

II-572 - AVALIAÇÃO DE CÂMARA DE DESSORÇÃO PARA REMOÇÃO DE METANO E SULFETO DE HIDROGÊNIO DISSOLVIDOS EM EFLUENTES DE REATORES UASB TRATANDO ESGOTO DOMÉSTICO

Belinazir Costa do Espírito Santo

Engenheiro Químico pela Universidade Federal de Minas Gerais. Mestrando em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos na SMARH/UFMG.

Roberto Meireles Glória

Engenheiro Ambiental pela Universidade FUMEC. Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pelo SMRAH/UFMG. Professor Efetivo do CEFET-MG. Doutorando em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos no SMARH/UFMG.

Lucas Martins Machado

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais. Mestrando em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos no SMARH/UFMG.

Cláudio Leite de Souza⁽¹⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Viçosa. Mestre e Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pelo SMARH/UFMG. Professor Adjunto da UFMG.

Endereço⁽¹⁾: Av. Pres. Antônio Carlos 6627 Escola de Engenharia Bloco 2 Sala 4630 - Campus Pampulha - Belo Horizonte - MG - CEP: 31270-901 - Brasil - Tel: (31) 3409-1017 - e-mail: claudio@desa.ufmg.br

RESUMO

A presença dos gases metano e sulfeto de hidrogênio dissolvidos no líquido efluente de reatores UASB no tratamento de esgoto doméstico é uma problemática que causa preocupações em âmbitos sociais, ambientais e econômicos. Assim, tem sido recorrente a preocupação de aproveitamento dos gases de potencial energético (metano em altas concentrações), o controle dos gases de efeito estufa (metano fugitivo em baixas concentrações) e os odorantes (sulfetos de hidrogênio). Este trabalho, teve como o objetivo realizar experimentos com aprimoramentos na técnica de câmara de desorção (CD) para controle desses gases dissolvidos no efluente. Tal unidade foi testada em escala piloto, com as características de altura útil (ΔH) de 1,00 e 1,50 m, para avaliar os efeitos da altura de queda na remoção dos gases metano e sulfeto de hidrogênio no efluente de um reator UASB de escala demonstração (250 habitantes). Nestas configurações, também foram avaliadas as performances da técnica aos efeitos da carga hidráulica superficial (CHS) e relação ar/líquido (rQ) em fluxo contracorrente. Com resultados de 63,4% de remoção de metano e 77,1% de sulfeto de hidrogênio nas condições de CHS de 0,35 m³/m².min e rQ de 2,9, a câmara de desorção de 1,50 de altura indicou que o aumento da altura de queda, elevando a energia de turbulência da fase líquida, melhora as eficiências de tratamento/remoção desses gases dissolvidos. Os resultados computados de ambas configurações experimentais indicaram ainda que as melhores eficiências de controle desses gases conjugaram em determinadas dosagens de ar, cujas relações rQ ótimas encontram-se nas proporções de 2:1 a 3:1.

PALAVRAS-CHAVE: Metano dissolvido, sulfeto de hidrogênio dissolvido, câmara de desorção, reator UASB, esgoto doméstico.

INTRODUÇÃO

A presença dos gases metano (CH₄) e sulfeto de hidrogênio (H₂S) dissolvidos no meio líquido efluente de reatores UASB (reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo) é uma problemática que causa preocupações em âmbitos sociais, ambientais e econômicos. Portanto, os seus efeitos individuais e/ou conjugados podem ser comprometedores, tendo em vista que esses gases podem conter características poluentes ao meio ambiente ou danosas às estruturas dos sistemas de esgotos, assim, tem sido recorrente a preocupação de recuperação dos gases de potencial energético (metano em altas concentrações), o controle dos gases de efeito estufa (metano fugitivo em baixas concentrações) e os odorantes (sulfetos, mercaptanas, etc) (METCALF & EDDY, 2016).

De fato, o gás CH_4 que não é capturado pela campânula e que se encontra dissolvido na vazão líquida do efluente do UASB, até mesmo na condição de supersaturação, pode apresentar concentrações na ordem de 21 mg/L, contabilizando uma perda na ordem de 45% da produção total de metano gerado (SOUZA *et al.*, 2011). Para o sulfeto de hidrogênio produzido no reator, em sua maior parte, permanece dissolvido no efluente, geralmente encontrado nas formas dissociadas de $\text{H}_2\text{S}_{(\text{aq})}$ e $\text{HS}^-_{(\text{aq})}$ (PAGLIUSO *et al.*, 2002; SOUZA *et al.*, 2012).

As iniciativas de controle desses gases dissolvidos têm se pautado em unidades específicas com contato ar/líquido para promover a transferência de massa dos gases dissolvidos no efluente. Em sua maioria, os experimentos que se propõem ao controle desses gases têm estendido além dos mecanismos de transferência de fase líquido/gasoso, aplicando meios de suporte para promover a remoção também pela oxidação bioquímica. Hatamoto *et al.* (2010), por exemplo, utilizou um aparato, ainda em escala de bancada, no qual estudou o tratamento de um efluente rico em gases dissolvidos através de um reator com empacotamento de esponja de poliuretano. Com aplicação do efluente através do topo desse reator, em fluxo concorrente de ar à baixa relação entre vazões ar/líquido (rQ), foram alcançadas reduções de metano dissolvido na ordem de 60% a 95%, no caso de menores cargas hidráulicas. Em uma iniciativa de ampliação na escala, utilizando efluente de UASB piloto, Matsuura *et al.* (2015) aplicaram baixas razões rQ (1,0 – 1,7) e recuperaram mais de 90% do metano para o gás residual. Trabalhando em baixas cargas (0,45 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$), os autores aplicaram o efluente remanescente à um segundo reator de espuma de poliuretano, desta vez com alta rQ (11,0) e removeram quase todo o metano restante na fase líquida.

Por outro lado, avaliando a questão de controle de sulfetos, Takahashi *et al.* (2011) utilizou um tipo biofiltro, também com esponja de poliuretano como meio de suporte e fluxo ar em contracorrente, para promover o processo de oxidação bioquímica, atingindo remoção total deste poluente, à baixa carga de efluente de reator UASB. Neste conceito, ampliando a investigação dos mecanismos que podem levar à recuperação também dos gases sulfetos, Huete *et al.* (2016) estudou uma câmara de controle de gases, com o princípio de funcionamento similar ao sistema avaliado por Matsuura *et al.* (2015), utilizando meio de suporte de anel de plástico (*Pall Ring*) e baixa rQ (0,5 – 1,0). Os seus resultados repetiram o alto nível de tratamento/remoção para o metano (na ordem de 99%), e remoção de apenas 31% de sulfeto (H_2S), sendo afetado diretamente pela dissociação nas formas iônicas HS^- e S^{2-} à medida que se eleva o pH do meio.

