



II-307 – COMPARAÇÃO DA PERDA DE SULFETO DE HIDROGÊNIO DISSOLVIDO: EM UM REATOR UASB OTIMIZADO E UM REATOR UASB CONVENCIONAL

Vanessa Dourado de Melo⁽¹⁾

Engenheira Química pela Universidade Federal de São João Del-Rei (UFSJ). Mestranda em Engenharia Química pela Universidade Federal de São João Del-Rei (UFSJ).

Bárbara Nascimento Lopes de Medeiros⁽²⁾

Graduanda em Engenharia de Bioprocessos pela Universidade Federal de São João Del-Rei (UFSJ).

Robson Júnior Nunes Abreu⁽³⁾

Graduando em Engenharia Química pela Universidade Federal de São João Del-Rei (UFSJ).

Cláudio de Leite Souza⁽⁴⁾

Engenharia 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 da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Jackson de Oliveira Pereira⁽⁵⁾

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 da Universidade Federal de São João Del-Rei (UFSJ).

Endereço⁽¹⁾: Universidade Federal de São João Del-Rei - Campus Alto Paraopeba (CAP). Rod. MG 443, km 07- Fazenda do Cadete - Ouro Branco MG - Cep: 36495 000 - Brasil - Tel Tel: +55 (31) 98221-7580 – e-mail: vanessamello-95@hotmail.com

RESUMO

Os reatores de manta de lodo e fluxo ascendente (UASB - *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), em razão da menor demanda de área, da baixa produção de lodo e dos menores custos de implantação, operação e manutenção são a principal escolha para o tratamento anaeróbios de esgotos domésticos. Todavia, os reatores UASB apresentam alguns problemas, a exemplo da perda de gases dissolvidos no efluente, como o sulfeto de hidrogênio. Este gás dissolvido no efluente pode desprende-se para a atmosfera gerando maus odores e oferecendo perigos à saúde da população. Assim, o desenvolvimento de tecnologias que possam sanar este problema é de extrema relevância. Neste sentido, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito de uma modificação no projeto do separador trifásico de um reator UASB (reator modificado – RM) quanto à recuperação do sulfeto de hidrogênio dissolvido, comparativamente com um reator com separador convencional (reator convencional – RC). Os resultados encontrados foram de 8,7 mg/L para o RM, e 9,6 mg/L para o RC, na análise de H₂S dissolvido, em termos de mediana. Os resultados observados indicam que alterações no projeto do reator modificado propiciaram uma maior recuperação do sulfeto dissolvido no efluente.

PALAVRAS-CHAVE: Sulfeto de Hidrogênio, Gases Dissolvidos, Separador Trifásico, Reator UASB, Inovação Tecnológica.

INTRODUÇÃO

Os reatores de manta de lodo e fluxo ascendente (UASB - *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) se destacam como a principal alternativa no tratamento anaeróbios de esgotos domésticos. A preferência por esses reatores deve-se à menor necessidade de espaço, à baixa produção de lodo, o reduzido consumo de energia elétrica e os menores custos de implantação, operação e manutenção. Entretanto, os reatores UASB apresentam algumas limitações, como o acúmulo de espuma no separador trifásico, a perda de sólidos e de gases dissolvidos no



efluente, e a baixa remoção de patógenos (Chernicharo *et al.*, 2015). Essas limitações apontam para a necessidade de aperfeiçoamentos de modo a aumentar a eficiência dos reatores UASB.

Um dos gases perdidos é o sulfeto de hidrogênio (H_2S), que, quando dissolvido no efluente, pode se desprender para a atmosfera, causando consequências ambientais e sociais. Este gás é conhecido por seus maus odores, que geram desconforto para as populações vizinhas e para os operários das ETEs. Além disso, a inalação prolongada de sulfeto de hidrogênio pode causar graves problemas de saúde. No ar atmosférico, o sulfeto de hidrogênio se transforma em ácido sulfúrico, provocando corrosão acentuada de estruturas, equipamentos e tubulações das ETEs (Silva, 2015; Glória, 2018; Centeno-Mora *et al.*, 2020).

