

## **X-013 - MICROAERAÇÃO CONJUGADA À RECIRCULAÇÃO DO BIOGÁS APLICADA EM REATOR UASB TRATANDO ESGOTO DOMÉSTICO: AVALIAÇÃO DO CONTROLE DE SULFETO DE HIDROGÊNIO NO BIOGÁS E DISSOLVIDO**

**Tamile Dafne Marinho<sup>(1)</sup>**

Engenheira Ambiental pela Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais (SMARH/UFMG).

**Cláudio Leite de Souza<sup>(2)</sup>**

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). 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).

**Roberto Meireles Glória<sup>(3)</sup>**

Engenheiro Ambiental pela Universidade FUMEC. Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pelo Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA-UFMG). Professor Efetivo do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG). Doutorando em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pelo Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA-UFMG).

**Sarah Estela Almeida Matoso<sup>(4)</sup>**

Graduanda em Engenharia Ambiental e Sanitária pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG). Bolsista no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA-UFMG).

**Lucas Soares Furini<sup>(5)</sup>**

Graduando em Engenharia Ambiental e Sanitária pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG). Bolsista no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA-UFMG).

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Avenida Antonio Carlos, 6627 - Pampulha - Belo Horizonte - MG - CEP: 31270-901 - Brasil  
Tel: (31) 3409-1011 - e-mail: [tamilemarinho@hotmail.com](mailto:tamilemarinho@hotmail.com)

### **RESUMO**

O uso de reatores UASB para o tratamento anaeróbico de esgotos domésticos possui como principal desafio o gerenciamento dos gases formados no processo de conversão dos compostos orgânicos, sendo um dos mais problemáticos o sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ), por ser corrosivo, mau cheiroso e tóxico à saúde humana. Uma tecnologia promissora para o controle deste gás é a microaeração, que consiste na introdução de pequena quantidade de oxigênio no reator para promover a oxidação bioquímica do sulfeto. Desta forma, o presente trabalho avaliou, em duas fases, o efeito da microaeração introduzida no leito de lodo de reator UASB piloto, com vazão de  $70 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ , sem recirculação e associada à recirculação do biogás, para favorecer a redução do  $H_2S$  no biogás e dissolvido no efluente do reator. Os resultados alcançados na Fase 1 para remoção de  $H_2S$  presente no biogás foram satisfatórias, superiores à 95% e na Fase 2 as eficiências de remoção apresentaram-se menores que o esperado, cerca de 75 %. Já para remoção sulfeto dissolvido, os resultados para as duas fases apresentaram baixas eficiências de remoção, indicando que a microaeração sem e com associação da recirculação do biogás não favoreceu a oxidação bioquímica do sulfeto dissolvido no efluente, fazendo-se necessárias novas proposições e modificações no sistema a fim de se conseguir também elevadas eficiências de remoção deste gás na fase líquida de reator UASB.

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

### **INTRODUÇÃO**

O uso de reatores UASB como tecnologia anaeróbica para tratamento de esgotos sanitários tem demonstrado ser uma tendência na realidade brasileira, já que apresenta baixos custos de investimentos e operação, adapta-se bem a climas quentes, possui uma eficiência razoável de remoção da matéria orgânica e a geração de subprodutos, como o biogás, que pode ser aproveitado como fonte de energia renovável (CHERNICHARO,

2016). Porém, apresenta como principal desafio para os sistemas de esgotamento sanitário o gerenciamento dos gases formados no processo anaeróbio de conversão dos compostos orgânicos. Entre estes gases, tem-se como um dos mais problemáticos o sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ), por este ser: um gás mau cheiroso, sendo objeto de reclamações da população do entorno; corrosivo, causando danos às estruturas e tubulações do sistema; e tóxico, sendo prejudicial à saúde humana.

O  $H_2S$  encontra-se no reator tanto na fase gasosa como constituinte do biogás e podendo ser liberado em emissões fugitivas, como também se encontra dissolvido na fase líquida, podendo ser liberado na saída do efluente do reator UASB. Dessa forma, faz-se necessária a busca por tecnologias eficientes e de baixo custo para controle e remoção do sulfeto de hidrogênio presente nas fases líquida e gasosa.