Nesta linha trabalho, resgatando as abordagens iniciais Pöpel (1979) e Hudson & Ayoko (2008) sobre o equilíbrio de misturas dissolvidas de metano e sulfetos, o estudo de Chernicharo *et al.* (2015) enaltece um tipo de experimento que utiliza uma câmara de dessorção de gases dissolvidos, em que o dispositivo de atmosfera controlada faz a retirada dos gases pela agitação, somente através da queda d'água em seu interior, avaliando os mecanismos de desprendimento e remoção das misturas dissolvidas de metano e sulfeto de hidrogênio.

Souza *et al.* (2012) desenvolveram uma câmara de atmosfera controlada, operada a partir do topo do reator UASB, conectada em uma derivação imediata do efluente tratado. Nesta configuração, com altura de queda 1,10 m e 12 h^{-1} renovações da atmosfera interna da câmara, Gloria *et al.* (2016) atingiu eficiências na ordem de 73% para metano dissolvido, indicando, portanto, que é possível que gases dissolvidos sejam intensamente desprendidos, em condições de adequada turbulência na descarga.

Este trabalho de pesquisa, portanto, visa buscar evoluções na técnica de câmara de dessorção (CD) para remover metano e sulfeto de hidrogênio dissolvidos como unidade compacta, de simplicidade operacional e com baixa introdução de energia. Neste sentido, tem objetivo de avaliar a eficiência de remoção da fase líquida do efluente de reator UASB e avaliar a sensibilidade do processo de tratamento aos parâmetros de altura de queda (ΔH), carga hidráulica superficial (CHS) e relação com a taxa de oxigênio.

MATERIAL E MÉTODOS

Os estudos foram realizados em Centro de Pesquisa e Treinamento em Saneamento (CePTS) UFMG/COPASA, localizado junto à ETE Arrudas, em Belo Horizonte/MG. A área abriga diversas unidades de pesquisa que recebem o esgoto municipal, após passar pelo tratamento preliminar da ETE, e processam o tratamento em diversos fluxogramas simplificados.

Aparato experimental

Foi utilizado um reator UASB, em escala demonstração, seguido de unidades pilotos de CD para controle de gases dissolvidos na fase líquida. O reator anaeróbico, denominado R1, com capacidade para 250 habitantes, altura útil de 4,5 m e 14,0 m³ de volume útil. Operou com tempo de detenção hidráulica (TDH) entre 7 e 10 h. A etapa de remoção dos gases dissolvidos, metano e sulfeto de hidrogênio, recebeu uma derivação imediata da vertente do efluente tratado. Portanto, instalada a partir do topo do reator, a CD utilizada foi um dispositivo tubular fechado, de módulos de 0,50 m entre a alimentação na parte superior e a saída do efluente à sua base (Figura 1), com possibilidade de atingir alturas úteis de 0,5 a 2,0 m.

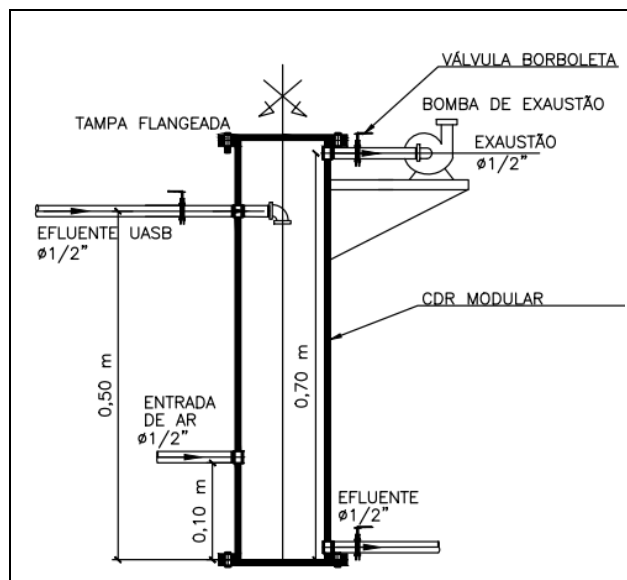


Figura 1: Desenho esquemático de módulo de CD utilizado nos experimentos.

A exaustão da câmara foi realizada por meio de compressor e bombas peristálticas a partir do ponto de saída do gás residual. O sistema foi operado durante cerca de 1 ano, sob condições climáticas ambientais.

Planos experimentais

O plano de monitoramento utilizou coletas simples sobre pontos amostrais estabelecidos, tanto na fase líquida – (P1) esgoto bruto, (P2) efluente do UASB e (P3) efluente da CD – como na fase gasosa – (P4) gás residual da CD (Figura 2).

Para avaliar o desempenho do reator UASB e o grau de desprendimento e remoção dos gases através da CD, foram analisados parâmetros como DQO, CH₄, H₂S, SO₄²⁻, pH e temperatura na fase líquida, e H₂S, CH₄, O₂, CO₂ na fase gasosa. Com o objetivo de identificar os padrões de funcionamento da CD, os processos de controle dos gases dissolvidos são estudados em duas configurações (“Fase D” e “Fase E”) etapalizadas em diversas condições experimentais de altura, vazão de efluente, relação entre vazões ar/líquido (rQ) e número de renovações da atmosfera da unidade. As características e parâmetros a serem testados estão resumidos na Tabela 1.

Métodos analíticos

O pH e temperatura do efluente foram regularmente medidos através de sonda portátil multiparâmetro. Os ensaios de sulfato (SO₄²⁻) utilizou os métodos padrão (APHA, 2012), e, para sulfeto dissolvido utilizou os procedimentos de Plas *et al.* (1992). A concentração de metano dissolvido foi determinada pela técnica *headspace* abordada por Alberto *et al.* (2000) e Hartley & Lant (2006) e adaptado por Souza (2011).

A composição do gás residual foi avaliada utilizando-se analisador portátil Geotech - Landtech, sendo o gás sulfeto de hidrogênio medido pelo analisador portátil específico (Odalog L2) e metano a concentrações muito baixas foi analisado via cromatografia gasosa equipado com detector de ionização de chama (Shimadzu).