De acordo com Glória (2018), é de extrema importância a realização de estudos visando melhorar os reatores UASB em relação à remoção de gases dissolvidos. Desta maneira, diversas alternativas foram propostas, a exemplo das colunas de dessorção, dos contadores de membranas, da microaeração, da câmara de dessorção a vácuo e *stripping*, para remoção do sulfeto de hidrogênio dissolvido (Glória *et al.*, 2016; Santos *et al.*, 2022; Centeno-Mora *et al.*, 2023; Santos, 2023). A microaeração e as colunas de dessorção mostraram bons resultados na remoção de sulfeto de hidrogênio, entretanto a microaeração é limitada pela ampliação de escala do processo, e as colunas de dessorção têm baixa transferência de massa (Medeiros *et al.*, 2023).

Diante destas constatações, entende-se que a melhor solução seria alcançar o desprendimento dos gases dissolvidos diretamente para a fase gasosa no próprio reator. Assim, o presente trabalho avaliou a recuperação desse gás em uma versão modificada de reator UASB, projetada para permitir que o esgoto escoje pelo interior do separador trifásico, objetivando a promoção de um grau de agitação nessa região que possa proporcionar o maior desprendimento dos gases dissolvidos.

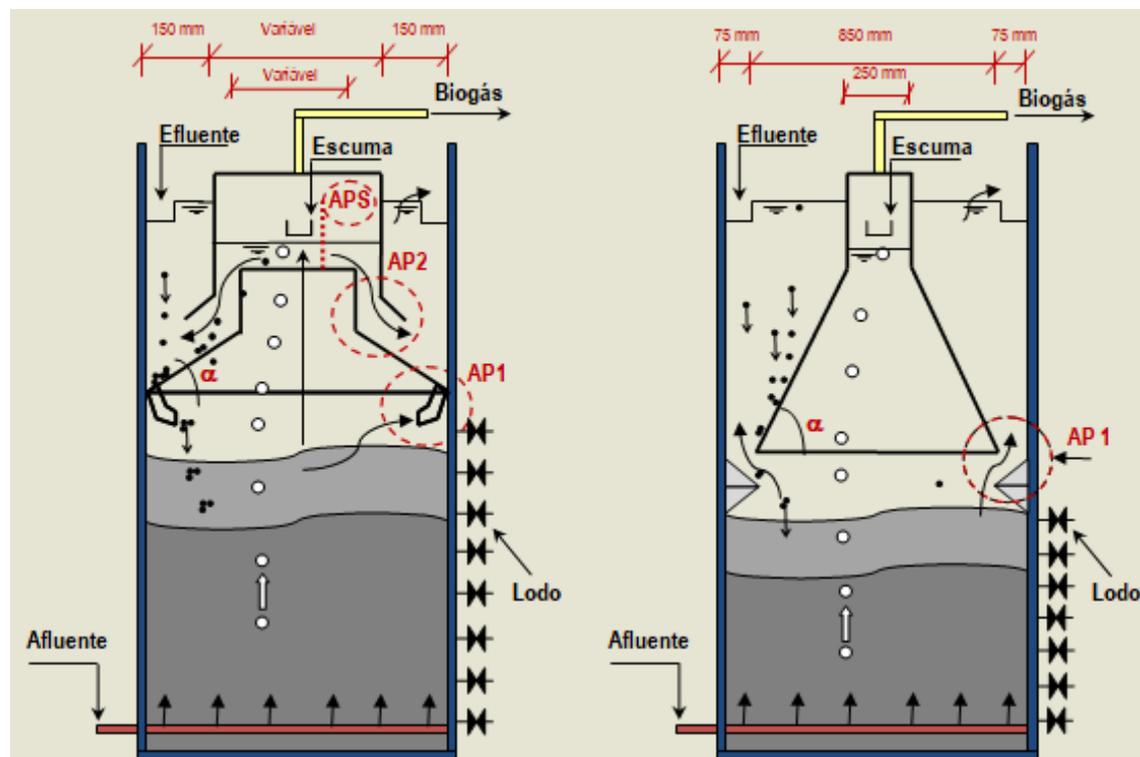
OBJETIVOS

O presente trabalho teve como objetivo analisar o desempenho de uma versão modificada de reator UASB tratando esgotos domésticos, quanto à recuperação da fração do sulfeto hidrogênio que se apresenta dissolvida no efluente.

