás foram analisados o sulfeto de hidrogênio, metano, oxigênio, nitrogênio e dióxido de carbono pelo equipamento portátil Landtec® tipo GEMTM 5000 duas vezes por semana. Os pontos de amostragem estão demonstrados na Figura 1.

Além dos parâmetros descritos anteriormente, analisou-se em campo o pH, temperatura, oxigênio dissolvido (OD) e potencial redox (ORP) com eletrodo de referência Ag/AgCl, por meio da sonda multiparâmetro (modelo Hach HQ 40D), duas vezes por semana nos dois reatores. As sondas foram posicionadas dentro do decantador dos reatores. Ao longo do período de operação, verificou-se a quantidade de sólidos sedimentáveis no efluente dos reatores através do método de Cone de Imhoff.

No tratamento dos dados, realizou-se a análise descritiva, contendo: máximo, mínimo, mediana, média, desvio padrão e percentis, além de testes de hipóteses para verificar se a microaeração exerce um efeito significativo na remoção do sulfeto produzido em reator UASB.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os resultados medianos de pH, temperatura (T), potencial redox (ORP) e oxigênio dissolvido (OD) do esgoto bruto e efluentes dos reatores R1 e R2, durante 34 dias de operação. Todos os dados apresentados neste trabalho foram analisados e discutidos a partir de estatística básica.

Tabela 2: Resultados medianos dos parâmetros de pH, temperatura, potencial redox e oxigênio dissolvido durante o período de monitoramento do esgoto bruto, R1 e R2.

Estatística Descritiva	E.B		R1 (controle)				R2 (microaerado)			
	pH	T (°C)	pH	T (°C)	ORP (mV)	OD (mg.L ⁻¹)	pH	T (°C)	ORP (mV)	OD (mg.L ⁻¹)
Mediana	7,6	22,0	6,9	22,1	-310,4	0,22	6,9	20,9	-309,5	0,32
Máximo	8,0	23,5	7,4	24,1	-306,0	0,27	7,5	23,4	-304,0	0,38
Mínimo	7,3	20,0	6,5	18,8	-318,7	0,18	6,4	17,6	-318,0	0,21
Desvio Padrão	0,2	1,0	0,2	1,5	4,3	0,03	0,3	1,6	4,2	0,05
Nº	13	12	13	13	13	13	13	13	13	13

O valor de pH afeta a atividade de bactérias, mas também determina as formas distribuídas do sulfeto. Os valores medianos nos dois reatores mantiveram-se próximo a neutralidade, não apresentando variações bruscas entre as condições anaeróbia e microaerada. Valores próximos a neutralidade estão relacionados com a faixa de pH do tratamento anaeróbio. Em pH igual a 6,9, os íons sulfeto estão distribuídos em 46% na forma dissociada (HS⁻ não gasosa) e 54% na forma não dissociada (H₂S gasosa), de acordo com o diagrama de distribuição do sulfeto de hidrogênio em meio aquoso (CHERNICHARO, 2007). Assim, um menor pH resulta em uma maior proporção de H₂S (g) e potencialmente maior quantidade de H₂S no biogás, segundo o equilíbrio da lei da solubilidade de gases (Lei de Henry's), consequentemente, maiores esforços são necessários para eficiente remoção de H₂S no biogás a ser aproveitado (KRAYZELOVA *et al.*, 2015).

Nota-se que o valor mediano de oxigênio dissolvido do reator microaerado apresentou-se pouco maior que o valor do reator controle, com amostragem localizada no decantador dos reatores (Tabela 2). Segundo Janssen *et al.*, (1995), a concentração de oxigênio dissolvido não é um bom parâmetro para controle do processo de oxidação do sulfeto à enxofre elementar, devido às concentrações do OD serem menores ou próximas de 0,1 mg. L⁻¹, normalmente, esse valor é menor que o limite de detecção dos eletrodos de oxigênio dissolvido.