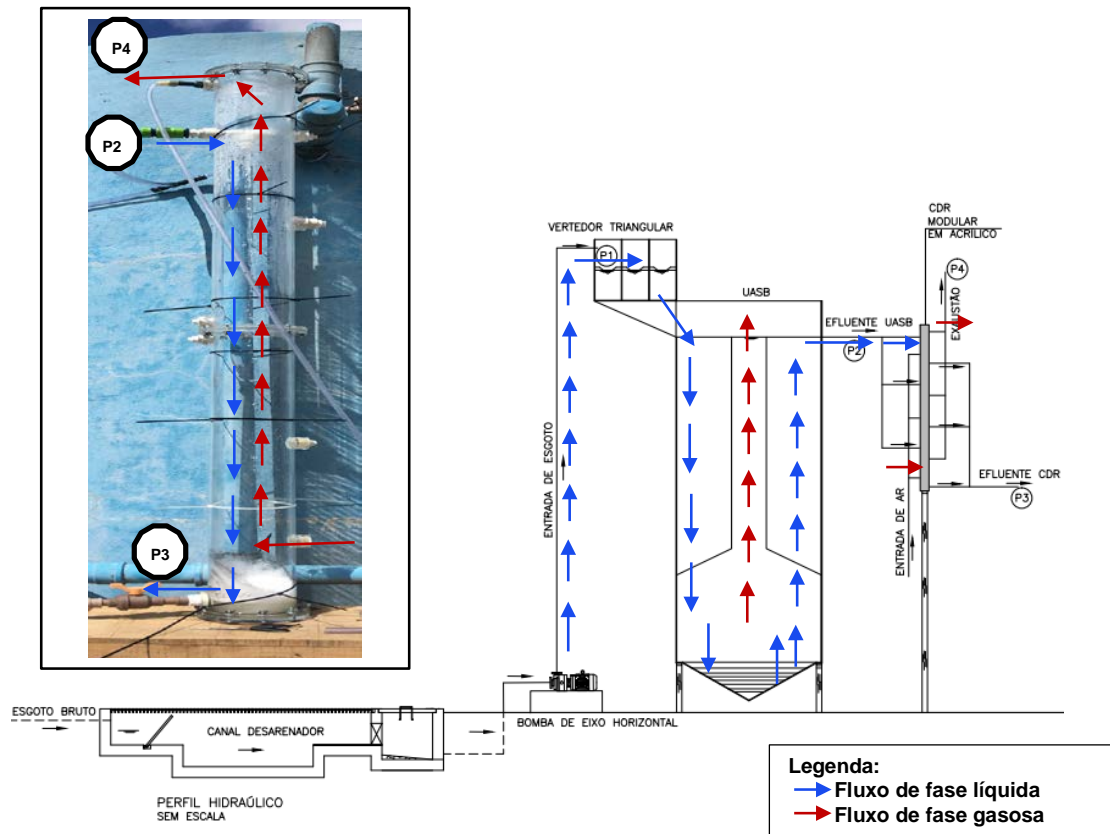


Figura 2: Diagrama esquemático do aparato experimental de reator UASB demonstração integrado por uma CD em escala piloto. Detalhe: Foto de CD modular de 1,5 m utilizada nos experimentos

Tabela 1: Etapas experimentais com a CDR.

Parâmetros	Fases D		Fases E	
	Experimentos D.1 a D.6	Experimentos D.7 a D.10	Experimentos E.1	Experimentos E.2
Altura de queda d'água	1,00 m	1,00 m	1,50 m	1,50 m
Carga hidráulica superficial	Alta	Baixa	Média	Média
rQ	Variável	Alta	Alta	Baixa
Material	PVC	PVC	Acrílico	Acrílico

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme objetivos deste trabalho, foram avaliadas respostas de configura es e condi es de opera o do sistema CD, como unidade de pós-tratamento para gases dissolvidos (metano e sulfeto de hidrogênio), analisando-se a sensibilidade do processo de tratamento aos parâmetros de carga hidráulica superficial (CHS), rela o entre vazões ar/líquido (rQ) e altura (ΔH).

Neste panorama, os resultados são apresentados da seguinte forma: (i) avalia o da varia o de carga hidráulica superficial (CHS); e (ii) avalia o do aumento da altura de queda para CHS intermediária.

Avaliação da variação de carga hidráulica superficial (CHS)

A primeira etapa deste trabalho de pesquisa, utilizando uma unidade de câmara na condição de altura de 1,00 m, recebendo a derivação imediata do efluente do reator anaeróbio, e, nesta configuração, buscou-se determinar a curva de resposta desse sistema de tratamento a partir de variações diretas de quantidade e velocidade de fluxo de oxigênio (Tabela 2) para contato em contracorrente de efluentes de carga média de 1,00 m³/m².min (denominada neste trabalho de “experimentos de alta carga”).

Tabela 2: Parâmetros operacionais de experimentos de alta carga.

Fases operacionais	Parâmetros operacionais		
	CHS (m ³ /m ² .min)	rQ (-)	N (h ⁻¹)
Fase D.1	1,28	0,04	3,1
Fase D.2	1,12	0,2	12,2
Fase D.3	1,07	0,4	24,5
Fase D.4	0,61	1,6	57,3
Fase D.5	0,79	2,2	96,3
Fase D.6	0,87	4,2	216,5

Portanto, observou-se que a elevação da relação rQ de 0,04 para 4,2 teve redução do metano dissolvido, e o mesmo comportamento foi observado também para as concentrações de sulfeto de hidrogênio, emitindo um efluente de concentração na ordem de 11,8 mg H₂S/L na Fase D.5, relativo aos cerca de 17,0 mg H₂S/L do efluente do reator anaeróbio.

Houve um deslocamento positivo de 27% (Fase D.1) para 50% (Fase D.5) na remoção de metano dissolvido no efluente (Figura 3) utilizando um incremento de 4,0 de introdução de ar em fluxo contracorrente.

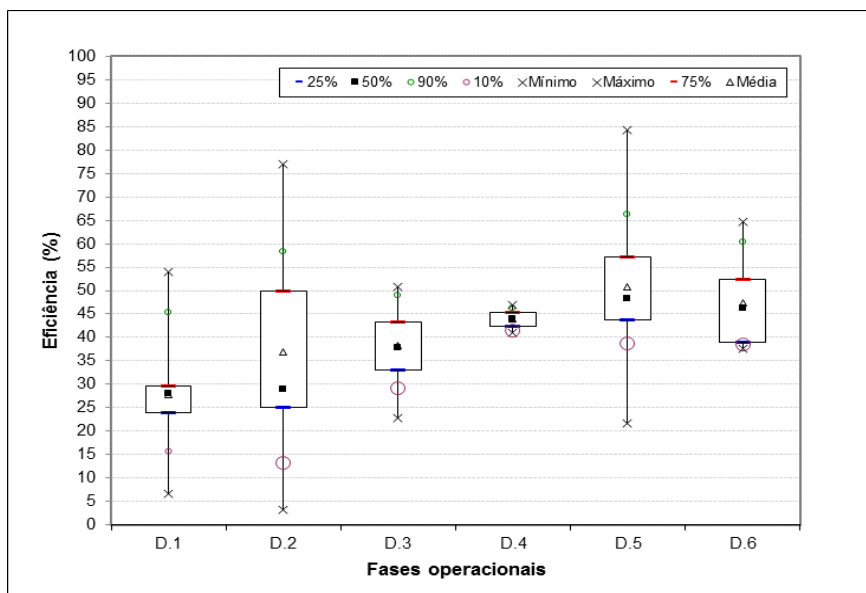


Figura 3: Gráficos box-plot de eficiências de remoção de metano nos experimentos de alta carga.