MATERIAIS E MÉTODOS

APARATO EXPERIMENTAL

Os equipamentos experimentais que foram utilizados no presente trabalho compõem-se de dois reatores UASB em escala de semi-demonstração que foram instalados na Companhia de Saneamento do Estado de Minas Gerais (Copasa), na cidade de Ouro Branco. Os reatores UASB apresentam características de projeto similares, exceto pelas mudanças propostas na configuração do separador trifásico do reator modificado, e foram alimentados com esgoto bruto tratado em nível preliminar. A figura 1 apresenta uma representação esquemática da configuração interna do reator modificado (denominado RM) e do reator convencional (denominado RC).



LEGENDA

AP1 – Abertura destinada à passagem do efluente do compartimento de digestão para o compartimento de decantação, e ao retorno dos sólidos;

AP2 – Abertura destinada à passagem do efluente do compartimento de digestão para o compartimento de decantação, no qual o efluente passa no interior do separador trifásico;

APS – Abertura destinada à passagem do efluente no interior do separador trifásico do compartimento de digestão para o interior da campânula de gás.

AP1 – Área de passagem do efluente da câmara de digestão para o compartimento de decantação e retorno dos sólidos ao compartimento de digestão.

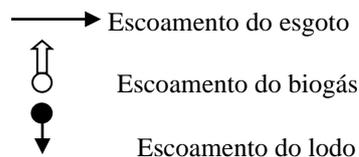


Figura 1: Representação esquemáticas do reator modificado e do reator convencional.

Conforme mostrado na figura anterior, o reator modificado possui três aberturas de passagem do efluente no separador trifásico. A primeira abertura foi denominada AP1, que é a abertura composta por 32 joelhos de plásticos com 50 mm de diâmetro e inclinação de 45°, de maneira a concordar com o ângulo de inclinação do separador trifásico de (45°), resultando em um ângulo total de 90° nas áreas de passagem. Essa situação de projeto impede que o biogás consiga atingir a região de decantação, e concomitante garante condições favoráveis de retorno dos sólidos. A segunda e terceira aberturas foram denominadas AP2 e APS, respectivamente. Estas aberturas foram criadas devido a divisão do separador trifásico em duas fases, sendo a coifa com extremidade superior aberta e a campânula de gás superior a coifa. A campânula de gás do reator modificado apresenta diâmetro de 700 mm, enquanto o diâmetro da campânula de gás do reator convencional é de 500 mm. A tabela 1 apresenta as características de projeto dos reatores UASB.

Tabela 1: Características de projeto dos reatores UASB.

CARACTERÍSTICAS	REATOR - RC	REATOR - RM	UNIDADE
Diâmetro da seção transversal	1,00	1,00	m
Altura útil total	4,70	4,70	m
Volume total	3,69	3,69	m ³
COMPARTIMENTO DE DIGESTÃO			
Volume digestão	3,02	2,77	m ³
Profundidade mínima	3,60	3,15	m
COMPARTIMENTO DE DECANTAÇÃO			
Volume	0,67	0,92	m ³
Profundidade total mínima	1,05	1,50	m
Profundidade mínima da parede vertical	0,48	0,60	m
Inclinação da parede	45	70	°

CONDIÇÕES OPERACIONAIS

Os reatores foram operados diariamente, conforme o hidrograma de vazão do afluente apresentado na figura 2, que teve por objetivo simular as condições reais de funcionamento de uma estação de tratamento de esgoto. O aparato experimental ainda contou com dois temporizados, um inversor de frequências e um horímetro para variar as vazões de entrada do efluente e quantificar o tempo real de operação dos reatores. O acréscimo da vazão correspondeu a 15%, 30% e 50%, em relação à vazão média de 0,46 m³/h, resultando em valores de vazões de 0,53 m³/h, 0,60 m³/h e 0,69 m³/h.

