

II-1484 – AVALIAÇÃO DE CÂMARA DE DESSORÇÃO PARA REMOÇÃO DE METANO E SULFETO DISSOLVIDOS E INTEGRAÇÃO COM REATOR UASB EM MICROAERAÇÃO

Daniel Carvalho Mota⁽¹⁾

Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Unichristus. Mestrando em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Fabiane Silva Oliveira⁽²⁾

Graduanda em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Bolsista de Iniciação Científica pelo Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais (DESA/UFMG).

Cláudio Leite de Souza⁽³⁾

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 - Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Professor Associado do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Endereço⁽¹⁾: Av. Santos Dumont, 3210, apto. 204, bloco B – Fortaleza – Ceará – CEP:60.150-162 – Brasil - Tel: (85) 98765-1122 – E-mail: daniel-cm@ufmg.br

RESUMO

A utilização do reator UASB (reator anaeróbico de fluxo ascendente e manta de lodo) como tecnologia para tratamento de esgoto doméstico apresenta ótimas vantagens, mas possui como um dos principais desafios o gerenciamento dos gases (dissolvidos e no biogás) formados na digestão anaeróbia. Dessa forma, a pesquisa avaliou a remoção do metano e sulfeto dissolvido no efluente de reatores UASB por meio de câmara de dessorção e a aplicabilidade da microaeração com o gás residual da câmara de dessorção para remoção do sulfeto no biogás e recuperação de metano para aproveitamento energético. Na pesquisa utilizou-se reator UASB com TDH de 8,5 horas e câmara de dessorção com relação das vazões ar/líquido (rQ) média de 0,049 e taxa de aplicação média de $0,25 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{min}$, ambos em escala demonstração, e esgoto doméstico após tratamento preliminar como afluente ao sistema. Para a câmara de dessorção (CD), as eficiências médias de remoção foram de 53,0% para o metano e 80,1% para o sulfeto dissolvidos. A composição média do gás residual da CD foi de 23,2%v/v de metano, 172,3 ppm_v de sulfeto e 8,2%v/v para o oxigênio. Após a mistura teórica com o biogás do reator UASB, encontrou-se valores de 49,9%v/v de metano e 293,1 ppm_v de sulfeto, concluindo-se que essa alternativa tecnológica é bastante promissora para remoção de metano e sulfeto dissolvidos, visando a microaeração do reator UASB e recuperação de parte do metano dissolvido para aproveitamento energético.

PALAVRAS-CHAVE: gás residual, biogás, recuperação energética, maus odores, oxidação de sulfeto.

INTRODUÇÃO

A utilização do reator UASB (traduzido para o português como reator anaeróbico de fluxo ascendente e manta de lodo) como tecnologia para tratamento de esgoto doméstico apresenta ótimas vantagens, como baixos custos de implantação e operação e facilidades no gerenciamento do lodo. Porém, possui como um dos principais desafios o gerenciamento dos gases formados no processo de conversão dos compostos orgânicos. Dentre esses gases, têm-se grande interesse no metano (CH_4) e no sulfeto de hidrogênio (H_2S), que se encontram tanto como constituintes do biogás quanto dissolvidos no efluente dos reatores. A presença desses gases dissolvidos no efluente, com a possibilidade de emissões descontroladas destes, é uma problemática que causa preocupações em âmbitos sociais, ambientais e econômicos devido ao agravamento do efeito estufa e à perda de potencial para aproveitamento energético no caso do metano, e na geração de maus odores, toxicidade e corrosão no caso do sulfeto.

O metano, apesar da sua relativa baixa solubilidade, usualmente encontra-se supersaturado no efluente de reatores UASB, representando de 36 a 40% do total de metano formado, enquanto o sulfeto de hidrogênio, bastante solúvel e ionizável, representa de 57 a 64% do enxofre efluente de reatores UASB (SOUZA, 2010). Para remoção desses gases dissolvidos, a técnica de dessorção apresenta baixo custo e simplicidade operacional, sendo baseada no contato do ar com o efluente. Devido a utilização do ar atmosférico na câmara de dessorção, o gás residual desta apresenta parcela significativa de oxigênio, podendo ser interessante a utilização deste para microaeração no reator UASB como forma de tratar o gás residual, recuperar metano e remover sulfeto do biogás, como apresentado em Marinho (2019).