Nesse mesmo contexto, as eficiências do sulfeto de hidrogênio dissolvido tiveram aumentos com maiores taxas de ar ao sistema, e atingiu o pico de eficiência de remoção em 40,3% na condição da Fase D.5 conforme comparam os gráficos da Figura 4.

Uma verificação determinada nos experimentos de $\Delta H = 1,00$ m é que os níveis de remoção de metano dissolvido aumentaram conforme elevou-se a vazão de exaustão, indicando a promoção da dessorção da fase gasosa com o aumento da vazão do efluente à câmara, contudo, cada vez maior diluição do gás residual. Para metano, essa diluição foi de 11,09% ($\pm 1,28$) na Fase D.1 para 0,16% ($\pm 0,08$) na Fase D.6. Já no caso de sulfeto de hidrogênio, tal como verificado para as concentrações de metano dessorvidas para fase gasosa,

observou-se que o ganho de eficiências globais com injeção de cada vez mais quantidade de ar em contracorrente desencadeou um alto nível de diluição de gás residual (de 1641ppm na Fase D.1 para 150 ppm na Fase D.6).

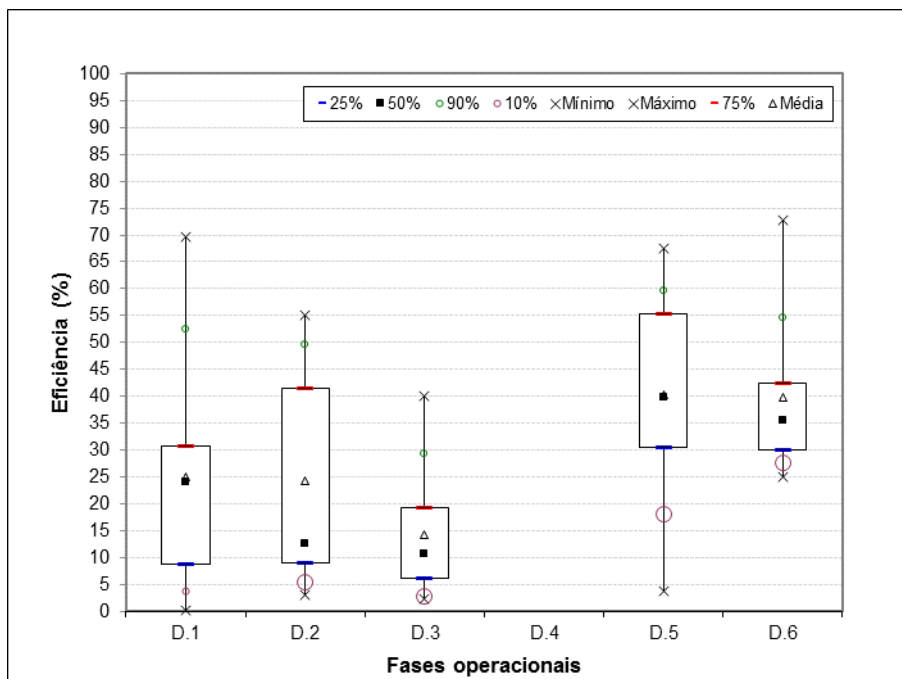


Figura 4: Gráficos box-plot de eficiências de remoção de sulfeto de hidrogênio nos experimentos de alta carga.

Avaliando-se os fatores intervenientes na taxa de transferência do gás, nota-se que, em comparação com resultados anteriores (Gloria *et al.*, 2016), a vazão de exaustão indica a promoção da dessorção da fase gasosa com o aumento da vazão do efluente à câmara.

Por outra via operacional, ao que se apontavam os resultados de Glória *et al.* (2016) para configurações de CD recebendo baixas cargas hidráulicas do reator UASB piloto, os “experimentos de baixa carga” foram ampliados neste trabalho. Nestes experimentos (Fases D.7 a D.10), foi dada amplitude ao rQ (Tabela 3) com o propósito de buscar uma curva de desempenho do sistema na configuração de baixo CHS (0,13 m³/m².min).

Tabela 3: Parâmetros operacionais de experimentos de baixa carga.

Fases operacionais	Parâmetros operacionais		
	CHS (m ³ /m ² .min)	rQ (-)	N (h ⁻¹)
Fase D.7	0,13	3,1	24,1
Fase D.8	0,12	7,7	57,3
Fase D.9	0,17	11,3	95,5
Fase D.10	0,13	27,8	216,5

No âmbito de baixa carga de efluente, a mesma elevação da quantidade de ar apresentou um deslocamento significativo nas renovações da atmosfera confinada, e, de fato, uma queda para a metade das concentrações de metano medidas nas fases de alta carga (Tabela 4).

O deslocamento cada vez maior na fase gasosa, não proporcionou o controle e redução de metano na mesma ordem, promovendo efluente de concentração média 6,6 mg/L na Fase D.10 (rQ = 27,8), e este valor estabeleceu-se na mesma ordem de grandeza relativamente às Fases D.8 (rQ = 7,7) e D.9 (rQ = 11,3).

Na carga de trabalho à valores baixos, o desempenho do sistema CD para reduzir as concentrações de sulfeto de hidrogênio do efluente (Tabela 5) apresentou faixas de valores baixos, na ordem de 3,1 mg/L na Fase D.7 a 8,8 mg/L na Fase D.10.

Computando o comportamento das concentrações nesta etapa de experimentos para os cálculos de remoção, similarmente, houve um ganho de eficiência de cerca de 30% sobre as fases de alta carga, sendo a Fase D.10 apresentando uma eficiência média de 61,2% na remoção de metano. Portanto, os resultados de remoção de sulfeto de hidrogênio foram similares, acompanhando, inclusive, os níveis de eficiência, nesta, na ordem de 62,4% na Fase D.10.