Uma opção que vem se mostrando promissora para esse controle é a técnica de microaeração, por apresentar satisfatórias eficiências, baixo custo operacional e não necessitar de instalação de novas unidades. O processo microaeróbio se caracteriza, então, pela injeção de pequenas quantidades de ar ou oxigênio puro no interior de reatores anaeróbios, para o fornecimento de oxigênio em concentrações que favoreçam a oxidação bioquímica do sulfeto de hidrogênio formado no reator (DÍAZ; FDZ-POLANCO, 2012).

Pesquisas anteriores, como de Glória *et al.* (2015) e Castro (2017), utilizaram a microaeração em reatores UASB tratando esgoto doméstico com fluxo de ar de vazões de 20, 30 e 40 mL.min<sup>-1</sup> e obtiveram eficiências acima de 90 % na remoção do  $H_2S$  em biogás, porém para o  $H_2S$  dissolvido as eficiências foram insignificantes. Já Fdz-Polanco *et al.* (2009) e Díaz *et al.* (2011) obtiveram eficiências acima de 95 % para o  $H_2S$  gasoso e acima de 85 % para o  $H_2S$  dissolvido, utilizando a microaeração junto à recirculação do biogás em digestores anaeróbios de lodo.

Isto posto, o objetivo deste trabalho é avaliar o efeito da introdução da microaeração sem e associada à recirculação do biogás em reatores UASB tratando esgoto doméstico, na diminuição do sulfeto de hidrogênio presente no biogás e dissolvido no efluente de reator UASB piloto.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Área de estudo e aparato experimental

A parte experimental da pesquisa foi desenvolvida no Centro de Pesquisa e Treinamento em Saneamento (CePTS) UFMG/COPASA, localizado na Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) da bacia do ribeirão Arrudas, a qual recebe grande parte do esgoto doméstico gerado na região metropolitana de Belo Horizonte. O CePTS é constituído por unidades experimentais onde são desenvolvidas diversas pesquisas com sistemas de tratamento de esgoto doméstico. O esgoto doméstico utilizado nos sistemas experimentais provém de uma tomada do esgoto que chega à ETE, após passar por tratamento preliminar.

Para desenvolver o estudo em questão foram utilizados dois reatores UASB em escala piloto. As características e a representação real desses reatores podem ser visualizadas na Tabela 1 e na Figura 1, respectivamente. Sendo que o reator denominado R1 foi operado em condições normais anaeróbias e utilizado como controle e o outro reator, denominado R2, foi operado em condições de microaeração e recirculação de biogás.



**Figura 1: Representação real dos reatores - controle (R1) e microaerado (R2).**

**Tabela 1: Características e condições operacionais dos reatores UASB - anaeróbio (R1) e microaerado (R2).**

Características	Reatores Piloto	
	R1 (anaeróbio)	R2 (microaerado)
Volume útil (L)	340	364
Diâmetro principal (m)	0,3	0,3
Altura útil (m)	4,0	4,25
TDH (h)	7,0	7,0
Vazão média (m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup> )	1,17	1,25

### Fases experimentais

A presente pesquisa foi desenvolvida em duas etapas experimentais, nas quais as modificações necessárias foram realizadas no sistema operacional do reator R2, enquanto o reator R1 permaneceu sem alterações, operando em condições anaeróbias. Dessa forma, as eficiências de remoção de sulfeto de hidrogênio foram obtidas comparando os resultados do monitoramento do reator microaerado R2 com os resultados do reator anaeróbio R1.

FASE 1: constituiu-se na introdução de 70 mL.min<sup>-1</sup> de fluxo de ar no reator R2 através de uma bomba peristáltica Exatta 0517EX, onde o ar foi distribuído no interior do reator através de um difusor (pedra porosa de cerâmica - diâmetro: 9,0 cm) de ar instalado em seu interior, a 60 centímetros do fundo do reator UASB (leito de lodo). Esta fase foi realizada no período de 16/05/2017 a 29/06/2017.