Em relação ao sulfeto de hidrogênio (H_2S), também conhecido como gás sulfídrico, possui cheiro característico de “ovo podre” em baixas concentrações, sendo um gás incolor, muito tóxico e corrosivo, mais denso que o ar e parcialmente solúvel em água. As principais problemáticas relacionadas ao gás sulfídrico em estações de tratamento de esgotos são referentes a: geração de maus odores, pelo fato do H_2S ser perceptível ao olfato humano em baixíssimas concentrações (0,00047 ppm_v) (METCALFY & EDDY, 2003); corrosão de componentes cimentícios e metais, incluindo sistemas de aproveitamento de energia pela queima do biogás (ROSA *et al.*, 2016) e formação de óxidos de enxofre na queima do gás, contribuindo para a formação de chuvas ácidas.

Como apresentado, ambos os gases podem ocasionar problemas, sendo a parcela dissolvida destes a que apresenta maior dificuldade de gerenciamento. Uma tecnologia simples e eficaz para a remoção desses gases dissolvidos são as câmaras de dessorção (CD), unidades projetadas para agitar a fase líquida e transferir massa para fase gasosa, por meio de renovações constantes de interface. Essas condições são conseguidas pela queda livre do líquido contendo gases dissolvidos em uma unidade fechada, preenchida ou não por meio suporte, e pela exaustão da atmosfera confinada, maximizando o contato entre as fases e favorecendo a dessorção dos gases dissolvidos para a fase gasosa. A proposta de utilizar a câmara de dessorção após reatores UASB já foi abordada em literatura técnica, mas com valores usualmente maiores de rQ, entre 1,1 e 3,1 em Gloria (2016), 0,04 e 159,7 em Santo (2017) e 5,2 e 0,1 em Machado (2018), e menores para as concentrações de metano do gás residual, com valores de 0,3 a 1,0%v/v, 0,16 a 24,7%v/v e 17,1%v/v, respectivamente.

Outra tecnologia para tratamento dos gases de reatores UASB, especificamente do sulfeto de hidrogênio, é a microaeração, que consiste na inserção de pequenas quantidades de ar/oxigênio em reatores biológicos, variando entre 0,03 e 1,27 L O_2 /L de efluente aplicado no reator, de acordo com Krayzelova (2015), tendo sido observado taxas menores, de 0,003 L O_2 /L de efluente, com a mesma finalidade nos trabalhos de Castro (2017) e Marinho (2019). Essa inserção de baixas quantidades de oxigênio ocasiona a oxidação biológica do sulfeto de hidrogênio por meio das bactérias oxidadoras de sulfeto (BOS), oxidando o sulfeto a enxofre elementar (S^0) ou tiosulfato ($S_2O_3^{2-}$), no caso de oxidações parciais, ou a sulfato (SO_4^{2-}), na oxidação total.

Dessa forma, a presente pesquisa busca contribuir com os avanços na remoção do metano e sulfeto dissolvido no efluente de reatores UASB por meio de câmara de dessorção e na aplicabilidade da microaeração com o gás residual da câmara de dessorção para remoção do sulfeto no biogás e recuperação de metano para aproveitamento energético.

OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho consiste na avaliação de câmara de dessorção para remoção dos gases dissolvidos, recuperação de metano e integração, por meio de microaeração, com o reator UASB. Os objetivos específicos para tal pesquisa são:

- Avaliação da CD para remoção e recuperação de metano dissolvido;
- Avaliação da CD para remoção de sulfeto dissolvido;
- Avaliação do gás residual da CD para mistura e microaeração no separador trifásico do reator UASB.

MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida no Centro de Pesquisa e Treinamento em Saneamento (CePTS) UFMG/COPASA, situado na estação de tratamento de esgotos (ETE) da bacia do ribeirão Arrudas, denominada ETE Arrudas, onde as unidades de tratamento (reator UASB e CD) estavam situadas, e em

laboratório de análises físico-químicas do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG (DESA-UFMG). O afluente utilizado foi esgoto doméstico real após o tratamento preliminar. A Tabela 1 mostra as principais características das unidades utilizadas e a Figura 1 as unidades em campo.