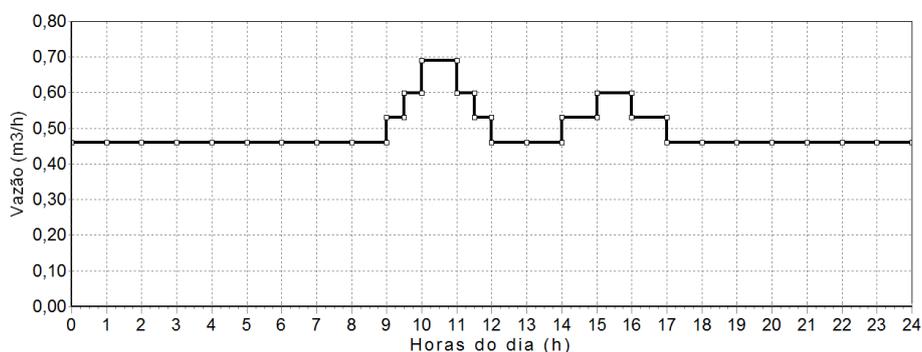


Figura 2: Hidrograma do afluente aos reatores durante operação.

A tabela 2 apresenta os valores dos parâmetros de operação dos reatores para o compartimento de digestão para o compartimento de decantação dos reatores RM e RC.

Tabela 2: Parâmetro de projeto do compartimento de digestão dos reatores UASB.

PARÂMETROS	RM	RC	UNIDADE
TDH médio total	8,00	8,00	m ³
Vazão média	0,46	0,46	m ³ /h
COMPARTIMENTO DE DIGESTÃO			
TDH médio	6,54	6,00	h
Velocidade ascensional para $Q_{média}$	0,59	0,59	m/h
Velocidade ascensional para $Q_{máxima}$	0,87	0,87	m/h
COMPARTIMENTO DE DECANTAÇÃO			
Tempo de detenção hidráulica para $Q_{média}$	1,46	2,00	h
Tempo de detenção hidráulica para $Q_{máxima}$	0,97	1,33	h
Taxa de escoamento superficial para $Q_{máxima}$	1,72	0,94	m ³ /m ² .h

PARÂMETROS DE MONITORAMENTO

Para a caracterização do esgoto bruto e dos efluentes dos reatores foram coletadas amostras compostas durante 24 horas, que foram preservadas à 4°C até o momento da análise. Foram realizadas análises Demanda química de oxigênio (DQO_{total} e DQO_{filtrada}) e Sólidos Suspensos Totais (SST). Todas as análises dos efluentes foram realizadas segundo o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (2023). O período de amostragem foi de agosto de 2023 à maio de 2024.

O monitoramento da produção do biogás foi realizado 3 vezes por semana, durante o intervalo de 24 horas utilizando gasômetros (marca LAO@/G1) instalados no laboratório na estação de tratamento de esgoto. A análise do sulfeto de hidrogênio dissolvido foi feita seguindo a metodologia proposta por Plas *et al.* (1992) e o método 4500, que tem limite de detecção de 1 mg/L até 20 mg/L, a partir de uma curva de calibração construída usando uma solução padrão de sulfeto 1000 mg/L. O monitoramento do H₂S presente na composição do biogás foi feito utilizando-se o Odalog (marca Gás Logger), que possui faixa de detecção de 1-2000 ppm. A tabela 3 apresenta um resumo dos parâmetros e técnicas analíticas utilizadas para análise das amostras.

Tabela 3: Parâmetros e técnicas analíticas utilizadas.

