

II-1437 – AVALIAÇÃO DE CÂMARA DE DESSORÇÃO PARA REMOÇÃO E RECUPERAÇÃO DE METANO DISSOLVIDO EM EFLUENTE DE REATOR UASB NO TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO

Jaqueline Conceição Felipe ⁽¹⁾

Engenheira Civil pela Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Jordana Gonçalves de Macedo ⁽²⁾

Graduanda em Engenharia Civil pela Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Cláudio Leite de Souza ⁽³⁾

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

Daniel Carvalho Mota ⁽⁴⁾

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).

Endereço ⁽¹⁾: Rua Lucília Joanina Batista, 60 – Lagoa de Santo Antônio – Pedro Leopoldo - MG - CEP: 33252-605 - Brasil - Tel: (31) 99806-3586 - e-mail: jaquelineconceicao@gmail.com

RESUMO

Os reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (reatores UASB) têm se mostrado uma solução eficiente dentro de sistemas mais simples de tratamento de esgoto doméstico. Apesar de vantajoso, há ainda limitações relevantes, dentre as quais é possível destacar a da formação de metano (CH_4) no processo, que passa a se encontrar dissolvido no efluente do reator. O efluente liberado pode manifestar mau odor e emitir para atmosfera o CH_4 , um dos mais importantes gases de efeito estufa (GEE). Assim, propõe-se a aplicação de uma estrutura simples visando remoção e recuperação deste gás: a Câmara de Dessorção (CD). Buscou-se então avaliar quantitativamente o desempenho de câmaras de dessorção (CDs) com e sem enchimento na remoção e recuperação do metano dissolvido no efluente de um reator UASB, ambos em escala demonstração. Para esse fim foram adotadas baixas razões entre vazão de exaustão e admissão de efluente (rQ) e baixa carga hidráulica superficial (CHS). Obteve-se eficiências de remoção de metano dissolvido para a CD com enchimento de 71,3%, 59,9%, e 48,6% e concentração de metano no gás residual de 12,1% v/v, 15,5% v/v e 29,1% v/v trabalhando-se respectivamente com CHS de 0,09, 0,20 e 0,19 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$, e rQ de 0,05, 0,05 e 0,03. Para a CD sem enchimento, trabalhando-se com rQ de 0,06 e CHS de 0,12 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$, alcançou-se eficiência de remoção de metano dissolvido de 44,2% e concentração de metano no gás residual de 15,5% v/v. Diante dos percentuais de metano alcançados no gás de exaustão, percebe-se que o potencial da CD para finalidade de incremento energético no biogás produzido pelo próprio reator UASB fica mais próximo da aplicação prática. Ainda como finalidade deste estudo, foi realizado o cálculo da concentração teórica de recuperação do metano, com base nas remoções da fase líquida. Foi possível concluir que há significativas perdas no potencial de recuperação no gás residual de exaustão da CD, sendo essas de 67,3%; 59,7%, 21,7% e 35,9%, para as etapas 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Essa perda pode ser ocasionada pela oxidação do metano na fase líquida a partir de microrganismos presentes no biofilme formado no interior das CDs, demonstrando a necessidade da continuidade das investigações sobre o uso dessa tecnologia a fim de identificar as reais causas para minimizá-las.

PALAVRAS-CHAVE: Reator UASB, Metano Dissolvido, Câmara de Dessorção, Remoção e Recuperação.

INTRODUÇÃO

Os reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB) apresentaram ampla aceitação no cenário brasileiro por possuírem muitas vantagens em relação aos processos aeróbios convencionais, viabilizando seu uso em larga escala para tratamento de esgoto doméstico. Para essas condições, são características possíveis de serem elencadas: baixa demanda de área; baixo custo de implantação e operação; baixa produção, alta

concentração e boa desidratabilidade do lodo; rápido reinício do sistema; satisfatória eficiência de remoção de matéria orgânica (CHERNICHARO, 2016; SANTO, 2017).

Entretanto, o uso de reatores UASB apresenta aspectos desfavoráveis que demandam estudos para seu controle, sendo um dos principais desafios o gerenciamento dos gases formados no processo de conversão dos compostos orgânicos, visto que parcela dos gases se despreendem e formam o biogás e outra parcela fica dissolvida na fase líquida, o que permite a emissão para a atmosfera no encaminhamento do efluente do reator. É necessário, portanto, que ocorra o controle dos gases dissolvidos para que haja um bom gerenciamento das estações de tratamento de esgoto (ETEs).

Dentre os subprodutos gasosos que demandam maior atenção está o metano (CH_4), por ser um dos principais gases de efeito estufa (GEE), capaz de absorver a radiação térmica emitida pela superfície terrestre com um potencial 28 vezes superior ao da molécula do dióxido de carbono em um horizonte de 100 anos (IPCC, 2021). Entretanto, se o composto for removido do efluente líquido e recuperado, é possível realizar o aproveitamento energético, quando as concentrações de metano forem próximas ou superiores a 30% v/v (DWA-M 361, 2011; ROCHA-RIOS *et al.*, 2009 apud MARINHO, 2019). Souza (2010), constatou em sua pesquisa que cerca de 36 a 40% de todo o metano produzido no reator UASB, tratando esgoto doméstico, permanece dissolvido no efluente, representando uma perda direta de potencial energético, riscos eventuais de explosividade e emissão de GEE para a atmosfera.