FASE 2: constituiu-se na microaeração associada à recirculação do biogás e foi realizada no período de 11/07/2017 a 24/10/2017, de forma contínua. A introdução de fluxo de ar e a recirculação do biogás, foram realizadas por meio de bombas peristálticas, Exatta 0517EX e Masterflex® console drive 7518-10, respectivamente, a fim de se conseguir uma vazão controlada de fluxo de ar de 70 mL.min<sup>-1</sup> e uma vazão total de 450 L.dia<sup>-1</sup>. Os dois fluxos eram interligados e inseridos no reator R2 através de um difusor (pedra porosa de cerâmica - diâmetro: 9,0 cm) de ar instalado no interior do reator, a 60 centímetros do fundo do reator UASB (leito de lodo).

Como a recirculação era realizada em sistema fechado, foi necessária a introdução de biogás externo, a partir de outro reator maior existente no CePTS, apenas para atingir o volume necessário à vazão aplicada. Igualmente ao R1, o biogás gerado no reator R2 ainda era encaminhando ao gasômetro (medidor de gás Ritter® TG05), para quantificação contínua da produção de biogás.

Para entender o efeito da microaeração sem e associada à recirculação do biogás no tratamento anaeróbio do esgoto doméstico em reator UASB foram realizadas coletas, monitoramentos e análises com frequência de duas vezes por semana dos seguintes parâmetros físico-químicos: sulfeto dissolvido; composição do biogás, quanto às concentrações (%v/v) de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>S, O<sub>2</sub> e balanço; demanda química de oxigênio (DQO);

pH; temperatura; oxigênio dissolvido; e potencial de oxirredução. A Tabela 2 apresenta os métodos e referências utilizados.

**Tabela 2: Parâmetros físico-químicos monitorados, métodos de determinação e referências correspondentes.**

PARÂMETRO	MÉTODO	REFERÊNCIA
Sulfeto dissolvido	Colorimétrico	Plas <i>et al.</i> (1992); APHA (2012)
DQO total e filtrada	Colorimétrico refluxo fechado	
pH	Potenciométrico	APHA (2012)
Potencial de oxirredução		
Temperatura		
Oxigênio dissolvido		
Produção de biogás	Gasômetro volumétrico	Ritter® - TG05
Composição do biogás	Analizador portátil	Landtec® - GEM 5000

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados encontrados, em termos de mediana, para concentração de  $H_2S$  no biogás durante a Fase 1 e a Fase 2 para o reator microaerado e para o reator controle podem ser observados na Tabela 3. A partir desses valores têm-se que a eficiência de remoção de  $H_2S$  presente no biogás foi de 95 % para Fase 1 e 75 % para Fase 2. Além disso, a Tabela 3 apresenta a composição e a produção diária do biogás, em termos de mediana, durante as duas fases para o reator microaerado (R2) e controle (R1). Por meio da avaliação destes dados percebe-se um aumento da produção de biogás durante as duas fases para o reator microaerado em comparação ao reator controle. Este aumento é justificado pela contínua introdução de ar no reator, assim, o  $O_2$  que não é consumido e o  $N_2$  (principal constituinte do ar), somam-se ao biogás produzido. Esta mesma explicação justifica a menor concentração de  $CH_4$  e o aumento de  $O_2$  e  $N_2$  no biogás do reator microaerado (R2), em que o fluxo de ar introduzido leva a diluição do biogás e prejudica, assim, seu aproveitamento energético, já que o poder calorífico do biogás está relacionado à quantidade de metano presente em sua composição.

**Tabela 3: Condições operacionais dos reatores UASB anaeróbio (R1) e microaerado (R2) e seus resultados quanto à produção e composição do biogás.**

Fase Operacional	N	Vazão de ar (mL.min <sup>-1</sup> )	Vazão de recirculação* (mL.min <sup>-1</sup> )	Produção de biogás (L.d <sup>-1</sup> )	CH <sub>4</sub> (%)	H <sub>2</sub> S (ppm)	O <sub>2</sub> (%)	N <sub>2</sub> (%)
R1 (F1/F2)	11	0,0	0,0	69,1	58,1	1542,7	0,6	36,9
Fase 1	11	70,0	0,0	156,0	17,5	75,7	10,7	64,2
Fase 2	23	70,0	450,0	112,2	24,1	403,0	9,7	61,7

\*Vazão total de recirculação incluída a vazão de ar introduzida continuamente.