PARÂMETRO	TÉCNICA ANALÍTICA	FREQUÊNCIA
DQO _{total} e DQO _{filtrada}	<i>Standard Methods</i> 5220D, Colorimétrico	2 vezes por semana
Sólidos suspensos totais (SST)	<i>Standard Methods</i> 2540D, Gravimétrico	2 vezes por semana
H ₂ S dissolvido	<i>Standard Methods</i> 4500D, Colorimétrico	2 vezes por semana
H ₂ S biogás	Medição com o aparelho Odalog	2 vezes por semana
Produção do biogás	Medição com gasômetros	3 vezes por semana

RESULTADOS E DISCUSSÃO

SULFETO DE HIDROGÊNIO

A tabela 4 apresenta os resultados dos principais parâmetros de estatística descritiva das concentrações de H₂S dissolvido das amostras coletadas nos reatores modificado (RM) e convencional (RC). Os valores do desvio padrão e do coeficiente de variação, da ordem de ±4,0 mg/L e 50%, respectivamente, indicam uma elevada variabilidade dos dados, o que já era de se esperar, em razão das variações da qualidade do esgoto afluente e das condições ambientais ao longo do período de monitoramento. Em termos das medianas, os valores encontrados foram de 9,6 mg/L, para o reator RC, e 8,7 mg/L, para o reator RM.

Tabela 4: Dados da estatística descritiva da análise de H₂S dissolvido.

PARÂMETROS	RC	RM	UNIDADE
Número de dados	23	23	-
Desvio padrão	4,5	4,2	mg/L
Média	8,9	8,5	mg/L
Mediana	9,6	8,7	mg/L
Coeficiente de variação	50	49	%

Nas figuras 3 e 4 são apresentados os resultados de H₂S dissolvido no formato de série temporal e gráfico Box-plot, nas quais é possível perceber o reator modificado apresentou valores inferiores de concentração de H₂S dissolvido no efluente, na maior parte do tempo operacional, quando comparado com o reator convencional. Observa-se que as concentrações em ambos os reatores variaram no intervalo de 2,0 – 18,0 mg/L, que estão coerentes com os valores comumente reportados na literatura. Souza *et al.* (2012) encontraram valores de concentrações na faixa de 4 - 17 mg/L, para reatores em escala piloto tratando esgoto doméstico com DQO de 500 mg/L, e operados com tempo de detenção hidráulica de 7 h. Marinho (2019), em sua pesquisa apresentou valores de concentrações na faixa de 6,29 - 26,76 para o H₂S dissolvido, em um reator em escala piloto, com tempo de detenção hidráulica de 7 horas tratando esgotos domésticos e valor de DQO afluente de 418 mg/L. Em outro estudo, Cabral *et al.* (2020), apresentou valores de concentrações na faixa de 8-17 mg/L para o H₂S



dissolvido no efluente na saída do reator UASB, em escala piloto, com tempo de detenção hidráulica de 6 h e tratando esgotos domésticos.

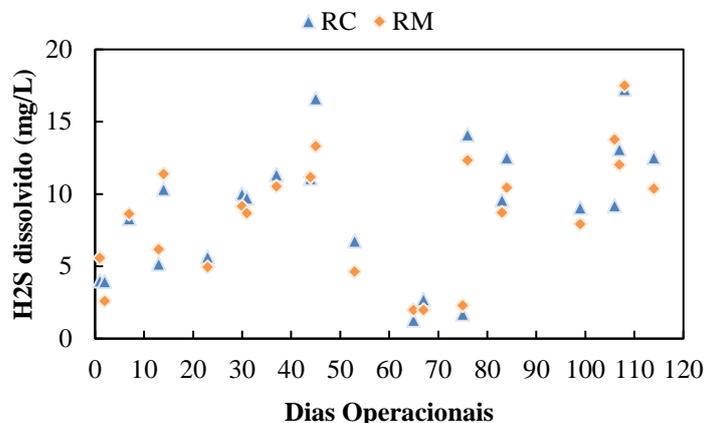


Figura 3: Série temporal da concentração de H_2S dissolvido no efluente.