Tabela 1: Dimensões do reator UASB e da CD escala demonstração utilizados na pesquisa

Característica	Reator UASB	Câmara de Dessorção
Diâmetro (m)	2,00	0,35
Altura Útil (m)	4,50	1,20
Volume Útil (m³)	14,00	0,136
TDH (h)	Entre 8,00 e 9,00	-
Material	Ferrocimento (corpo do reator) Fibra de vidro (separador trifásico)	Fibra de vidro com 1,00 m de enchimento de anéis plásticos (3 polegadas)



Figura 1: Reator UASB (azul escuro) e câmara de dessorção (branca) utilizados na pesquisa

O monitoramento da fase líquida foi feito por amostragens semanais em triplicata do afluente e efluente da CD para análises do metano e do sulfeto dissolvidos através dos métodos *headspace*-cromatografia (SOUZA *et al*, 2011) para metano e colorimétrico (APHA, 2012) para sulfeto, além de outras análises, como DQO, oxigênio dissolvido, temperatura e pH. Em relação a fase gasosa, foi realizada amostragem semanal com saco de amostragem (*gas sampling bag*) de 1 litro, coletando o gás de exaustão para posteriores medições (triplicata) pelo medidor portátil LANDTEC® tipo GEMTM 5000, quantificando os gases constituintes em porcentagens volumétricas. Para o sulfeto no gás residual, as medições foram feitas diretamente na saída da bomba peristáltica com o equipamento OdaLog® (L2 Gas Logger). Também foram feitas medições de vazão semanais da fase líquida (medição em campo) e da fase gasosa (gasômetro). A Tabela 2 resume as análises realizadas, o método utilizado e a referência.

Tabela 2: Parâmetros monitorados, métodos utilizados e referências

Parâmetro	Método	Referência
Vazão afluente e efluente	Medição em campo	-
Metano dissolvido	Headspace-cromatografia	Souza <i>et al.</i> (2011)
Sulfeto dissolvido	Colorimétrico	APHA (2012)
DQO total	Colorimétrico refluxo fechado	APHA (2012)
pH	Potenciométrico	Sonda multiparamétrica (marca HACH)
Temperatura		
Oxigênio dissolvido		
Sólidos sedimentáveis	Cone Imhoff	APHA (2012)
Produção de biogás	Gasômetro	Medidor de gás Ritter® TG3
Composição de biogás	Analizador portátil	LANDTEC® tipo GEM™ 5000
Sulfeto gasoso	Analizador portátil	OdaLog® (L2 Gas Logger)

Para realização da exaustão de ar na câmara de dessorção foi utilizada bomba peristáltica, com valores de relação entre vazão de gás por vazão de efluente aplicado (rQ) variando de 0,035 a 0,068 (1.380 a 1.794 L/dia). Durante a pesquisa, devido as variações de vazão do reator UASB, a taxa de aplicação na CD variou de 0,15 a 0,34 m³/m².min (vazão aplicada entre 0,24 e 0,54 L/s), estando próximo do recomendado pela literatura técnica (BRANDT *et al.*, 2018). A Figura 2 mostra o esquema geral do sistema utilizado na pesquisa.