Através da análise dos dados obtidos para concentração de  $H_2S$  presente no biogás na forma de gráfico Box-Whiskers (Figura 2), percebe-se que a introdução de ar durante as duas fases de microaeração proporcionou significativa redução do sulfeto no biogás quando comparado ao reator controle (R1).

As eficiências alcançadas na presente pesquisa, quanto ao  $H_2S$  gasoso em biogás, foram próximas as encontradas em trabalhos anteriores. Como nos estudos, já mencionados, desenvolvidos por Glória *et al.* (2015), que introduziram vazões de fluxo de ar de 30 e 40 mL.min<sup>-1</sup> à 3 metros do fundo do reator UASB piloto (manta de lodo), tratando esgoto doméstico, e alcançaram eficiência de remoção do  $H_2S$  no biogás, em termos de carga, em torno de 95 % e por Castro (2017), que introduziu vazão de fluxo de ar de 20 mL.min<sup>-1</sup>, aplicado à 3 metros do fundo do reator UASB (manta lodo) piloto tratando esgoto doméstico, e com mesmo TDH, 7 horas, alcançando também elevada eficiência de remoção de sulfeto no biogás, em torno de 97 % e alta estabilidade de dados. Desta forma, a elevada remoção, em termos de concentração, na presente pesquisa, para Fase 1, enfatizou a eficácia do método para a remoção almejada, apresentando eficiência de remoção de

95 % de  $H_2S$  em biogás. Já a menor eficiência relatada na Fase 2, em torno de 75 %, não foi um resultado positivo, já que esperava-se que o aumento da agitação/turbulência devido à recirculação de biogás no líquido pudesse otimizar a difusão de oxigênio e, por sua vez, a oxidação de sulfetos.

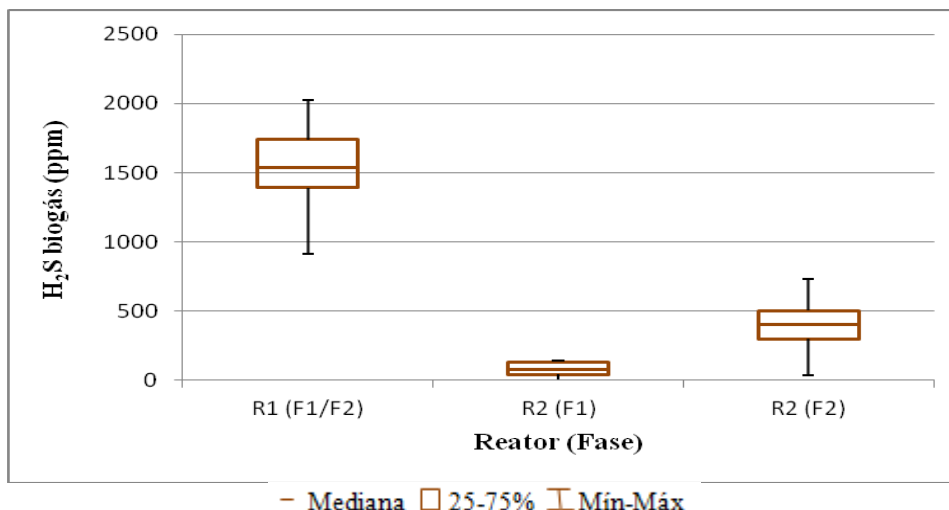


Figura 2: Gráfico de Box-Whiskers das concentrações de  $H_2S$  do biogás durante as Fases 1 e 2 para reator anaeróbio (R1) e microaerado (R2).

A série temporal apresentada na Figura 3 mostra a relação entre a concentração de  $H_2S$  e de  $O_2$  no biogás no decorrer do tempo. Analisando essa figura, pode-se perceber que o aumento da concentração de  $O_2$  no biogás proporciona maior redução de  $H_2S$ , como esperado.