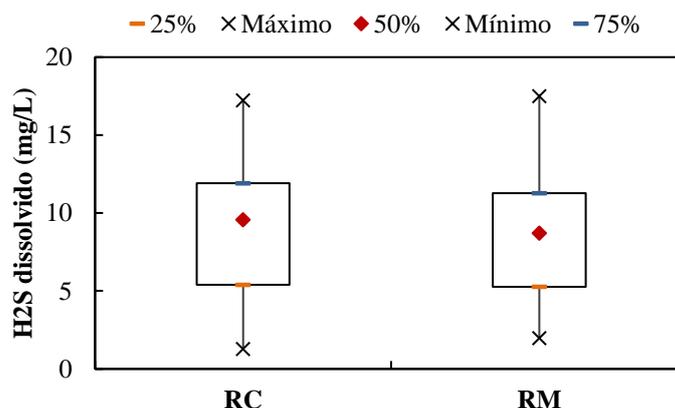


Figura 4: Gráfico Box-plot das concentrações de H_2S dissolvido para os retores RM e RC.

As menores concentrações de sulfeto dissolvido no efluente do reator RM sugerem que as aberturas de passagem do efluente tratado pelo interior do separador promoveram alguma agitação nesta região, que pode ter facilitado a transferência de massa entre a fase dissolvida no líquido e a fase gasosa. Assim, se comprovando, conforme a literatura, que o sulfeto de hidrogênio é facilmente desprendido para a fase gasosa quando se têm a presença de agitação (Souza, 2010).

Além disso, o reator modificado também possui uma campânula com valor de diâmetro elevado, logo está também aumentou a transferência de massa do sulfeto de hidrogênio dissolvido para a fase gasosa do reator modificado, pois, segundo Santos (2023), um aumento da área de contato da transferência de massa, implica na maior interação entre o líquido e gás. Consequentemente, uma elevada área de campânula do biogás propicia a transferência de massa. Tais constatações são corroboradas pelos resultados de H_2S gasoso apresentadas na sequência.

DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO (DQO) E SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS (SST)

A tabela 5 apresenta os valores da estatística descritiva para as análises de DQO_{total} e $DQO_{filtrada}$ para as amostras de esgoto bruto (EB), e os efluentes tratados dos reatores modificado (RM) e convencional (RC), e as eficiências totais e biológicas para os efluentes tratados dos reatores modificado (RM) e convencional (RC). Na análise de DQO_{total} os valores do desvio padrão foram da ordem de ± 115 mg/L para ambos os reatores, e os valores do coeficiente de variação foram da ordem de 50% para ambos os reatores. Enquanto que na análise de $DQO_{filtrada}$ os valores do desvio padrão foram da ordem de ± 50 mg/L para os reatores e os valores do coeficiente de variação foram da ordem de 50% para ambos os reatores. Estes resultados indicam uma grande variabilidade dos dados, o que é explicado pela variação na qualidade do efluente e as condições climáticas durante o período de amostragem. Entretanto, para a eficiência total os valores do desvio padrão foram da ordem de $\pm 17\%$ para o RC e RM e os valores do coeficiente de variação foram de 30%, enquanto os valores do desvio padrão foram na ordem de $\pm 10\%$ para o RC e RM e os valores do coeficiente de variação foram da ordem de 12%. Isto indica que os dados das eficiências total e biológica não apresentam grande variabilidade nos dados.

Tabela 5: Resultados da estatística descritiva para as análises de DQO_{total} , $DQO_{filtrada}$, eficiência total e eficiência biológica.

ANÁLISES	PARÂMETROS	AMOSTRAS			
		EB	RC	RM	UNIDADE
DQO_{total}	Número de dados	37	37	37	-
	Desvio padrão	244	115	111	mg/L
	Média	628	242	240	mg/L
	Mediana	654	222	238	mg/L
	Coeficiente de variação	39	47	46	%
$DQO_{filtrada}$	Número de dados	38	36	33	-
	Desvio padrão	77	50	55	mg/L
	Média	186	105	107	mg/L
	Mediana	186	102	110	mg/L
	Coeficiente de variação	42	47	51	%
Eficiência total	Número de dados	-	35	33	-
	Desvio padrão	-	17	17	%
	Média	-	61	64	%
	Mediana	-	65	66	%
	Coeficiente de variação	-	28	26	%
Eficiência biológica	Número de dados	-	38	34	-
	Desvio padrão	-	10	9	%
	Média	-	83	86	%
	Mediana	-	86	27	%
	Coeficiente de variação	-	12	11	%