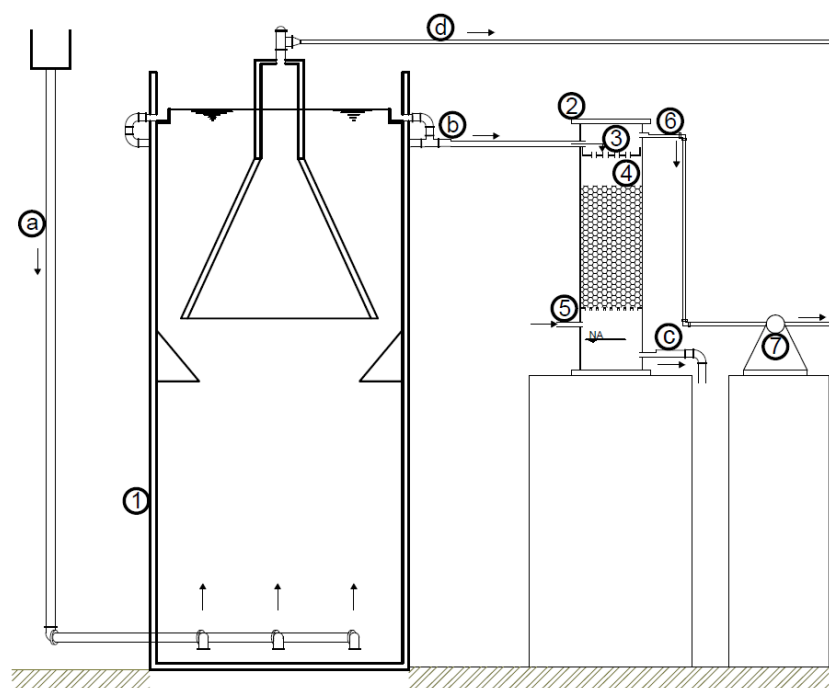


Figura 2: Croqui do sistema utilizado na pesquisa (a. afluente UASB; b. efluente UASB; c. efluente CD; d. saída biogás UASB; 1. reator UASB; 2. câmara de dessorção; 3. bandeja perfurada de distribuição; 4. Enchimento plástico; 5. entrada de ar atmosférico; 6. saída de ar da CD; 7. bomba peristáltica de exaustão)

RESULTADOS OBTIDOS

Em termos de eficiência de remoção de metano dissolvido, obteve-se valores de 34,2 a 65,7%, com média de 52,6%. A Figura 3 mostra a variabilidade desse parâmetro ao longo do tempo. Para o sulfeto, observou-se valores entre 58,4 e 90,2%, com valor médio de 80,1%, como observa-se na Figura 4.

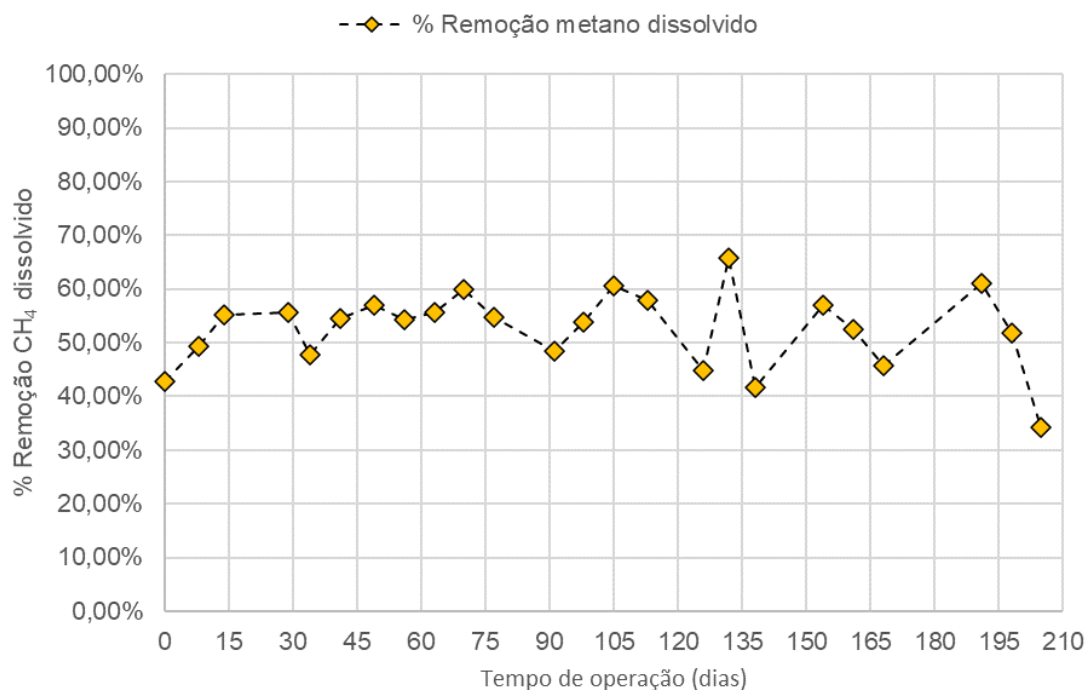


Figura 3: Série histórica da eficiência de remoção de metano dissolvido na câmara de dessorção