O potencial redox, assim como o oxigênio dissolvido, apresentou pequena variação entre os valores do reator anaeróbio e microaerado. Valores negativos de potencial favorecem o crescimento de microrganismos estritamente anaeróbios. Jenicek *et al.*, (2010) relata que o sistema microaerado caracteriza-se como um sistema com concentração zero e consumo limitado de oxigênio. Em relação ao ORP, o sistema microaeróbio pode ser definido como um sistema em que o micro consumo de oxigênio provoca um aumento limitado do ORP.

Para investigar o efeito provocado pela velocidade ascensional do ar introduzido no leito de lodo, monitorou-se o volume de sólidos sedimentáveis no efluentes dos dois reatores. O volume apresentado foi de 0,05 mL.L⁻¹ para os dois reatores, considerando 11 amostras. O resultado indica que a velocidade adicional provocada pela introdução do ar, não influenciou em arraste de sólidos com o efluente no reator microaerado.

As Figuras 2 e 3 apresentam as concentrações de sulfato e sulfeto dissolvido do esgoto bruto e do efluente dos reatores controle e microaerado, respectivamente. As Figuras 4 e 5 exibem as concentrações enxofre elementar no efluente e as concentrações de sulfeto de hidrogênio no biogás dos reatores anaeróbio e microaerado, respectivamente. Observa-se na Figura 2 que a concentração mediana de sulfato no esgoto bruto foi de 29

$\text{mg.L}^{-1} \text{SO}_4^{2-}$. Esperava-se maiores valores de sulfato para o esgoto bruto, visto que Glória (2009) e Souza (2010) encontraram concentrações medianas de $45 \text{ mg.L}^{-1} \text{SO}_4^{2-}$ e $50 \text{ mg.L}^{-1} \text{SO}_4^{2-}$, respectivamente. Os menores valores obtidos nesta pesquisa podem ter sido influenciados pelo horário de coleta e por se tratar de amostragem simples.

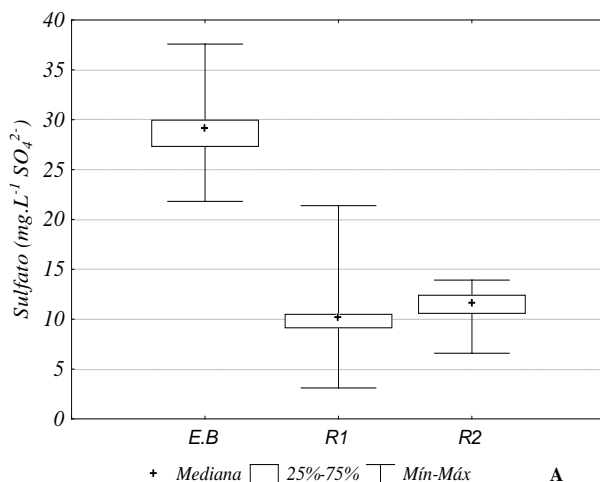


Figura 2 – Concentrações de sulfeto afluente e efluente dos reatores anaeróbico (R1) e microaerado (R2)

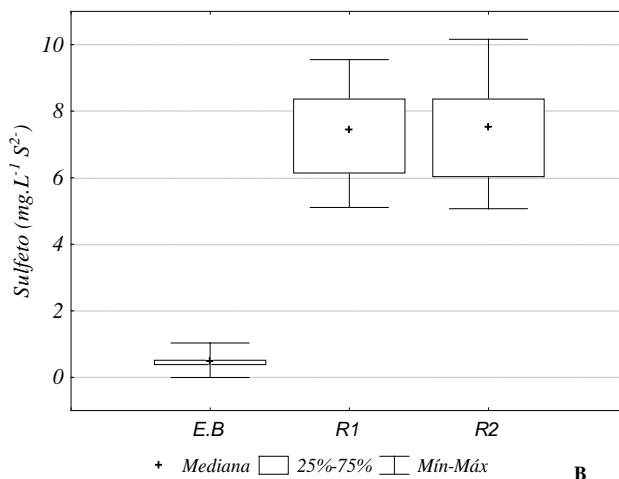


Figura 3 – Concentrações de Sulfeto afluente e efluente dos reatores anaeróbico (R1) e microaerado (R2)