Tabela 4: Resultados das análises de metano dissolvido de experimentos de baixa carga.

Fases operacionais		Estatísticas das concentrações (mg/L)						
		Média	D. Padrão	Coef. Var ^a	Mínimo	Máximo	N dados ^b	Mediana
Fase	Afluente	19,3	1,9	0,1	15,9	21,5	7	19,7
D.7	Efluente	8,2	1,3	0,2	5,9	9,5	6	8,5
Fase	Afluente	18,8	2,2	0,1	16,7	21,6	5	17,4
D.8	Efluente	6,3	1,7	0,3	4,2	8,1	5	6,3
Fase	Afluente	16,0	8,8	0,5	0,2	25,1	12	19,1
D.9	Efluente	6,8	1,4	0,2	3,5	8,3	9	6,7
Fase	Afluente	17,0	5,2	0,3	10,0	21,5	5	19,4
D.10	Efluente	6,6	2,3	0,3	3,8	9,5	5	7,5

^a Coeficiente de variação (%); ^b Número de dados (unidade).

Tabela 5: Resultados das análises de sulfeto de hidrogênio dissolvido de experimentos de baixa carga.

Fases operacionais		Estatísticas das concentrações (mg/L)						
		Média	D. Padrão	Coef. Var ^a	Mínimo	Máximo	N dados ^b	Mediana
Fase	Afluente	5,7	2,3	0,4	2,5	8,1	7	5,7
D.7	Efluente	3,1	1,5	0,5	1,2	5,5	7	3,2
Fase	Afluente	8,7	5,7	0,7	5,1	18,7	5	6,3
D.8	Efluente	5,2	0,7	0,1	4,7	5,7	2	5,2
Fase	Afluente	17,7	13,3	0,8	5,1	41,4	12	10,0
D.9	Efluente	8,5	6,1	0,7	3,6	20,6	7	6,1
Fase	Afluente	22,8	10,1	0,4	12,4	39,4	5	19,7
D.10	Efluente	8,8	4,5	0,5	3,3	15,6	5	8,4

^a Coeficiente de variação (%); ^b Número de dados (unidade).

Avaliando-se as frações do gás residual, os resultados denunciam ainda concentrações muito baixas, novamente, devido à questão de diluição por oxigênio e nitrogênio do ar. Foi observada a tendência de diluições abaixo de 400 ppm, e, na Fase D.10, condição de máximo movimento da massa de ar, com um valor médio de 4,8 ppm de sulfeto de hidrogênio no gás residual. Os resultados mostram ainda como tal diluição pode chegar a níveis tão baixos quanto próximo a 0,03% de metano.

Fatores intervenientes no tratamento

A avaliação de cargas hidráulicas de 1,00 m³/m².min, denominada neste trabalho de “alta carga” ou “carga alta”, verifica-se que a resposta da unidade CD em termos de eficiência de controle e remoção dos parâmetros CH₄ e H₂S indica uma tendência para operação com taxas rQ ordem de 2,2 como ponto ótimo de operação; qual, nesta configuração de 1,00 m de queda livre, removeu cerca de 50,7% de metano e 40,3% de sulfeto de hidrogênio dissolvidos no efluente do reator anaeróbio.

Da mesma forma, os resultados da avaliação de cargas de hidráulicas de $0,10 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{min}$, denominada neste trabalho de “baixa carga” ou “carga baixa”, também apontaram para uma taxa de ar aproximando a proporção de 2:1, tendo-se como a melhor resposta da unidade CD, na configuração de 1,00 m de queda livre, a relação rQ de 1,6 e eficiência de 73% de remoção de metano dissolvido, conforme experimentou Glória *et al.* (2016).

Por outro lado, nas melhores situações de eficiência, a recuperação dos gases sulfeto de hidrogênio são largamente prejudicadas pelas quantidades de ar presentes. A mesma análise aplica-se também para eventual recuperação do gás metano. Todavia, desse gás, em termos de concentração relativa no gás residual mantém-se na faixa de segurança de explosividade (VAN DER VAART *et al.*, 1991) – abaixo do limite inferior de explosão para concentração de metano no ar (ENGINEERING TOOLBOX, 2017).

Portanto, verifica-se que a rQ determinada como ótima no sistema de CD (1,00 m) traduz uma faixa em que o devido movimento da massa gasosa se estabelece para promover a dessorção (ou desprendimento) dos gases dissolvidos. Todavia, no caso do sulfeto de hidrogênio, mesmo com o baixo tempo de residência do efluente ou mesmo a limitada coluna de líquido (2,5 cm) na base da câmara, é necessária a verificação das extensões das reações de oxidação, através de balanços de massa, principalmente, para sulfato e tiosulfato.

Portanto, coube uma avaliação de uma elevação na altura de queda, pretendendo aumentar a energia potencial e turbulência da fase líquida, para verificar a capacidade de aporte maiores vazões afluentes.

Avaliação do aumento da altura de queda

Na segunda etapa do trabalho experimental, sob a premissa de aumento de movimento da fase líquida para o favorecer o desprendimento dos gases dissolvidos na CD de atmosfera controlada, avaliou-se experimentos aumentando a energia potencial pela queda de efluente $\Delta H = 1,50 \text{ m}$.

Nesta “Fase E”, foram analisadas as situações de relações de ar nas faixas de melhores rQ testados nos estudos anteriores, e, mantendo-se a carga hidráulica à valores médios das faixas dos experimentos da Fase D (Tabela 6).

Tabela 6: Parâmetros operacionais de experimentos de baixa carga.

Fases operacionais	Parâmetros operacionais		
	CHS ($\text{m}^3/\text{m}^2.\text{min}$)	rQ (-)	N (h^{-1})
Fase E.1	0,32	2,9	37,7
Fase E.2	0,35	1,3	18,8

Somente o incremento na altura de queda livre, conforme mostra a Tabela 7, trouxe um ganho de cerca de 30% de queda das concentrações de metano dissolvido (Fase E.1) em comparação com os resultados obtidos nos experimentos de alta carga de queda livre de 1,00 m (Fase D.5).

Tabela 7: Resultados das análises de metano dissolvido de experimentos de altura de queda livre.

Fases operacionais	Estatísticas das concentrações (mg/L)						
	Média	D. Padrão	Coef. Var ^a	Mínimo	Máximo	N dados ^b	Mediana
Fase Afluyente	23,24	4,18	18,0	17,45	34,76	13	22,83
E.1 Efluente	8,35	1,96	23,4	4,24	11,35	12	8,84
Fase Afluyente	23,41	1,73	7,4	21,28	26,22	8	23,13
E.2 Efluente	8,91	0,44	4,9	8,44	9,46	4	8,88

^a Coeficiente de variação (%); ^b Número de dados (unidade).