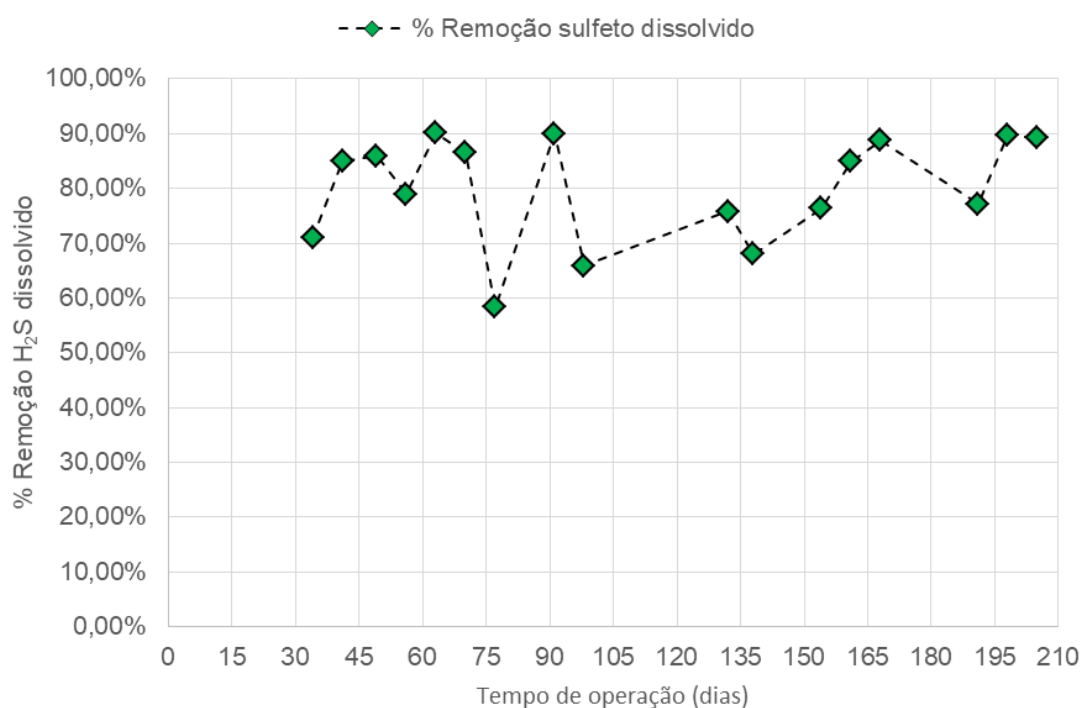


Figura 4: Série histórica da eficiência de remoção de sulfeto dissolvido na câmara de dessorção

Em relação à razão entre vazões de gás e de efluente aplicado na CD (rQ) e a taxa de aplicação superficial, dois parâmetros importantes no projeto e operação desse tipo de unidade, os valores variaram entre 0,035 e 0,068 para o primeiro e de 0,15 e 0,34 m³/m².min para o segundo parâmetro, com valores médios de 0,049 e 0,25 m³/m².min, respectivamente. A Figura 5 mostra a variação desses parâmetros durante a pesquisa.