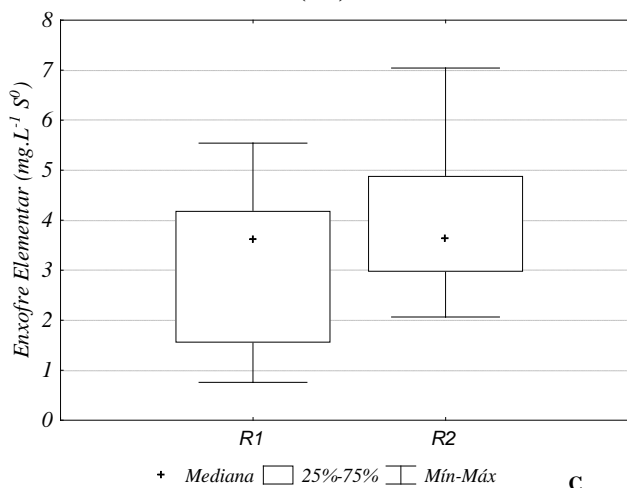


Figura 4 – Concentrações de enxofre elementar efluente dos reatores anaeróbico (R1) e microaerado (R2)

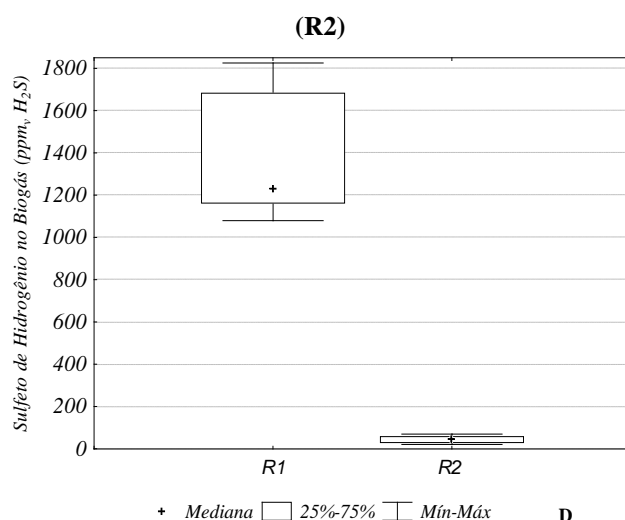


Figura 5 – Concentrações de sulfeto de hidrogênio no biogás dos reatores anaeróbio (R1) e microaerado (R2)

Relacionando as Figuras 2 e 3, verifica-se que a parcela de sulfato afluente removida foi convertida a sulfeto dissolvido por meio da redução desassimilativa das bactérias redutoras de sulfato (BRS) nos dois reatores. A porcentagem de remoção de sulfato foi de 66% e 60% para o reator controle e microaerado, respectivamente.

No que concerne ao sulfeto dissolvido, as concentrações medianas foram de 9,0 mg.L⁻¹ para o reator controle e 9,0 mg.L⁻¹ para o reator microaerado. Esperava-se que houvesse remoção no reator microaerado através da oxidação biológica do sulfeto. Contudo, as concentrações neste reator estiveram próximas da faixa do reator controle, o qual operou em condição anaeróbia. Supostamente, as baixas concentrações de oxigênio dissolvido associadas aos valores de potencial redox semelhantes aos de ambientes anaeróbios, foram fatores limitantes no crescimento e atividade das BOS na fase líquida do reator.