Uma técnica que tem se mostrado promissora na remoção de gases dissolvidos do efluente de reatores UASB é a Câmara de Dessorção (CD). Essa alternativa baseia-se em proporcionar condições de agitação da fase líquida visando a dessorção dos gases dissolvidos por transferência de massa para a fase gasosa, sendo isso possível por meio da queda livre do líquido contrária a um fluxo de ar ascendente em uma unidade fechada e pela exaustão do ar desta atmosfera.

A CD pode ser sem enchimento, de forma que o líquido flui em queda livre no interior da unidade, ou com enchimento, na qual um sistema de meio suporte é disposto no interior da unidade para aumentar a área superficial de contato entre as fases líquida e gasosa, resultando no incremento da dessorção dos gases. Somado a isso, o uso de meio suporte pode levar à formação de biofilme, o que possibilita a remoção dos gases dissolvidos a partir da oxidação bioquímica na presença de oxigênio (SANTO, 2017; GLÓRIA *et al.*, 2016 apud MARINHO, 2019).

OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa consistiu em avaliação de câmaras de dessorção (CDs), com e sem enchimento, como unidade após reator UASB, no tratamento de esgoto doméstico. Visou-se avaliar a capacidade de remoção de metano dissolvido na fase líquida e as concentrações recuperadas no gás de exaustão da CD (gás residual).

Buscou-se também avaliar como parâmetros principais a carga hidráulica superficial (CHS) e a relação entre vazões de ar e líquido (rQ), as quais influenciam o processo de dessorção nas CDs, visando a obtenção de maiores eficiências de remoção dos gases e recuperação efetiva de um gás residual relativamente mais rico em metano (GLÓRIA, 2018; SOUZA, 2010).

MATERIAIS E MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDO E APARATO EXPERIMENTAL

As etapas experimentais da pesquisa foram conduzidas no Centro de Pesquisa e Treinamento em Saneamento UFMG/COPASA (CePTS), um pátio experimental instalado na Estação de Tratamento de Esgotos da sub-bacia do Ribeirão Arrudas (ETE Arrudas), em Belo Horizonte.

Para o desenvolvimento desta pesquisa, utilizou-se um reator UASB de ferrocimento em escala demonstração, em formato cilíndrico, com volume útil de 14 m^3 e tempo de detenção hidráulica (TDH) médio entre 8 e 10 horas. Conectada à saída do efluente do reator foi instalada uma câmara de dessorção (CD), como no esquema ilustrativo apresentado na Figura 1.

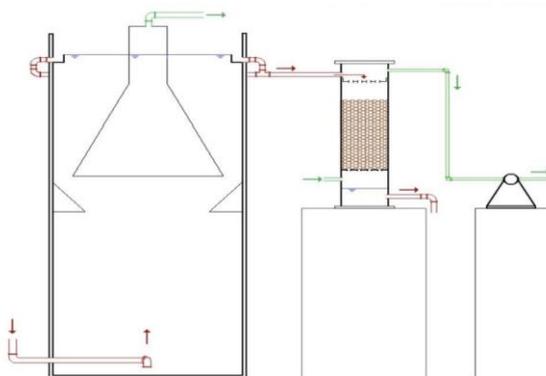


Figura 1: Esquemática do reator UASB em conjunto com a CD com enchimento.

Foi utilizada uma CD com diâmetro útil de 0,35 m e altura de queda d'água de 1,2 m. A entrada do efluente do reator UASB na unidade (afluente da CD) encontrava-se instalada na parte superior a 20 cm do topo, havendo a distribuição do líquido por meio de uma bandeja de PVC (cap) de 200 mm, contendo cinco orifícios de 3/4" cada, posicionada a 10 cm abaixo da entrada do efluente líquido. A saída do efluente da CD ocorria por meio de uma tubulação de PVC de 1 1/2", instalada 2 cm acima do fundo da unidade. Na base da unidade foram realizados três furos de 3/4", posicionados 90° um do outro, 15 cm acima do fundo da CD, para permitir a entrada do ar atmosférico.

Nas Etapas 1 e 2 foi utilizada uma CD em acrílico, com as características dimensionais apresentadas anteriormente e com uma coluna de enchimento de 1,0 m de altura útil, conforme apresentado na Figura 2. Como enchimento foram utilizados anéis plásticos do tipo *Pall* (*Bio Ring* 90 mm), que apresenta área superficial específica cerca de 100 m².m⁻³, índice de vazios de 94% e peso específico de 53 kg.m⁻³.