A figura 5 apresenta o gráfico Box-plot para a eficiência do reator modificado (RM) e do reator convencional (RC). Esta figura mostra que o intervalo da eficiência do reator convencional foi de 21 – 86%, e para o reator modificado foi de 24 – 87%, o que representa que as modificações realizadas no separador trifásico do reator modificado não afetaram o desempenho da remoção de matéria orgânica. Os valores da eficiência, em termos de mediana, foram similares para ambos reatores, da ordem de 65%. Segundo Chernicharo (2006) os valores típicos de eficiência de reatores UASB tratando esgotos domésticos são na faixa de 55-70%. Assim, os resultados das eficiências encontradas em ambos os reatores estão dentro da faixa reportada na literatura.

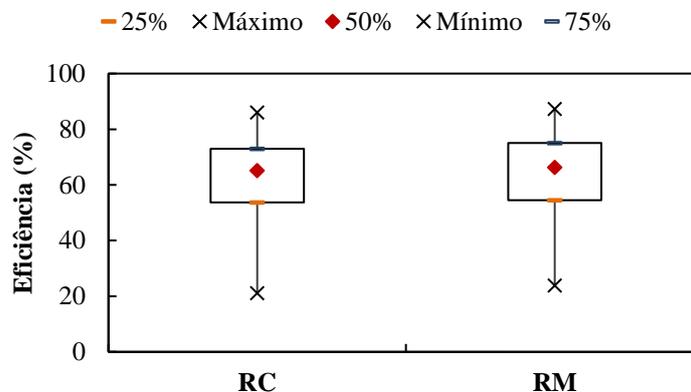


Figura 5: Gráfico Box-plot da eficiência total dos reatores RM e RC.

A tabela 6 apresenta os dados da estatística descritiva para a análise de sólidos suspensos totais (SST). Os valores do desvio padrão foram da ordem de ± 60 mg/L para o reator convencional (RC) e ± 75 mg/L para o reator modificado (RM), e de ± 435 mg/L para o esgoto bruto (EB), mostrando que os dados apresentam uma grande variabilidade. Os valores do coeficiente de variação foram da ordem de 55% para o RC, 64% para o RM, e de 92% para o EB. A figura 6 apresenta o gráfico Box-plot das concentrações de SST para as amostras de esgoto bruto (EB), e os efluentes tratados dos reatores modificado (RM) e convencional (RC). As concentrações, em termos de mediana, foram de: 377 mg/L para o EB, 87 mg/L para o RC e 90 mg/L para o RM. Estes resultados também indicam que as modificações realizadas no separador trifásico não apresentaram resultado de perda quando à retenção de sólidos.

Tabela 6: Dados da estatística descritiva para a análise de SST.

PARÂMETROS	EB	RC	RM	UNIDADE
Número de dados	31	31	33	-
Desvio padrão	435	61	74	mg/L
Média	472	111	116	mg/L
Mediana	377	87	90	mg/L
Coeficiente de variação	92	55	64	%

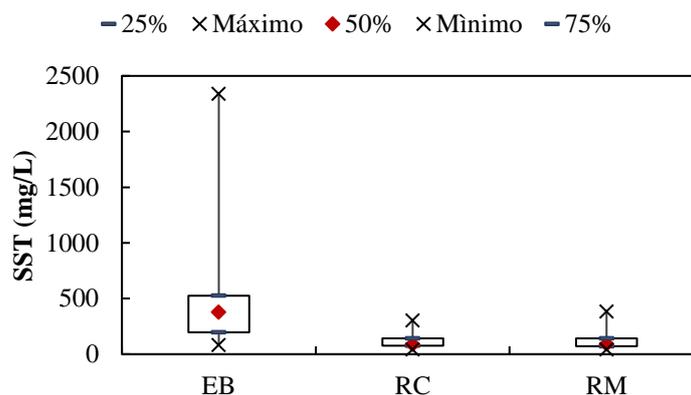


Figura 6: Gráfico Box-plot da concentração de SST para as amostras de EB e os efluentes tratados reatores RM e RC.