Diáz *et al.* (2010), revelaram que não obtiveram remoção do sulfeto dissolvido no efluente de digestores de lodo microaerados, nos quais as concentrações distribuíram-se entre 90-200 mg.L⁻¹ S²⁻. Portanto, como resultado do mau contato entre o oxigênio e o líquido promovido pela recirculação do lodo, apenas houve a remoção do sulfeto de hidrogênio do biogás. Os autores sugeriram a recirculação do biogás como método de mistura quando se objetiva tanto a remoção do sulfeto dissolvido quanto no biogás, visto que as valores do sulfeto dissolvido ficaram abaixo de 40 mg.L⁻¹ S²⁻, proporcionada pela melhora na mistura do reator e no contato entre o gás e o líquido.

As concentrações de enxofre elementar no efluente dos dois reatores estão apresentados na Figura 4. A concentração mediana do reator microaerado foi semelhante à do reator controle, de 3,3 mg.L⁻¹ S⁰ e 3,2 mg.L⁻¹ S⁰, respectivamente. Entende-se que a taxa de transferência do oxigênio, a partir da introdução do ar por meio do difusor de pedra cerâmica porosa, não foi suficiente para promover condições necessárias para as reações de oxidação biológica e/ou química do sulfeto à enxofre elementar na fase líquida.

Por sua vez, a eficiência de remoção do H₂S no biogás do reator microaerado foi de 98% (calculado em termos da carga mássica de sulfeto removido). Esse resultado destaca a eficiência de remoção do sulfeto de hidrogênio no biogás através da técnica de microaeração e, ainda, os benefícios associados a redução de corrosão de equipamentos em sistema de aproveitamento do gás. Sousa *et al* (2016) revelaram que as concentrações de sulfeto de hidrogênio que saíram no biogás do reator microaerado foram de apenas 0,02%_{v/v}, bem menor que a concentração do H₂S do reator anaeróbio. Para eles a eficiência de remoção obtida foi de 93%, ressaltando também a efetividade da microaeração na remoção do H₂S do biogás.

Com a finalidade de comparar as concentrações de sulfato, sulfeto dissolvido, enxofre elementar e sulfeto de hidrogênio no biogás, obtidas no reator controle e microaerado durante o período experimental, aplicou-se o teste estatístico U Mann-Whitney assumindo o nível de significância de 5%. O teste mostrou que não houve

diferença significativa entre as concentrações efluentes dos reatores UASB controle e UASB microaerado para todos os parâmetros, exceto para o parâmetro de sulfeto de hidrogênio no biogás. Indicando que a microaeração demonstrou-se como um método eficiente na remoção do sulfeto de hidrogênio gasoso produzido no reator UASB.

Na Figura 3 apresenta as concentrações de matéria orgânica, em termos de DQO afluente e efluente aos dois reatores e as respectivas eficiências de remoção para os reatores controle e microaerado. As eficiências de remoção foram de 70,9 % e 63,7% para os reatores R1 (controle) e R2 (microaerado), respectivamente. Verificou-se eficiências de remoção satisfatória, com valores característicos para reator UASB de 50 a 70% (ALMEIDA *et al.*, 2013). Este resultado refletiu em um desempenho típico do reator microaerado com remoção da matéria orgânica semelhante ao um reator UASB operando em condições anaeróbias. Em princípio, o oxigênio introduzido no reator não afetou as bactérias estritamente anaeróbias na conversão da matéria orgânica.