Para a Etapa 3, a unidade foi substituída por uma CD sem enchimento, em fibra de vidro, com as mesmas características dimensionais, diâmetros e posicionamentos das tubulações apresentadas pela unidade utilizada nas etapas anteriores. Na Etapa 4, utilizou-se a mesma CD em fibra, contudo, foi realizada a limpeza e inserido o mesmo tipo de enchimento utilizado nas Etapas 1 e 2.

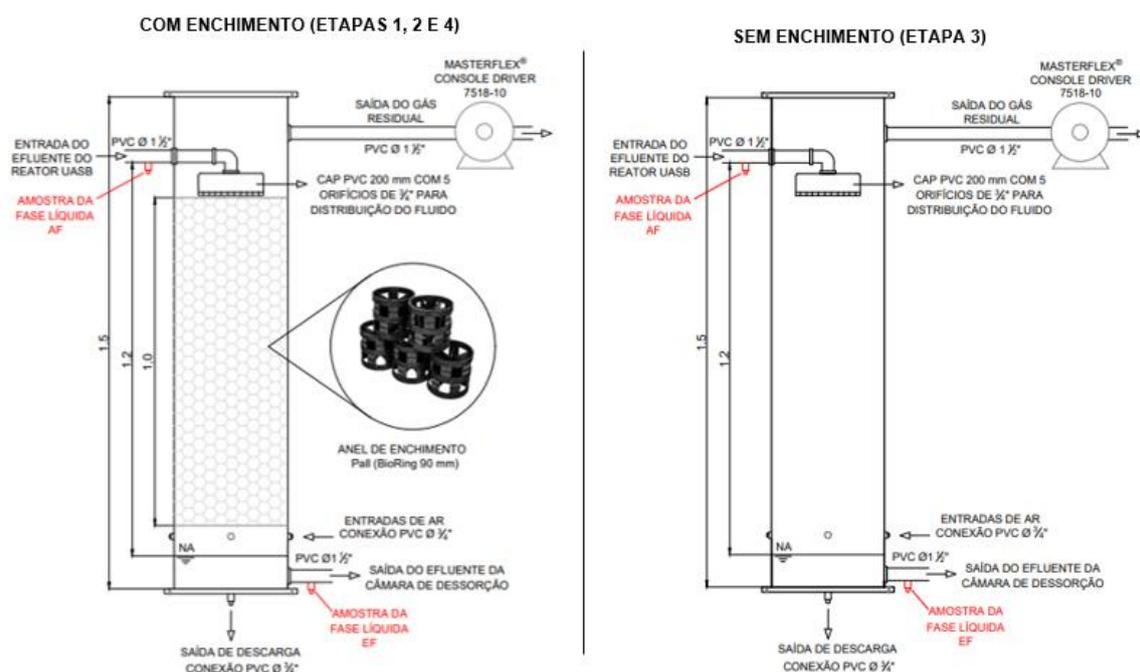


Figura 2: Detalhamento das CDs utilizadas na pesquisa.

A renovação do ar nas câmaras foi realizada em todas as etapas por um sistema de exaustão com utilização de uma bomba peristáltica do tipo *Masterflex® console drive 7518-10*, conectada por meio de uma tubulação de 1 ½” de diâmetro no ponto de saída do gás residual a 11 cm abaixo do topo da CD. Posterior a esta bomba foi utilizado um gasômetro (medidor de gás *Ritter® TG3*) para quantificação da vazão do gás de exaustão das CDs.

A quantificação da vazão de líquido foi realizada a partir da cronometragem do tempo necessário para encher um recipiente de 10 L com o efluente das unidades, sendo adotada a média de um mínimo de três medições, a fim de minimizar os erros das leituras.

CONFIGURAÇÕES EXPERIMENTAIS

As condições operacionais das etapas estão apresentadas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Visando a recuperação de CH₄, foram adotadas baixas relações rQ (relação de vazões de ar de exaustão e de líquido efluente na CD), a partir da regulação da vazão de exaustão da atmosfera confinada e da vazão de líquido afluente do reator UASB. As vazões apresentaram variações, maiores ou menores, em função de dificuldades operacionais com o sistema de bombeamento, mas foram sempre monitoradas.

Tabela 1: Condições operacionais.

CD	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4
Tipo	Com enchimento		Sem enchimento	Com enchimento
Período	12/2018 a 04/2019	05/2019 a 01/2020	09/2021 a 03/2022	04/2022 a 08/2022
CHS (m ³ .m ⁻² .min ⁻¹)	0,09 (0,02)	0,20 (0,07)	0,12 (0,04)	0,19 (0,03)
rQ	0,05 (0,01)	0,05 (0,02)	0,06 (0,05)	0,03 (0,01)

Média (desvio padrão).

A primeira etapa experimental consistiu na avaliação da eficiência de remoção e recuperação do metano dissolvido no efluente do reator UASB com a utilização da CD com enchimento ao longo de 150 dias de operação. A entrada afluente à CD foi instalada 70 cm abaixo da saída efluente do reator UASB. O primeiro dia operacional foi marcado pela limpeza da CD para remoção do material de enchimento da pesquisa anterior realizada por Marinho (2019) e introdução do novo enchimento.