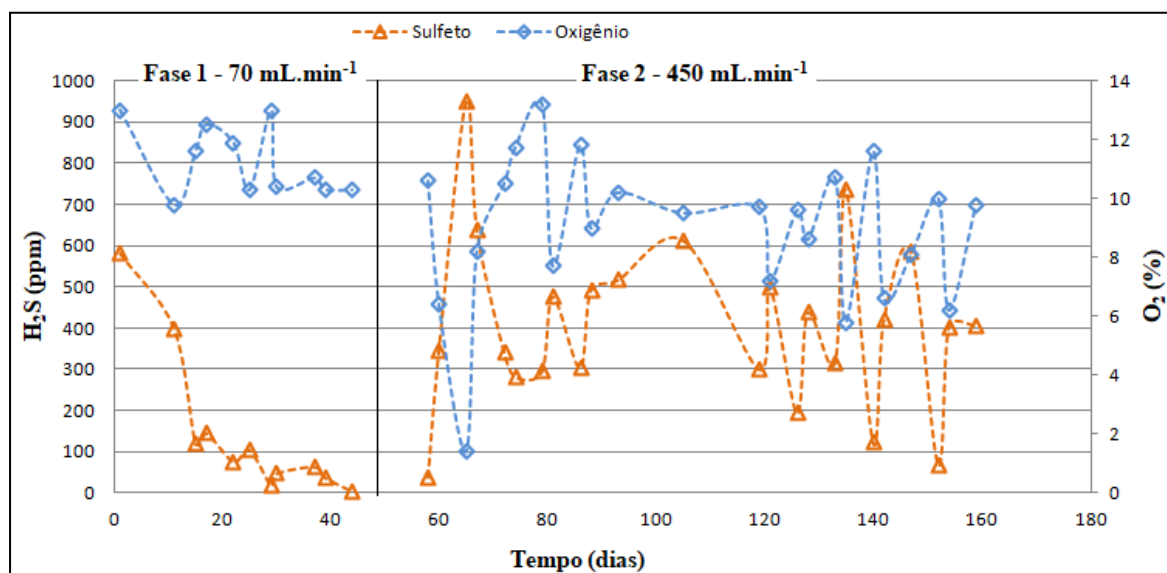
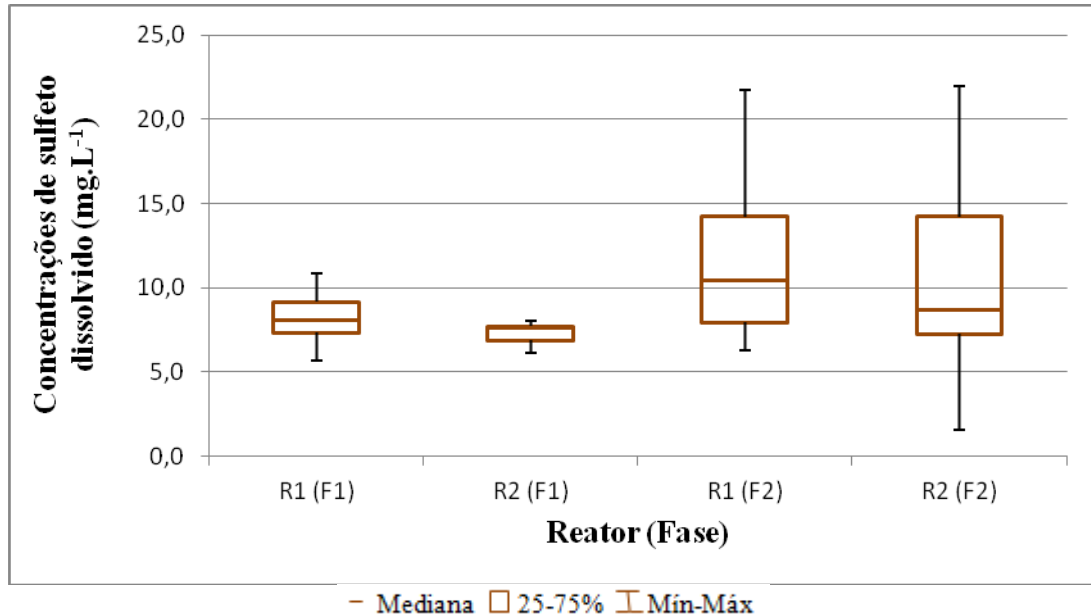


Figura 3: Série temporal para os dados de oxigênio e sulfeto de hidrogênio, como constituinte do biogás para reator microaerado (R2) nas duas fases operacionais.