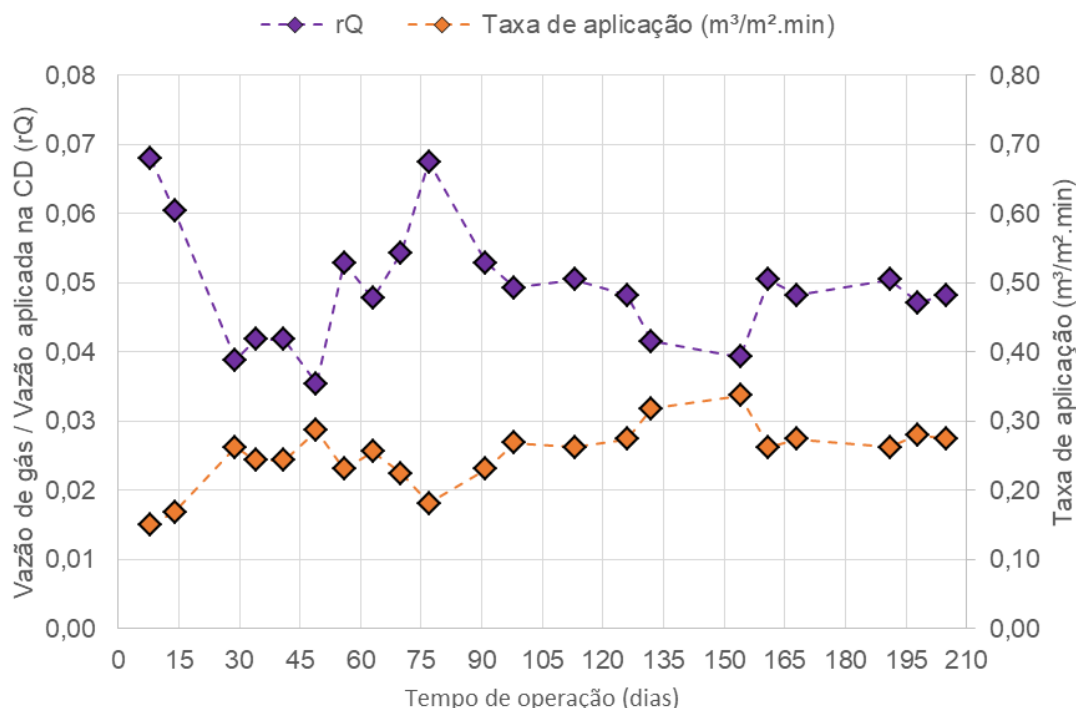


Figura 5: Série histórica do parâmetro rQ e da taxa de aplicação superficial na câmara de dessorção

Sobre a composição do gás residual, observou-se valores entre 14,9 e 30,8%v/v de metano, com o valor médio de 23,2%v/v, sendo bastante elevado em relação aos obtidos em outros estudos de câmaras de dessorção (SANTO, 2017; MARINHO, 2019). Para o caso do sulfeto de hidrogênio, os valores variaram de 43 a 264 ppm de volume, com valor médio de 172,6 ppm_v, estando abaixo dos valores encontrados de 300 ppm (SANTO, 2017) e 580 ppm (MARINHO, 2019) reportados na literatura. Devido ao uso do ar atmosférico, observou-se também a presença de oxigênio, com valor médio de 8,2%v/v e valores mínimo e máximo de 4,0 e 11,6%v/v, respectivamente. Esse intervalo de concentrações é especialmente interessante em termos de segurança do sistema, visto que para um gás que tem como principais componentes o oxigênio, o metano e o nitrogênio (por ser ar atmosférico), o limite de concentração de oxigênio para combustão é de 12%, não sendo possível assim a combustão no sistema independente da concentração dos outros gases (MORA, 2021). A Figura 6 mostra a variação da composição do gás residual ao longo do experimento.

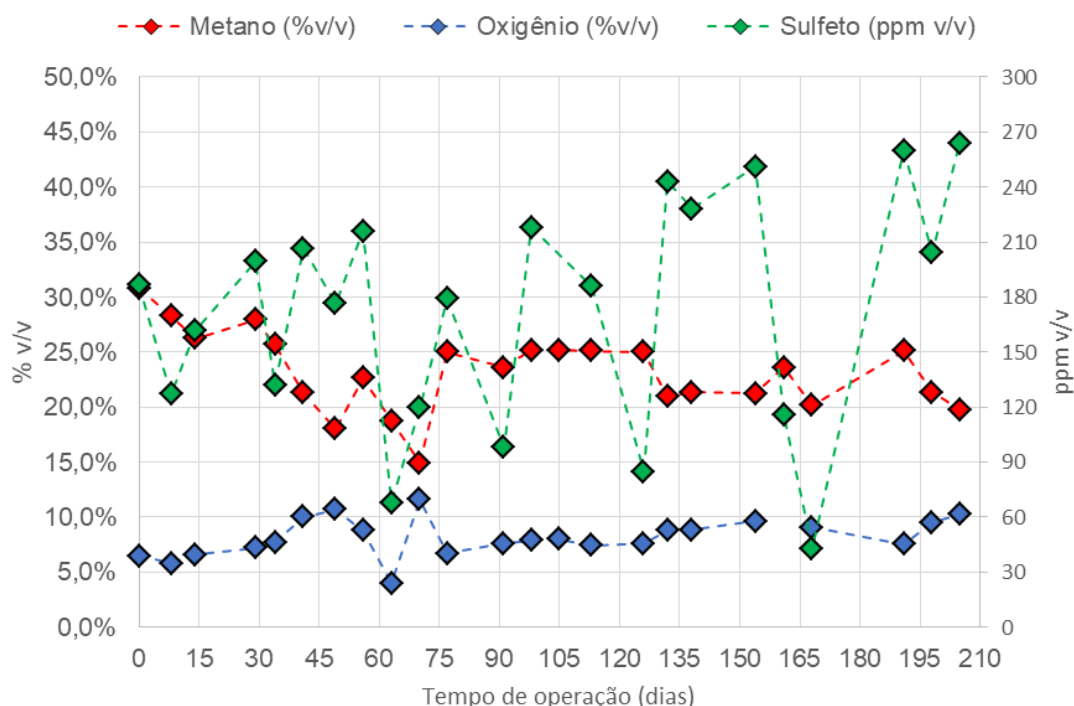


Figura 6: Série histórica da composição parcial (metano e oxigênio) em %v/v do gás residual da câmara de dessorção