Na segunda etapa experimental ocorreu a elevação da CD de modo que ela passou a estar posicionada 10 cm abaixo da saída efluente do reator UASB. Essa elevação da CD foi proposta por Michaelsen (2019), para avaliação da influência da condução hidráulica entre o reator e a CD no desprendimento dos gases dissolvidos pela turbulência e formação de bolhas na trajetória entre as unidades. Tal pesquisa foi conduzida paralelamente ao presente estudo, porém não ocasionou interferências na investigação pretendida visto que o foco do trabalho em questão está na avaliação da eficiência de operação da câmara.

Manteve-se a razão rQ e ampliou-se a CHS para um valor médio de 0,20 m³.m⁻².min⁻¹, para avaliar os efeitos do aumento da vazão de líquido sobre o sistema. Esta etapa foi realizada em 281 dias de operação, com monitoramento duas vezes na semana. O enchimento utilizado foi mantido o mesmo, conforme está apresentado na Figura 3, não foram realizadas limpezas para remoção do biofilme acumulado da etapa anterior de operação, sendo realizado apenas o descarte semanal do lodo acumulado na parte inferior da CD para evitar entupimentos da saída efluente.



Figura 3: Imagem real da CD no início da Etapa 2.

A terceira etapa experimental iniciou-se com a substituição da CD em acrílico pela CD em fibra de vidro, conforme apresentado na Figura 4, e consistiu-se na avaliação da eficiência de remoção e recuperação do metano dissolvido no efluente do reator UASB com a utilização da CD sem enchimento. O monitoramento desta unidade ocorreu ao longo de 204 dias de operação.



Figura 4: Imagem real da CD utilizada na Etapa 3 (sem enchimento) e 4 (com enchimento).

A quarta etapa foi marcada pela limpeza da CD da etapa anterior e inserção dos anéis plásticos tipo *Pall* (*Bio Ring* 90 mm) em abril de 2022, sendo conduzida durante 144 dias de operação. Trabalhou-se com menor razão rQ e maior CHS média, 0,03 e de 0,19 m³.m⁻².min⁻¹, respectivamente.

MONITORAMENTOS E ANÁLISES

Foram definidos dois pontos para coleta de amostra para as análises da fase líquida: um ponto no afluente da CD (AF); e outro ponto para o efluente da CD (EF). Apenas para fins de monitoramento das condições físico-químicas buscou-se realizar análises das amostras coletadas para verificação do potencial hidrogeniônico (pH), temperatura e oxigênio dissolvido (OD) por meio do uso de sonda multiparamétrica (modelo HACH HQ40D) e dos sólidos sedimentáveis por meio do uso de Cone de Imhoff. Quantificou-se também a partir das recomendações estabelecidas no *Standard Methods* (APHA, 2012) a demanda química de oxigênio (DQO), a fim de monitorar a matéria orgânica presente nas amostras.

Como foco principal da pesquisa, foram realizadas análises de metano dissolvido para amostras coletadas nos pontos definidos das CDs. Para essas análises, foi adotado o método de cromatografia gasosa, conforme as

recomendações estabelecidas por Souza *et al.* (2011). Para as coletas em campo, foram utilizados frascos de vidro de 60 ml, conforme apresentado na Figura 5, rotulados e previamente pesados, havendo a coleta de aproximadamente 25 ml de efluente. Houve especial atenção para evitar a turbulência, formação de bolhas e desprendimento destes gases presentes na fase líquida, sendo os frascos imediatamente fechados com rolhas de borracha, lacrado com tampas de alumínio e mantidos refrigerados até o momento da análise.



Figura 5: Frascos das amostras utilizadas nas análises de metano dissolvido.

Para as análises referentes à fase gasosa, buscou-se aferir a recuperação do metano que se desprende do meio líquido para a atmosfera confinada da câmara por meio do processo de dessorção. Para o gás residual da CD, definiu-se o ponto de amostragem à montante da bomba peristáltica de exaustão. A análise das amostras foi realizada com um analisador portátil da LANDTEC® tipo GEM 5000, sendo as leituras em campo para concentrações de CH₄, CO₂, O₂ e N₂, em porcentagem (%), e H₂S, em partes por milhão (ppm).

DETERMINAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES TEÓRICA DE RECUPERAÇÃO DE METANO NO GÁS RESIDUAL NAS ETAPAS DE OPERAÇÃO

Realizadas as análises para obtenção da concentração de metano dissolvido nas fases líquida afluyente e efluente das CDs para cada fase de operação, buscou-se determinar o potencial de recuperação de metano pelo processo de dessorção a partir do cálculo das concentrações teóricas do metano no gás residual.