Quanto aos resultados encontrados para a fase líquida, tem-se que na Fase 1 com introdução da microaeração, as concentrações de sulfeto dissolvido, em termos de medianas, foram de 8,0 mg.L<sup>-1</sup> para o R1 e de 7,6 mg.L<sup>-1</sup> para o R2, apresentando eficiência de remoção insignificante, inferior a 5 %. Essas concentrações foram obtidas a partir de 12 dados. Na Fase 2, com introdução da microaeração associada à recirculação do biogás, as concentrações de  $H_2S$  dissolvido no efluente foram de 10,5 mg.L<sup>-1</sup> para o R1 e de 8,7 mg.L<sup>-1</sup> para o R2, com eficiência de remoção de apenas 17,2 % (concentrações dadas em termo de medianas, obtidas a partir de 24 dados).

A análise dos dados nas duas fases da pesquisa, por meio do gráfico Box-Whiskers (Figura 4), evidência à insignificante diferença entre as concentrações de sulfeto dissolvido no efluente do reator anaeróbico (R1) e microaeróbico (R2), principalmente durante a Fase 1.



**Figura 4:** Gráfico de Box-Whiskers das concentrações de H<sub>2</sub>S dissolvido durante as Fases 1 e 2 para os reatores anaeróbico (R1) e microaerado (R2).

A introdução de microaeração associada à recirculação de biogás, nesta pesquisa, não foi eficiente para remoção do sulfeto dissolvido no efluente, em contradição aparente aos resultados reportados nos estudos supramencionados para tratamento de lodo em digestores anaeróbios, onde os autores encontraram eficiências de remoção de sulfeto dissolvido acima de 85 %, utilizando-se da microaeração em conjunto com a recirculação do biogás. Esta contradição pode ser justificada pelo diferente cenário entre as duas pesquisas. Como no presente estudo a recirculação de biogás foi utilizada em reator UASB tratando esgoto doméstico, sistema que possui regime de aplicação de carga orgânica volumétrica muito diferenciada, com valores bem inferiores, alimentação contínua e vazões líquidas efluentes bem maiores, em relação aos digestores de lodo, consequentemente, a produção de biogás e de sulfeto no biogás é muito menor. A maior produção de gases em digestores de lodo possibilita o maior desprendimento dos gases dissolvidos, facilitando assim sua remoção a partir da técnica de microaeração com recirculação do biogás, inclusive também do sulfeto dissolvido.

Nesta pesquisa, foi avaliada também se a introdução de O<sub>2</sub> interfere no funcionamento dos reatores UASB quanto à remoção da matéria orgânica, considerando, para isso, as eficiências de remoção da Demanda Química de Oxigênio (DQO) durante as duas fases de operação. A Tabela 4 mostra uma estatística descritiva básica dos dados obtidos através das análises de DQO. A partir desses dados, tem-se que as eficiências de remoção de DQO em relação ao esgoto bruto (EB), em termos de mediana, foram de 55,5 %, 54,7 % e 64,3 %, para o reator anaeróbico (R1) durante as duas fases, para o reator microaerado (R2) na Fase 1 e para R2 durante a Fase 2, respectivamente. Dessa forma, a microaeração não prejudicou o funcionamento do reator UASB piloto R2, já que seus valores de eficiência da remoção de DQO encontraram-se próximos ou superiores aos valores de eficiência obtidos para reator anaeróbico R1, sendo que para ambos os reatores no período analisado, as eficiências de remoção de DQO encontraram-se dentro da faixa reportada por von Sperling (2014) para reator UASB tratando esgoto doméstico, de 55-70 %.