Considerando os dados já apresentados e com a finalidade de realizar cálculos para a hipótese de microaeração, obtiveram-se dados médios do reator UASB de 2182 L/dia de biogás gerados no reator, com concentração média de 70% de metano e 1.460 ppm_v de sulfeto, valores típicos em comparação aos encontrados na literatura (CHERNICHARO, 2016).

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Conforme observado, a taxa de aplicação da câmara de dessorção, o TDH e a composição do biogás do reator UASB mostram que o sistema funcionou dentro do esperado para essas unidades. Os valores de rQ praticados foram intencionalmente mais baixos, na perspectiva de aproveitamento do gás residual para a microaeração.

Em relação a eficiências de remoção, os valores foram menores que os encontrados em outros trabalhos. Gloria *et al* (2016) obtiveram eficiências de remoção de 60% para o metano e 84% para o sulfeto, com rQ de 3,1, enquanto Santo (2017) obteve com uma rQ de 0,1 valores de remoção de 89% para o metano e 86% para o sulfeto de hidrogênio. As menores eficiências nessa pesquisa (remoção de 53,0% do metano e 80,1% para o sulfeto de hidrogênio) podem ser justificadas pelos baixos valores de rQ adotados (0,035 a 0,068).

Considerando os valores médios obtidos ao longo do monitoramento da CD (23,2% de metano, 172,6 ppm_v de sulfeto e 8,2% de oxigênio no gás residual, taxa de aplicação de 0,25 m³/m².min e rQ de 0,049) e para o reator UASB com 8,5 h de TDH, vazão afluyente de 39,5 m³/dia e produção média de 2182 L/d de biogás com 70%v/v de metano e 1.460 ppm_v de sulfeto de hidrogênio, desenvolveram-se cálculos para avaliação da mistura do gás residual com o biogás e aplicação da microaeração no separador trifásico com o gás residual.

Em um primeiro momento os cálculos foram feitos considerando uma mistura entre dois fluídos com vazões e concentrações diferentes, sendo posteriormente calculada a mistura assumindo o consumo completo do oxigênio para oxidação do sulfeto existente no biogás, com parcela desse sulfeto sendo transformada em outros compostos de enxofre (enxofre elementar, tiosulfato ou sulfato). A eficiência de remoção do sulfeto devido a microaeração com o gás residual foi baseada nos valores apresentados na etapa 4 do trabalho de

Marinho (2019), com valor médio de 65,7% de remoção do sulfeto no biogás. Os valores de cálculo encontrados considerando a perspectiva de remoção de H_2S pela microaeração são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3: Valores estimados da mistura do gás residual da CD com biogás do reator UASB

Parâmetro	Gás Residual CD	Mistura Biogás e Gás Residual (<i>headspace</i>)	Mistura Biogás e Gás Residual (tubulação jusante)
Vazão (L/d)	1937	4119	3962,5
CH ₄ (%v/v)	23,2	48,0	49,9
O ₂ (%v/v)	8,1	3,8	0
Taxa de microaeração (L _{O2} /L _{esg})	-	0,004	-
H ₂ S (ppm _v)	172,6	854,6	293,1