Para isso, foi utilizada a equação de equilíbrio do balanço de massa entre as fases. Isolando-se a relação rQ e, considerando-se que a concentração de metano no gás residual em mg. L⁻¹ pode ser obtida multiplicando-se a concentração percentual pela densidade do metano para temperatura ambiente, de cerca de 25°C, cujo valor é de 597 mg. L⁻¹. Assim, foi possível obter a concentração percentual em volume de metano no gás residual, conforme a equação 1.

$$C_{\%CH_4} = \frac{C_{L-CH_4,af} - C_{L-CH_4,ef}}{597 \times rQ} \quad \text{equação (1)}$$

Em que:

$C_{L-CH_4,af}$: concentração de metano dissolvido afluyente no sistema (mg. L⁻¹);

$C_{L-CH_4,ef}$: concentração de metano dissolvido efluente no sistema (mg. L⁻¹);

rQ: razão entre vazão de ar e de líquido (adimensional);

$C_{\%CH_4}$: concentração de metano no gás residual (% v/v);

RESULTADOS OBTIDOS

Os parâmetros físico-químicos do afluyente e o efluente da CD monitorados durante as etapas operacionais estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros físico-químicos do afluente e efluente da CD, nas Etapas 1, 2, 3 e 4.

ETAPA	PARÂMETRO ESTATÍSTICO	CD _{AF}				CD _{EF}			
		T (°C)	pH	DQO (mg. L ⁻¹)	OD (mg. L ⁻¹)	T (°C)	pH	DQO (mg. L ⁻¹)	OD (mg. L ⁻¹)
1	MÉDIA	27,1	7,1	123,4	1,2	27,2	7,0	115,1	2,5
	DP	1,5	0,1	30,6	0,7	1,4	0,6	23,5	0,7
	N	30	30	30	30	30	30	30	30
2	MÉDIA	25,6	7,3	130,8	1,0	25,7	6,7	124,8	1,6
	DP	2,3	0,1	48,8	0,6	2,4	2,4	66,4	0,9
	N	28	27	28	26	28	27	28	26
3	MÉDIA	27,2	7,1	66,6	1,9	25,5	7,2	67,8	3,1
	DP	2,0	0,3	22,3	1,0	1,6	0,2	29,3	0,9
	N	16	11	14	8	14	11	14	8
4	MÉDIA	25,1	7,0	115,7	1,9	24,0	7,4	132,3	3,5
	DP	1,7	0,3	21,1	0,9	2,5	0,1	37,7	0,9
	N	20	23	17	18	20	23	17	18

DP: Desvio padrão; **N:** Número de dados.

Foi possível verificar em todas as etapas que a concentração de oxigênio dissolvido (OD) foi maior no efluente da CD do que no afluente, demonstrando que a renovação do ar da atmosfera confinada da unidade propicia também a transferência de massa da fase gasosa para a fase líquida. Houve menor incorporação de oxigênio dissolvido (OD) no efluente da CD na Etapa 2, que pode estar relacionada com a maior carga hidráulica superficial aplicada para relação rQ similar à da Etapa 1 (0,05). Em todas as fases avaliadas, observou-se que a CD não proporcionou remoção adicional de DQO em relação ao tratamento com o reator UASB.

Para o metano dissolvido no afluente da CD, as concentrações obtidas em termos de mediana foram de 14,1; 21,6; 14,5 e 15,4 mg. L⁻¹ e as concentrações no efluente foram de 4,1; 8,8; 8,1 e 7,2 mg. L⁻¹ para as etapas 1, 2, 3 e 4, respectivamente, conforme apresentado na Tabela 3. Observa-se que a concentração afluente na Etapa 2 foi superior às demais etapas.

Tabela 3: Estatística descritiva da concentração de metano dissolvido (mg. L⁻¹) nas amostras afluente e efluente da CD nas Etapas 1, 2, 3 e 4.

ETAPA	AMOSTRA	N	MÁXIMO	MÍNIMO	MÉDIA	MEDIANA	DP	CV
1	AF	26	21,5	9,7	14,1	14,1	2,3	0,2
	EF		8,0	1,1	4,1	4,1	1,6	0,4
2	AF	18	26,9	17,3	21,9	21,6	3,0	0,1
	EF		13,3	6,7	9,0	8,8	1,7	0,2
3	AF	16	18,4	12,1	14,8	14,6	2,8	0,1
	EF		11,0	6,5	8,5	8,2	1,8	0,2
4	AF	17	20,5	6,8	13,9	15,4	4,6	0,3
	EF		9,8	3,3	6,9	7,2	2,3	0,3

DP: Desvio padrão; **N:** Número de dados; **CV:** Coeficiente de variação.

Dispondo-se destes resultados, calculou-se as eficiências de remoção do metano dissolvido, cujos valores estão representados na Figura 6, sendo de 71,3% na Etapa 1, 59,9% na Etapa 2, 44,2% na Etapa 3 e 48,6% na Etapa 4, respectivamente, valores de medianas. Observa-se que a maior eficiência de remoção de metano dissolvido ocorreu na Etapa 1 (CD com enchimento e carga hidráulica baixa) e a menor eficiência foi obtida na Etapa 3, (CD sem enchimento).