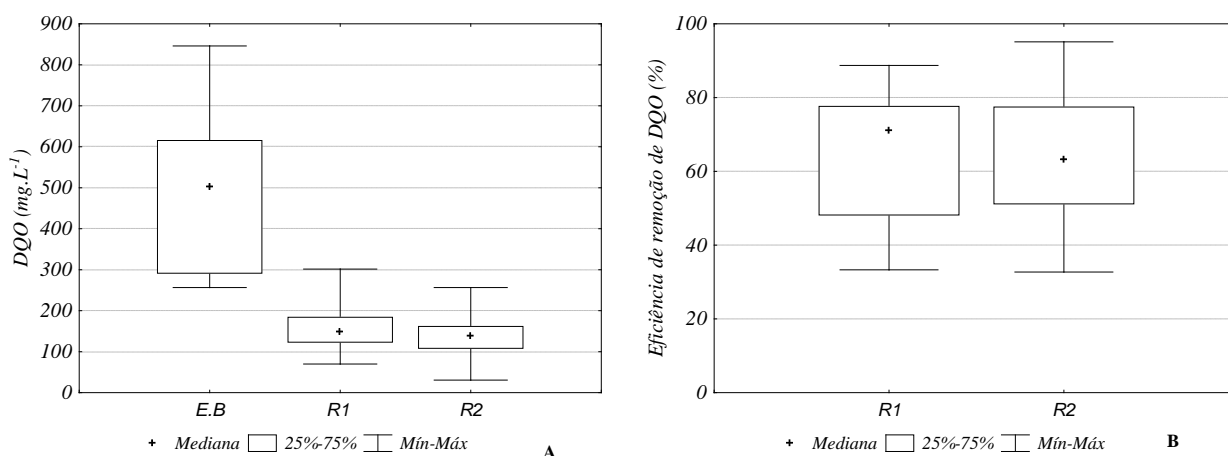


Figura 3 - Concentração de DQO afluente e efluente aos reatores UASB

CONCLUSÃO

A introdução limitada de oxigênio em reatores anaeróbios mostrou-se um método eficiente para remoção do sulfeto de hidrogênio da fase gasosa, alcançando remoção de 98%, o que traz grandes benefícios na atenuação de problemas de utilização do biogás associados com processos corrosivos. A introdução do ar ao nível de 3,0 m acima do fundo do reator não ocasionou perda de eficiência na remoção de matéria orgânica, visto que as eficiências de remoção do reator UASB microaerado foram praticamente iguais ou superiores ao reator anaeróbio. A limitação na transferência de massa de oxigênio do ar introduzido para a fase líquida pareceu dificultar ou até mesmo impossibilitar a remoção de sulfetos dissolvidos. Contudo, ainda é necessária maior investigação dos fatores e mecanismos envolvidos na oxidação do sulfeto dissolvido.