Contudo, o corte à metade do fornecimento de ar no sistema (Fase E.2) não proporcionou reduções dessas concentrações no efluente da CD, pelo contrário, indicou que o caminho de ganhos de eficiência não está situado em tal nível de rQ (1,3).

De fato, os gráficos comparativos da Figura 5 demonstram que a Fase E.1 alcançou 63,7%, e, a economia do rQ (Fase E.2) resultou na mesma faixa de eficiência, medindo-se de 61,7% na média de remoção de metano dissolvido.

Por outro lado, a avaliação de sulfeto de hidrogênio nesta segunda etapa experimental, a Tabela 8 resume os valores de concentração observados no efluente da unidade CD.

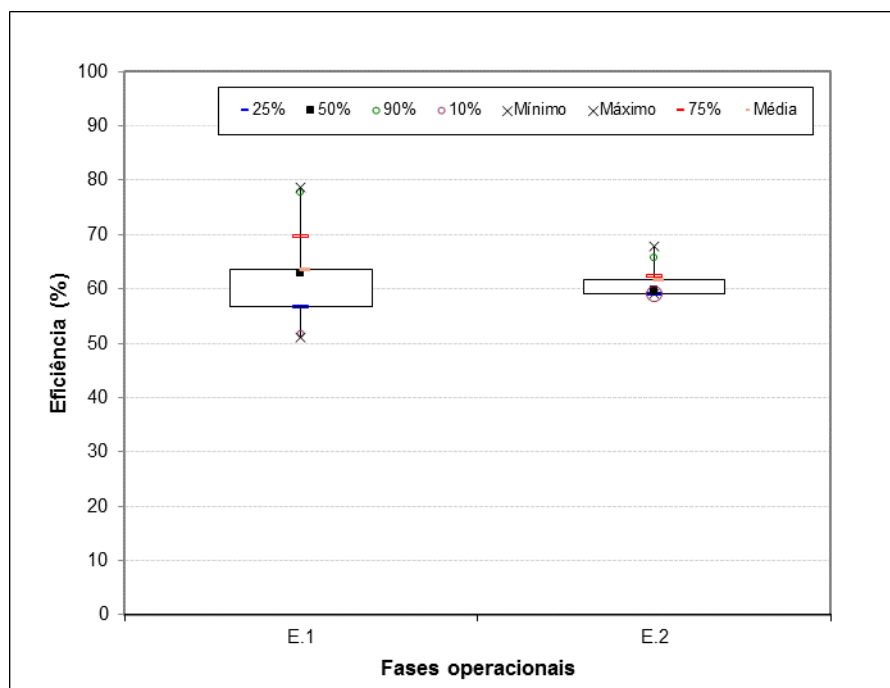


Figura 5: Gráficos box-plot de eficiências de remoção de metano dissolvido de experimentos de altura de queda livre.

Pois, o aumento na altura de queda livre reduziu as concentrações de sulfeto de hidrogênio dissolvido para valores na ordem de 5,1 mg/L (Fase E.1) e 6,3 mg/L (Fase E.2), ou seja, reduções significativas comparados com os resultados dos experimentos de altura de queda de 1,00 m.

Tabela 8: Resultados das análises de sulfeto de hidrogênio dissolvido de experimentos de altura de queda livre.

Fases operacionais		Estatísticas das concentrações (mg/L)						
		Média	D. Padrão	Coef. Var ^a	Mínimo	Máximo	N dados ^b	Mediana
Fase	Afluente	21,4	5,4	0,3	11,7	29,3	13	20,1
E.1	Efluente	5,1	2,6	0,5	0,3	8,3	12	5,4
Fase	Afluente	21,3	6,6	0,3	11,7	29,3	8	21,6
E.2	Efluente	6,3	2,7	0,4	2,4	8,5	5	7,8

^a Coeficiente de variação (%); ^b Número de dados (unidade).

Sobretudo, esta alteração de regime hidrodinâmico, permitiu a alcançar a marca de 77,1% de eficiência média de remoção de sulfeto de hidrogênio na condição de “Fase E.1” (Figura 6). A variação de rQ no experimento “Fase E.2” revelou também uma relativa queda de eficiência de 8%, porém nos mesmos níveis estatísticos. Portanto, crava-se que nesta configuração a melhor performance ocorre no rQ de 2,9 para tratamento/remoção de sulfeto de hidrogênio.

Novamente, nesses patamares de contrafluxo, a linha de ar necessária para proporcionar as melhores eficiências globais, há uma diluição excessiva do gás residual por O₂/N₂, obtendo-se valores 0,4 a 0,8% de

metano, os níveis similares aos medidos nas configurações experimentais anteriores. Em termos dos gases sulfeto de hidrogênio residuais, foram detectadas médias de 231 ppm (Fase E.1) e 276 (Fase E.2).

UASB e câmara de dessorção

As avaliações da câmara de dessorção desencadeadas neste trabalho para controle dos gases dissolvidos no efluente do reator UASB, apontaram para configurações operacionais específicas desta unidade de pós-tratamento.

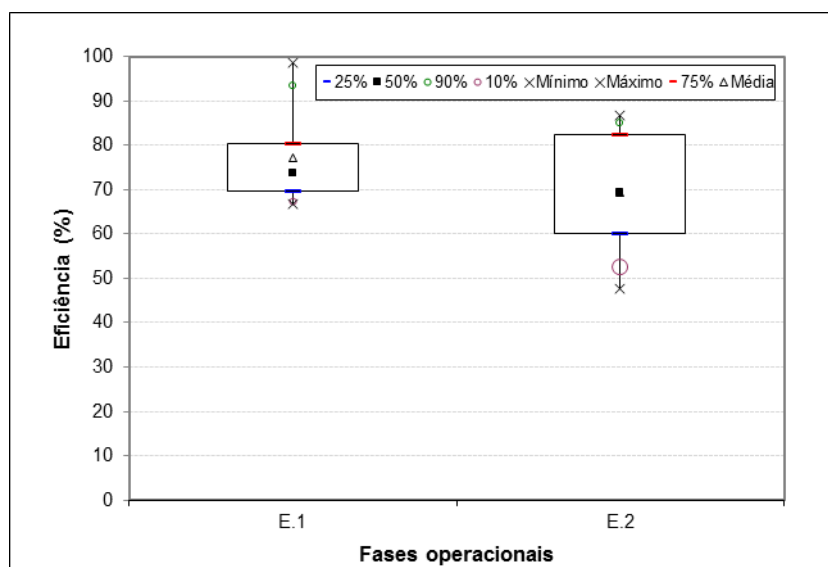


Figura 6: Gráficos box-plot de eficiências de remoção de sulfeto de hidrogênio de experimentos de altura de queda livre.