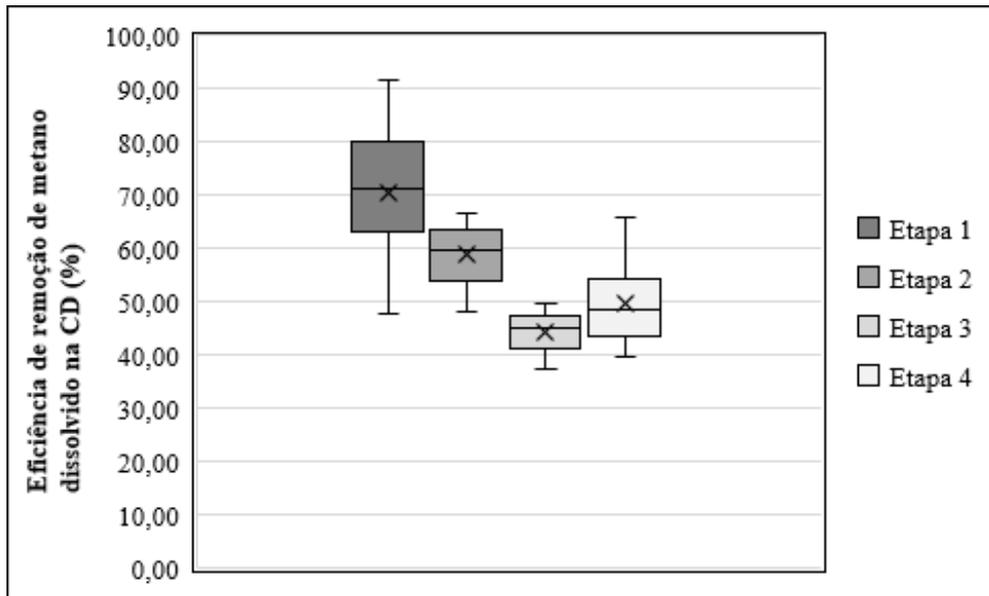


Figura 6: Eficiências de remoção de metano dissolvido na CD.

A partir da quantificação de metano dissolvido removido da fase líquida e dispondo-se do monitoramento das relações rQ trabalhadas, calculou-se as concentrações teóricas do composto no gás residual a partir da equação 1. As concentrações obtidas, em mediana, foram de 37,0% v/v; 38,5% v/v; 19,8% v/v e 45,4% v/v, respectivamente, para as etapas 1, 2, 3 e 4, conforme apresentado na Figura 7.

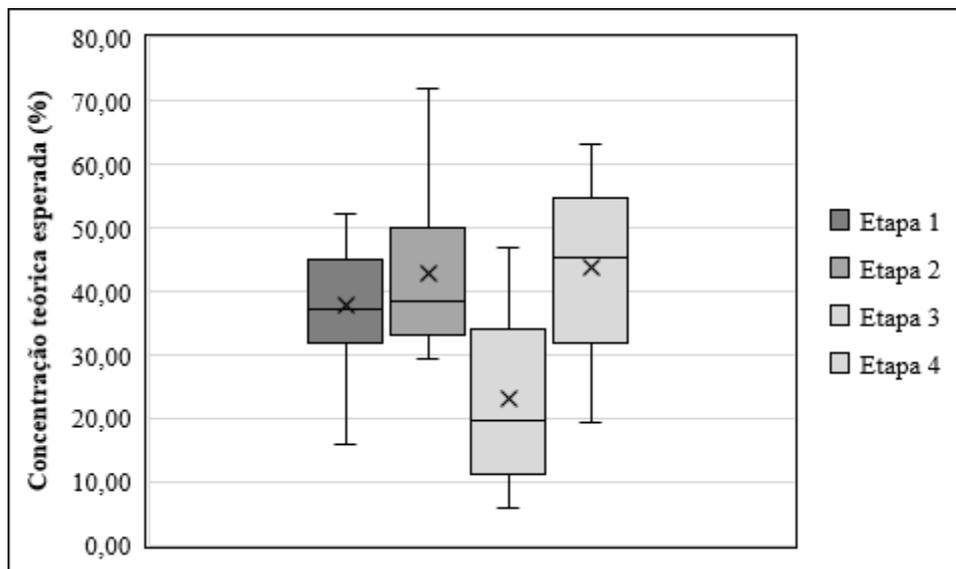


Figura 7: Concentração teórica calculada CH₄ no gás residual.

As quantificações de metano no gás residual aferidas com o analisador portátil em campo estão apresentadas na Tabela 4, sendo as concentrações em termos da mediana de 12,1% v/v; 15,5% v/v; 15,5% v/v e 29,1% v/v para as etapas 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Confrontando-se estes valores com a concentração esperada de metano no gás residual verificou-se que para todas as etapas ocorreram perdas na recuperação do CH₄ no processo, sendo essas de, respectivamente, 67,3%, 59,7%, 21,7% e 35,9% para as quatro etapas.