CONCLUSÕES

Com base na pesquisa realizada, concluiu-se que as mudanças realizadas no reator modificado apresentaram bons resultados quanto à recuperação do sulfeto de hidrogênio dissolvido no efluente, no qual mostrou que a agitação proveniente das aberturas de passagem do efluente e a maior área de campânula foram eficientes em seu propósito. A maior recuperação do sulfeto de hidrogênio em sua fase gasosa facilita o tratamento e a recuperação do enxofre, assim como evita a ocorrência de emissões fugitivas e os impactos ambientais que este composto pode provocar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA/WEF/ AWWA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 24^a ed. Washington. 2023.
 2. CABRAL, C. S.; SANSOS, A. L.; AFONSO, R. J. C. F.; CHERNICHARO, C. A. L.; ARAÚJO, J. Impact of microaeration bioreactor on dissolved sulfide and methane removal from real UASB effluente for sewage treatment. *Water Science & Technology*, v. 81, n. 9, p. 1951-1950, mai. 2020.
 3. CENTENO-MORA, E.; FONSECA, P. R.; ANDREÃO, W. L.; BRANDT, E. M. F.; DE SOUZA, C. L.; CHERNICHARO, C. D. L. Mitigation of diffuse CH₄ and H₂S emissions from the liquid phase of UASB-based sewage treatment plants: challenges, techniques, and perspectives. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 27, p. 35979-35992, abr. 2020.
 4. CHERNICHARO, C. A. L. Post-Treatment Options for the Anaerobic Treatment of Domestic Wastewater. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, v. 5, fev. 2006, p. 73-92.
 5. CHERNICHARO, C. A. L.; VAN LIER, J. B.; NOYOLA, A.; RIBEIRO, T. B. Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges. *Environmental Science and Biotechnology*, v.14, p. 649–679, set. 2015.
 6. GLÓRIA, R. M. Estudo da remoção dos gases metano e sulfeto dissolvidos em efluentes de reatores UASB tratando esgoto doméstico. Belo Horizonte. 2018. Tese de doutorado. Escola de Engenharia - Universidade Federal de Minas Gerais, 2018.
 7. MEDEIROS, D. L.; DOS SANTOS, C. M. Q.; RIBEIRO, R.; TOMMASO, G. The dissolved methane recovery from treated sewage in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors: The energy demand, carbon footprint and financial cost. *Journal of Environmental Management*, v. 343, out. 2023.
 8. GLÓRIA, R. M.; MOTTA, T. M.; SILVA, P. V O.; DA COSTA, P.; BRANDT, E. M. F.; SOUZA, C. L.; CHERNICHARO, C. A. L. Stripping and dissipation techniques for the removal of dissolved gases from anaerobic effluents. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 33, n. 4, p. 713-721, dez. 2016.
 9. 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 sulfide by colourless sulphur bacteria. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v.36, n.6, p.817-822, mar. 1992.
 10. SANTOS, C. M. Q. D. Remoção de metano dissolvido em efluentes de reatores UASB por expansão volumétrica. São Carlos. 2023. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 2023.
 11. SANTOS, C. M. Q.; DITCHFIELD, C.; TOMMASO, G.; RIBEIRO, C. Use of spray nozzles to recover dissolved methane from na Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) reactor effluent. *Water Science & Technology*, v. 85, n. 85, p. 1538-1548, mar. 2022.
 12. SILVA, T. C. F. Utilização de biogás de estações de tratamento de esgoto para fins energéticos. São Paulo. 2015. Tese de dissertação. Instituto de Energia e Meio Ambiente - Universidade de São Paulo, 2015.
 13. SOUZA, C. L.; CHERNICHARO, C. A. L.; MELO, G. C. B. Methane and hydrogen sulfide emissions in UASB reactors treating domestic wastewater. *Water Science & Technology*, v. 65, p. 1229–1237, 2012.
 14. 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. Belo Horizonte. 2010. Tese de doutorado. Escola de Engenharia - Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.
-