De acordo com os valores calculados, a utilização do gás de exaustão para microaeração do reator UASB tem potencial para remover grande parte do sulfeto de hidrogênio presente no gás de exaustão e no biogás, conseguindo ainda recuperar massa de metano mantendo valores muito promissores para recuperação energética.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir dos resultados apresentados conclui-se que a câmara de dessorção é uma boa alternativa para remoção de metano (52,6%) e sulfeto dissolvido (80,1%), mesmo utilizando-se baixos valores de rQ (0,035 a 0,068). Essa configuração operacional também permite obtenção de gás residual com interessante composição, com as médias de 23,2%v/v de metano e 8,1%v/v de oxigênio, apresentando grande potencial de utilização para microaeração do reator UASB, formando assim um sistema fechado com efluente final com menores concentrações de metano e sulfeto dissolvidos, biogás final com menores concentrações de sulfeto e maior massa de metano recuperado, com ótima concentração para aproveitamento energético (cerca de 50%v/v).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais), projeto TEC- PPM-00544-17, e ao Programa Regulatório de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação da Agência Reguladora de Serviços de Abastecimento de Água e de Esgotamento Sanitário do Estado de Minas Gerais – ARSAE-MG e à Companhia de Saneamento de Minas Gerais – COPASA, que possibilitaram tal trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA, AWWA, WEF, 2012. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 22nd ed. American Public Health Association, Washington.
2. BRANDT, Emanuel Manfred Freire; SANTOS, Juliana Mattos Bohrer; SOUZA, Cláudio Leite de; POSSETTI, Gustavo Rafael Collere; RIBEIRO, Thiago Bressani; CARVALHO JÚNIOR, Antônio Neves de; CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário - Parte 4: controle de corrosão e emissões gasosas. Revista Dae, [S.L.], v. 66, n. 214, p. 56-72, 2018. Revista DAE. <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2018.041>.
3. 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 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente, Saneamento e Recursos Hídricos) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.
4. CHERNICHARO, C. A. L. Princípio do tratamento biológico de águas residuárias: Reatores anaeróbios. 2. ed., Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA/UFMG, v. 5, 379 p., 2016.

5. GLÓRIA, R. M.; SOUZA, C. L.; CHERNICHARO, C. A. L.; DO CARMO, M. E. A.; SILVA, P. V. O. Effectiveness of a Desorption Chamber for the Removal of Dissolved Gases from Anaerobic Effluents. In: IWA Specialised Conference on Small Water and Wastewater Systems, 13., 2016, Atenas: IWA, 2016.
6. KRAYZELOVA, L.; BARTACEK, J.; DIÁZ, I.; JEISON, D.; VOLCKE, E. I. P.; JENICEK, P. Microaeration for hydrogen sulfide removal during anaerobic treatment: a review. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, v. 14, p. 703–725, 2015.
7. MACHADO, L. M. Câmara de dessorção para efluente de reator UASB no tratamento de esgoto doméstico - avaliação de remoção e recuperação de gases dissolvidos: H₂S e CH₄. 2018. 112 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente, Saneamento e Recursos Hídricos) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.
8. MARINHO, T. D. *Estudo da Microaeração e sua Associação com Câmara de Dessorção na Remoção e Recuperação de Sulfeto de Hidrogênio e Metano em Reatores UASB no Tratamento de Esgoto Doméstico*. 2019. 134 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente, Saneamento e Recursos Hídricos) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.
9. METCALF, L.; EDDY H. P. *Inc. Wastewater Engineering Treatment Disposal Reuse*. 4. ed., New York, McGraw-Hill Book, 1815 p., 2003.
10. MORA, Erick Javier Centeno. Use of membrane contactors for recovering dissolved methane from the effluent of UASB reactors treating sewage. 2021. 218 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021. Disponível em: <https://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/1395D.PDF>. Acesso em: 12 abr. 2023.
11. SANTO, B. C. E. *Avaliação de Câmara de Dessorção de Metano e Sulfeto de Hidrogênio Dissolvidos em Efluentes de Reatores UASB Tratando Esgoto Doméstico*. 2017. 131 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente, Saneamento e Recursos Hídricos) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.
12. SOUZA, C. L. *Estudo das rotas de formação, transporte e consumo dos gases metano e sulfeto de hidrogênio*. 2010. 147 f. Tese (Doutorado em Meio Ambiente, Saneamento e Recursos Hídricos) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.
13. ROSA, A. P.; LOBATO, L. C. S.; BORGES, J. M.; MELO, G.C B.; CHERNICHARO, C. A. L. Potencial energético e alternativas para o aproveitamento do biogás e lodo de reatores UASB: estudo de caso Estação de tratamento de efluentes Laboreaux (Itabira). *Revista de Engenharia Sanitária Ambiental*, v. 21, n. 2, p. 315-328, 2016.