Tabela 4: Concentração de metano no gás residual (%v/v) medidas em campo nas Etapas 1, 2, 3 e 4.

DADOS	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4
Média	12,5	17,3	16,2	27,5
Mediana	12,1	15,5	15,5	29,1
DP	3,3	5,8	4,8	6,4
CV	0,3	0,3	0,3	0,2
Mínimo	5,3	6,7	7,5	14,4
Máximo	18,8	30,4	24,8	36,5
N	32	40	18	16

DP: Desvio padrão; N: Número de dados; CV: Coeficiente de variação.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A eficiência na Etapa 1, foi próxima à alcançada por Santo (2017) de 73,3%, para uma CD com enchimento (rQ de 0,10 e CHS de $0,30 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$). Assim, obteve-se eficiência de remoção satisfatória, trabalhando-se com menor rQ, gerando menor consumo de energia pela bomba. Entretanto, Santo (2017), alcançou concentração de metano no gás residual de 21,2% v/v. A menor recuperação em relação ao estudo citado (12,1% v/v) pode estar relacionada com a menor CHS (valor médio foi de $0,09 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$), havendo menor admissão de líquido e conseqüentemente menor carga de metano na fase líquida para ser recuperada pela vazão de exaustão.

Na Etapa 2, com o aumento considerável da CHS para $0,20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$, ocorreu redução na eficiência de remoção do metano dissolvido para 59,9%. Não foram identificados problemas recorrentes por entupimento nas tubulações da CD que pudessem impactar o desprendimento do metano dissolvido como observado na pesquisa de Marinho (2019).

Apesar da menor eficiência de remoção na fase líquida que na Etapa 1, na Etapa 2 a concentração de CH_4 no gás residual ampliou-se para 15,5%. Assim, o aumento da CHS possibilitou o aumento da admissão de afluente, que em conjunto a maior vazão de exaustão para manter a rQ de 0,05, ampliou o processo de dessorção.

A eficiência de remoção de 44,2% na Etapa 3 foi a menor encontrada. O líquido submetido à queda livre na CD sem enchimento resultou em menor remoção de metano, devido principalmente à menor área superficial de contato entre as fases líquida e gasosa e menor agitação pela ausência do enchimento. Entretanto, a concentração de CH_4 no gás residual foi de 15,5% v/v, havendo uma recuperação superior à das etapas anteriores. Uma hipótese é que nesta etapa tenham ocorrido menos perdas do metano pela oxidação biológica, tendo em vista a ausência de enchimento, havendo, portanto, menos meio suporte para a formação do biofilme.

Assim, a perda de potencial verificada ao se comparar a concentração de metano esperada a partir da remoção na CD e a concentração medida em campo pode estar relacionada à ocorrência de oxidação do metano na fase líquida, por bactérias metanotróficas que podem estar presentes no biofilme que se forma no interior das unidades, o que corrobora para que as maiores perdas tenham ocorrido para as CDs com enchimento, tendo em vista a maior área superficial disponível no enchimento para servir como meio suporte. Tais organismos são capazes de utilizar o metano como fonte de carbono e energia.

Ao se comparar a remoção de metano dissolvido da Etapa 4 com as Etapas 1 e 2 houve uma redução de respectivamente de 31,8% e 18,8% para as eficiências em termos da mediana. Contudo, a concentração de CH_4 no gás residual foi consideravelmente maior, com mediana de 29,1% v/v. Chamou atenção o valor máximo de média mensal de 32% v/v, indicando a possibilidade de aproveitamento energético. A considerável melhora de recuperação do metano no gás residual fica evidente na Figura 8, o que ocorreu mesmo com a CHS relativamente alta, mas com relação rQ menor entre todas as etapas (0,03).