**Tabela 4: Estatística descritiva dos resultados de DQO ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) para o reator anaeróbio (R1) e microaerado (R2) durante as Fases 1 e 2.**

	<i>DQO (<math>\text{mg.L}^{-1}</math>)</i>					
	N	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
<b>EB</b>	29	414,9	375,0	154,0	1000,0	210,0
<b>R1</b>	31	179,8	167,0	78,0	391,0	69,0
<b>R2 (F1)</b>	12	182,0	170,0	117,0	315,0	52,0
<b>R2 (F2)</b>	19	158,0	134,0	72,0	398,0	75,0

## CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

A técnica de microaeração se mostrou bastante eficiente na remoção do  $\text{H}_2\text{S}$  gasoso, reforçando sua relevância no controle do gás sulfídrico gerado em sistemas anaeróbios de remoção de compostos orgânicos. Esta relevância é acentuada também pela simplicidade da técnica e por não ser necessário adicionar novas unidades às ETEs para o controle do sulfeto.

Quando se tentou conjugar a microaeração à recirculação do biogás para alcançar também elevadas eficiências de remoção do sulfeto dissolvido, os resultados não se apresentaram como esperado. Neste cenário, houve redução da eficiência de remoção do sulfeto gasoso e baixa ou nenhuma eficiência nas concentrações de sulfeto dissolvido no efluente líquido do reator UASB, diferindo, assim, das eficiências encontradas quanto à remoção de sulfeto de hidrogênio presente no biogás e dissolvido no efluente em digestores anaeróbios de lodo. As diferenças existentes entre os reatores UASB tratando esgoto doméstico e os digestores anaeróbios de lodo, como as configurações hidráulicas, condições operacionais e quantidade de gases produzidos, podem explicar as menores eficiências encontradas na presente pesquisa.

Constatou-se também que a introdução de ar durante as Fases 1 e 2 de microaeração não prejudicou o funcionamento do reator UASB quanto a remoção de matéria orgânica, quando considerada a remoção de DQO do reator anaeróbio em relação ao reator microaerado.

Dessa forma, faz-se necessário a continuação da pesquisa com modificações no sistema, como, por exemplo, alterando a vazão testada e/ou introduzindo o fluxo gasoso em diferentes alturas do reator, assim, possibilitando melhores eficiências e entendimentos quanto ao uso desta técnica em reatores UASB tratando esgoto doméstico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA; AWWA; WPCF. Standard methods for the examination of water and wastewater. 22 ed. Washington DC.: American Public Health Association, 2012.
2. CASTRO, I. M. P. Avaliação da microaeração em reator UASB piloto para remoção do sulfeto de hidrogênio produzido no tratamento de esgoto doméstico. 2017. 110 p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente, Saneamento e Recursos Hídricos - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2017.
3. CHERNICHARO, C. A. L. Princípio do tratamento biológico de águas residuárias – Reatores anaeróbios. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA/UFGM, 2 ed. Belo Horizonte, v. 5, 380 p., 2016.
4. DÍAZ, I.; FDZ-POLANCO, M. *Robustness of the microaerobic removal of hydrogen sulfide from biogas*. *Water Science & Technology*, v. 65, n. 8, p. 1368-1374, 2012.
5. 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.



6. GLÓRIA, A.; SILVA, A. M. L.; MOTTA, T. M.; SANTOS, A. M. S.; SOUZA, C. L. *Estudo da microaeração em reatores UASB tratando esgotos domésticos*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 28., 2015, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: ABES, 2015. 8 p.
7. FDZ-POLANCO, M.; DÍAZ, I.; PÉREZ, S. I.; LOPES, A. C.; FDZ-POLANCO, F. *Hydrogen sulphide removal in the anaerobic digestion of sludge by micro-aerobic processes: pilot plant experience*. *Water Science & Technology*, v. 60, n. 12, p. 3045- 3050, 2009.
8. 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 bacteria*. *Applied Microbiology and Biotechnology*. v. 36, n. 6, p. 817-822, 1992.
9. VON SPERLING, M. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA/UFMG. v. 1, 4 ed. Belo Horizonte, 2014. 472 p.