Neste sentido, as premissas de fluxo ar, taxa hidráulica e altura de queda, quando avaliadas nas duas primeiras etapas experimentais deste trabalho, indicaram que à medida que se deseja faixas de operação de maiores cargas hidráulicas superficiais, remete à fornecimentos de ar em contrafluxo na ordem de rQ de 2,2. Neste contexto, o experimento da Fase D.5 apresentou a melhor performance, tanto para a remoção do metano (50,7%) como para sulfeto de hidrogênio (40,3%).

Por outra via, fora verificado que há incrementos dessas eficiências para níveis de 61,2% (para metano) quando demanda operação de menores cargas hidráulicas superficiais, na ordem de 0,13 m³/m².min. Nessa configuração, os experimentos das Fases D.9 e D.10 alcançaram tais eficiências, mas utilizando taxas de ar muito altas, com rQ de 11,3 e 27,8 respectivamente.

Contudo, em termos de aplicações práticas, configurações para baixas cargas hidráulicas podem não se tornar atrativas por levar à compartimentações do efluente de um reator UASB, e, conseqüentemente, caminhar para a instalação de unidades múltiplas desse equipamento secundário.

Este trabalho, com os experimentos de altura de queda, distingue que a CD à altura de queda livre de 1,50 m tem ganhos de eficiência, até 77,1% de remoção de sulfeto de hidrogênio na Fase E.1.

Embora essas evoluções, as tais faixas de rQ de 2,2 e 2,9 avaliadas como de otimização dos processos de remoção e controle desses gases dissolvidos, promoveram uma diluição nos gases residuais, como pode ser observado nos gráficos das Figuras 7 e 8.

CONCLUSÕES

Com vista ao tratamento dos gases dissolvidos em efluentes de reatores UASB, a câmara de dessorção enquadra-se como alternativa tecnológica de unidade compacta e de simplicidade operacional para promover a remoção dos gases metano e sulfeto de hidrogênio.

As configurações operacionais experimentadas indicaram que as melhores eficiências de controle desses gases conjugaram em determinadas dosagens de ar, cujas relações rQ ótimas encontram-se na faixa de 2,2 a 2,9. Contudo, os experimentos de baixa carga (CHS = 0,13 m³/m².min), apontaram que as melhores eficiências requerem ainda menores esforços energéticos, remetendo à rQ de 1,6.

As avaliações indicaram ainda que o aumento da altura de queda, melhora as eficiências da dessorção, uma vez que eleva a energia de turbulência da fase líquida, permitindo um de aporte maior de vazões afluentes.

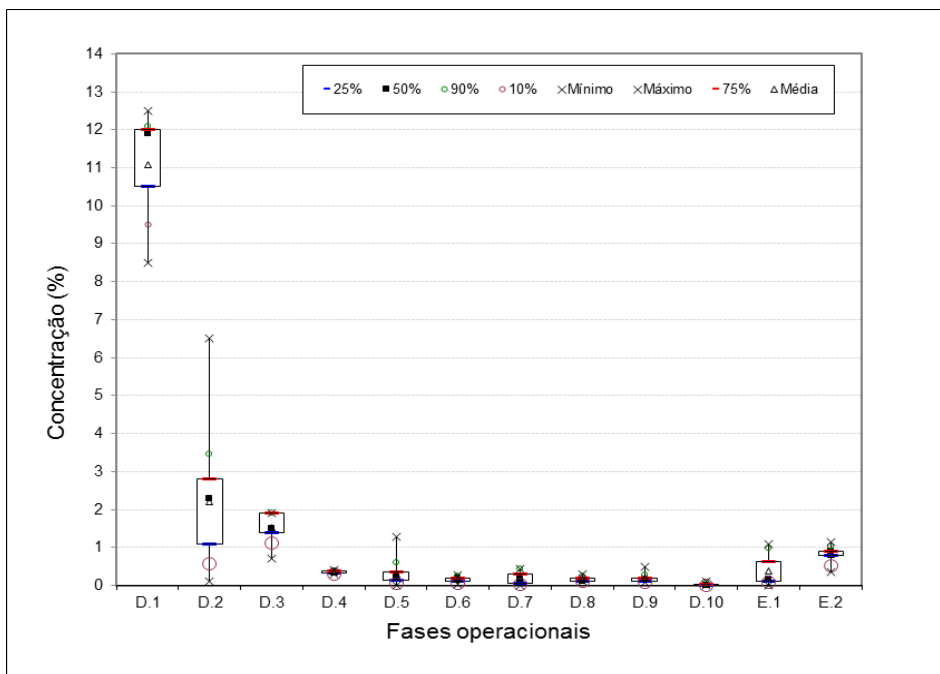


Figura 7: Gráficos box-plot de concentração de metano no gás residual.

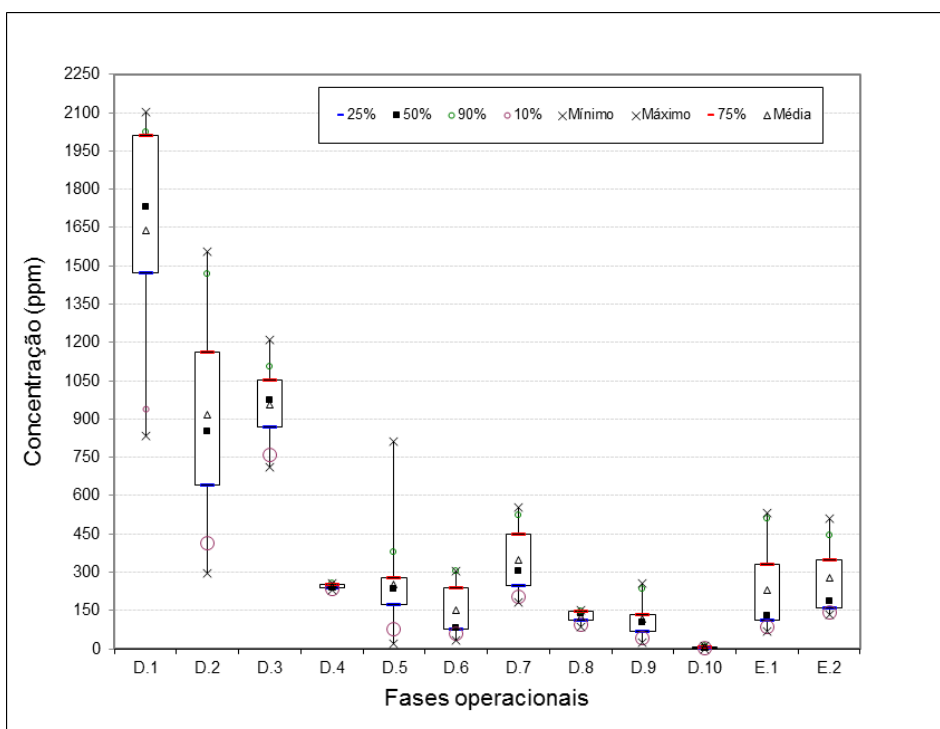


Figura 8: Gráficos box-plot de concentração de sulfeto de hidrogênio no gás residual.