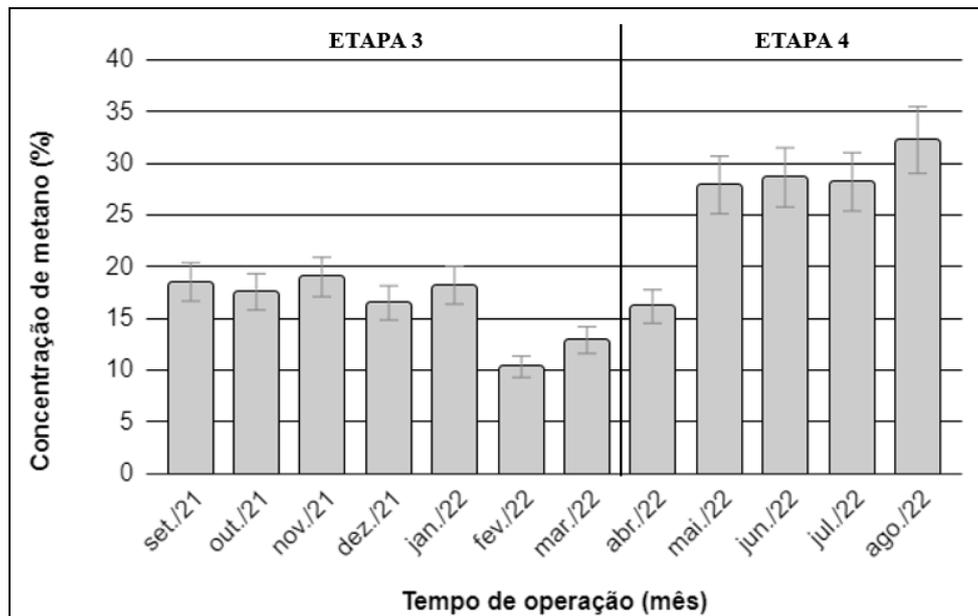


Figura 8: CH₄ no gás residual nas Etapas 3 e 4, médias mensais.

CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

Os resultados alcançados reforçam que a câmara de dessorção (CD) é uma solução aplicável para a remoção e recuperação de metano dissolvido em efluente de reatores UASB. Observou-se que, operando em condições de baixa relação rQ, o enchimento na unidade possibilita o aumento da eficiência de remoção do metano, por favorecer a turbulência e ampliar a área superficial de interface entre gás/líquido.

No que se refere à recuperação do CH₄ no gás de exaustão da CD, verificou-se que as concentrações alcançadas para as três etapas iniciais (12,1% v/v; 15,5% v/v e 15,5% v/v) estão abaixo de concentrações que possibilitam o aproveitamento energético (30% v/v). Dessa forma, para atingir concentrações favoráveis a esse tipo de aplicação, somente com alternativa de mistura com o próprio biogás produzido normalmente no reator UASB.

Na Etapa 4, com a redução da razão rQ, obteve-se maior concentração de metano no gás residual, em níveis seguros de operação e, eventualmente, possíveis de serem aproveitados energeticamente, tendo atingido valores máximos pouco maiores que 30% v/v. Em contrapartida, a menor relação entre as vazões (0,03) impactou a eficiência de remoção do metano na fase líquida, tornando-a menor, próxima ou menor que 50%. Valores medianos obtidos de concentrações de CH₄ no gás residual de 29,1% v/v são ainda mais interessantes para mistura com o biogás, que apresenta valor cerca de 70%. Assim, diante dos percentuais alcançados nessa etapa, percebe-se que o potencial da CD para finalidade de incremento do potencial energético do reator UASB fica mais próximo da aplicação prática.

A partir da verificação das concentrações teóricas de recuperação, foi possível concluir que há perdas consideráveis na recuperação do metano no gás residual, possivelmente ocasionadas pela oxidação aeróbia do metano na fase líquida, sendo necessários novos estudos para melhores entendimentos desse processo.

Diante de concentrações de metano no gás residual que superaram pouco os 30% v/v e, ao mesmo tempo, ocasionam diminuição na eficiência de remoção, pode ser mais interessante privilegiar o aumento de remoção (valores próximos ou maiores que 60%), por meio de maiores relações rQ (a partir de 0,04). Com isso, a recuperação do gás residual com concentrações em torno de 20% v/v poderia ser totalmente direcionada para perspectiva de mistura com o próprio biogás gerado no reator UASB.



AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à 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. BRASIL. Ministério das Cidades. Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto. Brasília, 2015.
2. CHERNICHARO, C. A. de L. Reatores anaeróbicos. 2ª ed. ampliada e atualizada. Belo Horizonte: DESA/UFMG, v. 5, 379 p., 2016.
3. GLÓRIA, R. M. Estudo da remoção dos gases metano e sulfeto de hidrogênio dissolvidos em efluentes de reatores UASB tratando esgoto doméstico. Dissertação (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Belo Horizonte, 175 p., 2018.
4. IPCC, Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas. AR6 (Sexto Relatório de Avaliação). Disponível em: http://chrome-extension://efaidnbmninnibpcjpcglclefindmkaj/https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter_07_Supplementary_Material.pdf. Acesso em: 17 de Jul. de 2022.
5. 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. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Belo Horizonte, 149 p., 2019.
6. MICHAELSEN, T. M. Avaliação de operação prolongada e melhorias em câmara de dessorção para remoção de sulfeto de hidrogênio e recuperação de metano dissolvido. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Belo Horizonte, 9 p., 2019.
7. SANTO, B. C. E. Avaliação de câmara de dessorção de metano e sulfeto de hidrogênio dissolvidos em efluentes de reatores UASB tratando esgoto doméstico. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Belo Horizonte, 134 p., 2017.
8. 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. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Belo Horizonte, 147 p., 2010.
9. SOUZA C. L.; CHERNICHARO, C. A. L.; AQUINO S. F. Quantification of dissolved methane in UASB reactors treating domestic wastewater under different operating conditions. *Water Science and Technology*, v. 64, n. 5, p. 2259-2264, 2011.