AGRADECIMENTO

Os autores gostariam de agradecer ao suporte no desenvolvimento desta pesquisa e na sua divulgação dado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG, pela Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP, pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq e pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais – COPASA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALMEIDA, P. G. S.; MARCUS, A. K.; RITTMANN, B.E.; CHERNICHARO, C. A. L. Performance of plastic- and sponge-based trickling filters treating effluents from an UASB reactor. *Wat Sci Technol*, v. 67(5), p.1034–1042, 2013
2. APHA; AWWA; WEF. Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington, 2012.
3. CHERNICHARO, C. A. L.; *Princípio do tratamento biológico de águas residuárias*. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007.
4. DÍAZ, I.; PÉREZ, S.I.; FERRERO, E.M.; FDZ-POLANCO, M. Effect of oxygen posing point and mixing on the microaerobic removal of hydrogen sulphide in sludge digesters. *Bioresource Technology*, v.102, p.3768-3775, 2011.
5. GLÓRIA, R. M.; *Estudo do processo de formação, acumulação, emissão e oxidação de sulfeto de hidrogênio em reatores UASB tratando esgoto doméstico*. 2009. 65 f. Dissertação (mestrado) – em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
6. HENSAHAW, P.; MEDLAR, D.; MCEWEN, J. Selection of a support medium for a fixed-film green sulphur bacteria reactor. *Water Res.*, v.33, n.14, p.3107-3110, 1999.
7. JENICEK, P.; KOUBOVA, J.; BINDZAR, J.; ZABRANSKA, J. Advantages of anaerobic digestion of sludge in microaerobic conditions. *Water Science & Technology—WST*. V62.2, p. 427 – 434, 2010.
8. JENSEN, A. B.; WEBB, C. Ferrous sulphate oxidation using *Thiobacillus ferrooxidans*: a review. *Process Biochemistry*, v. 30, n. 3, p. 225-236, 1995.
9. JIANG, G.; KEATING, A.; CORRIE, S.; O'HALLORAN, K.; NGUYEN, L.; YUAN, Z. Dosing free nitrous acid for sulfide control in sewers: Results of field trials in Australia. *Water Research*. v.47, p.4331-4339, 2013.
10. KRAYZELOVA, L.; BARTACEK, J.; DÍAZ, I.; JEISON, D.; VOLCKE, E. I. P.; JENICEK, P. Microaeration for hydrogen sulfide removal during anaerobic treatment: a review. *Rev Environ Sci Biotechnol*, v.14, p. 703–725, 2015.
11. KRAYZELOVA, M.; BARTACEK, J.; KOLESAROVA, N.; JENICEK, P. Microaeration for hydrogen sulfide removal in UASB reactor. *Bioresource Technology*, n.172, p. 297-302, 2014.
12. LAUREN, N.R.; WATKINSON, J.H. Elemental sulphur analysis using high-performanceliquid chromatography on 10-µm rigid polymer particles. *Journal of Chromatography*, Amsterdam, v. 348, p. 317-320, 1985.
13. OLIVEIRA, C. J. S.; *Avaliação da microaeração na eficiência, estabilidade operacional, qualidade do biogás e controle de odor em sistema anaeróbio de tratamento*. 2013. 105 f. Dissertação (Mestrado) - em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.
14. PEU, P.; PICARD, S.; DIARA, A. GIRAULT, R; BÉLINE, F. BRIDOUX, G.; DABERT, P. Prediction of hydrogen sulphide production during anaerobic digestion of organic substrates. *Bioresour Technol*. v.121, p. 419-424. 2012.
15. PLAS, C.; Harant, H.; Danner, H.; Jelinek, E.; Wimmer, K.; Holubar P.; Braun, R. Ratio of biological and chemical oxidation during the aerobic elimination of sulphide by colourless Sulphur sulphur bacteria. *Applied Microbiology and Biotechnology*. v. 36, n. 6, p. 817-822, 1992.
16. POKORNA, D. & ZABRANSKA, J. Sulfur-oxidizing bacteria in environmental technology. *Biotechnology Advances*, p.1 – 14, 2015.
17. RAMOS, I., PEÑA, M., FDZ-POLANCO M. Where does the removal of H₂S from biogas occur in microaerobic reactors?. *Bioresource Technology*, v. 166, p. 151-157, 2014.
18. SOUSA, M. R.; OLIVEIRA, C. J. S.; LOPES, A. C.; RODRÍGUEZ, E. R.; HOLANDA, G. B. M; LANDIM, P. G. C.; FIRMINO, P. I. M.; SANTOS, A. B. Technical, Economical, and Microbiological Aspects of the Microaerobic Process on H₂S Removal for Low Sulfate Concentration Wastewaters. *Appl Biochem Biotechnol*. v.180, p.1386-1400, 2016.
19. SOUZA, C. L.; *Estudo das rotas de formação, transporte e consumo dos gases metano e sulfeto de hidrogênio resultantes do tratamento de esgoto doméstico em reatores UASB*. 2010. 127 f. Tese (Doutorado) - em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.
20. SUBITIL, E. L.; CASSINI, S. T. A.; GONÇALVES, R. F. Sulfate and dissolved sulfide variation under low COD/Sulfate ratio in Up-flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) treating domestic wastewater. *Revista Ambiente e Água An Interdisciplinary Journal of Applied Science*: v. 7, n. 1, 2012.

21. TANG, K.; BASKARAN, V.; NEMATİ, M. Bacteria of the sulphur cycle: An overview of microbiology, biokinetics and their role in petroleum and mining industries. *Biochemical Engineering Journal*, v.44, n.1, p.1-22, 2009.
22. ZHANG, L; SCHRYVER, P. D.; GUSSEME, B. D.; MUYNCK, W. D.; BOON, N.; ERSTRAETE, W. Chemical and biological technologies for hydrogen sulfide emission control in sewer systems: *A review*. *Water Research*. v.42, p. 1 – 12, 2008.