Por outro lado, foram obtidas eficiências de 50,7% (CHS de 1,00 m³/m².min e rQ de 2,2) e 61,2% (CHS de 0,13 m³/m².min e rQ de 27,8) na CD com 1,00 m de altura, a configuração de 1,50 m e carga intermediária (0,35 m³/m².min) alcançou 63,7% de remoção de metano, com a relação rQ na ordem de 2,9.

Na configuração de maior altura, o sulfeto de hidrogênio foi removido do efluente aos níveis de 77,1% quando operou na carga hidráulica intermediária e rQ de 2,9. A CD de 1,00 m de altura não ultrapassou patamares de 40,3% na carga de 1,00 m³/m².min (e rQ de 2,2) e 62,4% na carga de 0,13 m³/m².min (e rQ de 27,8).

Além disso, em termos de concepção tecnológica, a câmara de dessorção apresenta flexibilização para adaptações diversas, por exemplo, uma inserção de meio suporte poderá apontar caminhos para recuperação do gás metano, que, devido a sua maior solubilidade de líquido efluente, poderá ter o seu processo de desprendimento otimizado através das áreas de contato dessas mídias. Assim, conjugado ao trabalho prático de determinações de balanços de massa, tal tipo de adaptação poderá resolver o problema da diluição do gás residual, permanente nos experimentos de queda livre.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALBERTO, M.C.R., ARAH, J.R.M., NEUE, H.U., WASSMANN, R., LANTIN, R.S., ADUNA, J.B., BRONSON, K.F. *A sampling technique for the determination of dissolved methane in soil solution. Chemosphere - Global Change Science*, v.2, n.1, p. 57-63, 2000.
2. APHA, AWWA, WEF. *Standard Methods for examination of water and wastewater*. 22nd ed. Washington: American Public Health Association; 2012, 1360 p.
3. CHERNICHARO, C.A.L., VAN LIER, J.B., NOYOLA, A., RIBEIRO, T.B. *Anaerobic sewage treatment: state of art, constraints and challenges. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, n.14, p. 649-679, 2015.
4. ENGINEERING TOOLBOX. Gases - Explosion and Flammability Concentration Limits. Disponível em: <http://www.engineeringtoolbox.com/explosive-concentration-limits-d_423.html>. Acessado em 02 jun 2017.
5. GLORIA, R.M., MOTTA, T.M., SILVA, P.V.O., 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, 2016.
6. HARTLEY K., LANT, P. *Eliminating Non-Renewable CO₂ Emissions From Sewage Treatment: An Anaerobic Migrating Bed Reactor Pilot Plant Study. Biotechnology and Bioengineering*, v.95, n.3, p.384-398, 2006.
7. HATAMOTO, M. YAMAMOTO, H., KINDAICHI, T., OZAKI, N., OHASHI, A. *Biological oxidation of dissolved methane in effluents from anaerobic reactors using a down-flow hanging sponge reactor. Water Research*, n.44, p. 1409-1418, 2010.
8. HUDSON, N., AYOKO, G.A. *Odour sampling. 1. Physical chemistry considerations. Bioresource Technology*, v.99, p. 3982-3992, 2008.
9. HUETE, A., COBOS-VASCONCELOS, D., MORGAN-SAGASTUME, J., GÓMES-BORRAZ, T., NOYOLA, A. *Eliminación biológica de CH₄ y H₂S disueltos en el efluente de un reactor anaerobio que trata aguas residuales municipales. IV Conferencia Latinoamericana de Saneamiento – LATINOSAN*. 2016. Lima, Perú, 2016.
10. MATSUURA, N. HATAMOTO, M. SUMINO, H. SYUTSUBO, K. YAMAGUCHI, T. OHASHI, A. *Recovery and biological oxidation of dissolved methane in effluent from UASB treatment of municipal sewage using a two-stage closed downflow hanging sponge system. Journal of Environmental Management*, v.151, p. 200-209, 2015.
11. METCALF, L.; EDDY, H.P. *Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos*. 5ª Edição. São Paulo: McGraw-Hill, 2016. 2008 p.

12. PAGLIUSO, J.D.; PASSIG, F.H.; Villela, L.C.H. Odour treatment and energy recovery in anaerobic sewage treatment plants. VII Oficina e Simpósio Latino-Americano de Digestão Anaeróbia – IWA/FEMISCA. 2002. Mérida, Yucatán, México, 2002.
13. 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.
14. PÖPEL, H. J. Aeration and gas transfer. 2ed Delft, Delft University of Technomic Publishing Co, Lancaster, EUA, 1979. 589 p.
15. SOUZA, C.L., CHERNICHARO, C.A., AQUINO, S.F. *Quantification of dissolved methane in UASB reactors treating domestic wastewater under different operating conditions. Water Science Technology*, v.11, n.64, p. 2259–2264, 2011.
16. SOUZA, C.L., CHERNICHARO, C.A., MELO, G.C. *Methane and hydrogen sulfide emissions in UASB reactors treating domestic wastewater. Water Science Technology*, v.7, n.65, p. 1229–1237, 2012.
17. TAKAHASHI, M., TAKASHI, Y., KURAMOTO, Y., NAGANO, A., SHIMOZAKI, S., SUMINO, H., ARAKI, N., YAMAZAKI, S., KAWAKAMI, S., HARADA, H. *Performance of a pilot-scale sewage treatment: An up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) and a down-flow hanging sponge (DHS) reactors combined system by sulfur-redox reaction process under low-temperature conditions. Bioresource Technology*, n.102, p. 753-757, 2011.
18. VAN DER VAART, D. R.; VATUVUK, W. M.; WEHE, A. H. *Thermal and catalytic incinerators for the control of VOCs. Journal of the Air and Waste Management Association*, v.41, n.1, p. 92, 1991.