

II-096 - ASSOCIAÇÃO DE MICROAERAÇÃO E ADIÇÃO DE NITRATO PARA A REMOÇÃO DE SULFETO EM REATOR ANAERÓBIO

Jéssyca de Freitas Lima Brito⁽¹⁾

Tecnóloga em Saneamento Ambiental pelo Instituto Federal do Ceará – Campus Limoeiro do Norte (IFCE/LN). Mestra em Ciência e Tecnologia Ambiental pela Universidade Estadual da Paraíba (UEPB). Doutoranda em Engenharia Civil – Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará (UFC).

Camylla Rachelle Aguiar Araújo Dantas

Engenheira Sanitarista e Ambiental pelo Instituto Federal do Ceará – Campus Maracanaú (IFCE/Maracanaú). Mestra em Energias Renováveis pelo IFCE/Maracanaú. Doutoranda em Engenharia Civil – Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará (UFC).

Marcos Erick Rodrigues da Silva

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Doutor em Engenharia Civil – Saneamento Ambiental pela UFC. Professor do Instituto Federal do Ceará – Campus Fortaleza.

André Bezerra dos Santos

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará (UFC). PhD em Environmental Sciences pela Wageningen University, Holanda. Professor Associado do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da UFC.

Paulo Igor Milen Firmino

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Mestre em Engenharia Civil – Saneamento Ambiental pela UFC. Doutor em Engenharia Civil – Saneamento Ambiental pela UFC. Professor Adjunto A do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da UFC.

Endereço⁽¹⁾: Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Campus do Pici, Bloco 713, Pici – Fortaleza – CE - CEP: 60455-900 - Brasil - e-mail: jessyca-11f@hotmail.com

RESUMO

A etapa na qual ocorre a produção de sulfetos nos reatores anaeróbios, denominada sulfetogênese, é um processo que causa danos à saúde humana e ao meio ambiente, uma vez que essa substância provoca mau cheiro, contaminação, deterioração do desempenho energético, toxicidade e corrosão. Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência da microaeração (no *headspace* e na manta de lodo) associada à adição de nitrato ($\sim 40 \text{ mg.L}^{-1}$) em um reator UASB, em escala laboratorial, alimentado com afluente sintético, na remoção de sulfeto do efluente e do biogás produzido. A pesquisa consistiu de seis etapas operacionais, em que foram testados dois pontos de aplicação da microaeração: no *headspace* e na manta de lodo. Além disso, foi testado a microaeração associada com a adição de nitrato na alimentação do reator, a fim de comparar a eficiência na remoção dos compostos de enxofre no efluente e no biogás. Foi observado, em todas as etapas, que o reator apresentou boa estabilidade em termos de remoção de DQO ($> 90\%$) e remoção de sulfato ($> 50\%$). Em relação ao biogás, notou-se que o percentual de metano no sistema diminuiu quando o reator passou a ser microaerado. A microaeração no *headspace* com a adição de nitrato (etapa V) apresentou o melhor resultado em termos de remoção do sulfeto na fase gasosa. Já a microaeração na manta de lodo com a adição de nitrato (etapa IV) mostrou-se a alternativa mais eficiente para remoção do sulfeto na fase líquida.

PALAVRAS-CHAVE: Microaeróbio, desnitrificação autotrófica, sulfeto, biogás.

INTRODUÇÃO

O tratamento anaeróbio do efluente é uma tecnologia bem definida, na qual a matéria orgânica complexa é transformada em metano e dióxido de carbono por meio das etapas da digestão anaeróbia, que são: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Chernicharo, 2007). A composição do biogás depende do tipo de efluente tratado e das condições operacionais do reator. Contudo, esse gás é geralmente composto por metano, dióxido de carbono e outros componentes menores, como o sulfeto de hidrogênio (H_2S), o qual é um composto odorífero, tóxico e corrosivo, sendo indesejável nos processos de recuperação de energia e prejudicial à saúde e ao ambiente (Abatzoglou e Boivin, 2009).

Com o intuito de diminuir os gases odoríficos provenientes do tratamento anaeróbio, foram propostas diferentes técnicas por especialistas no assunto. Os principais métodos utilizados são baseados em princípios físico-químicos, tais como: precipitação, lavagem cáustica e adsorção por carvão ativado (Chen, 2001; Choi *et al.*, 2008). Essas aplicações são rápidas e eficazes, contudo possuem custos elevados, devido demandarem a adição de produtos químicos em grandes quantidades, além de produzirem resíduos secundários. Em contrapartida, nos últimos anos, observou-se um aumento no uso das tecnologias de tratamento biológico, devido a conseguirem obter altas taxas de remoção, apresentarem baixo custo operacional e ausência de subprodutos tóxicos (Ramirez *et al.*, 2009; Zhang, 2013; 2018), como, por exemplo, a microaeração e a remoção de sulfeto por desnitrificação autotrófica.

A microaeração é uma técnica recente do tipo *in situ* e consiste na aplicação de pequenas doses de oxigênio no digestor anaeróbio, em um processo conhecido como tratamento microaeróbio. Esse método biológico tem apresentado bom desempenho para a remoção de sulfeto gasoso e menores custos operacionais, baseando-se na bioquímica da oxidação de sulfeto, tendo como subprodutos o sulfato, tiosulfato e, preferencialmente, o enxofre elementar, devido à disponibilidade limitada de oxigênio (Diaz, 2011; Diaz *et al.*, 2011. Diaz *et al.*, 2012). A desnitrificação autotrófica é uma técnica utilizada, principalmente, para a remoção do sulfeto dissolvido e consiste na oxidação de sulfeto (S^{2-}) a enxofre elementar (S_0) por bactérias desnitrificantes autotróficas que utilizam nitrato comoceptor final de elétrons (Reyes-Avila *et al.*, 2004).

Diante do exposto, este estudo objetivou avaliar a aplicação de microaeração associada à adição de nitrato como alternativa para a remoção de sulfeto do efluente e do biogás em um reator anaeróbio de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB).

MATERIAIS E MÉTODOS

Água residuária

A água residuária sintética foi preparada utilizando água, meio basal (macro e micronutrientes), tampão, etanol como fonte de carbono ($1,0 \text{ g O}_2 \cdot \text{L}^{-1}$) e sulfato de sódio (Na_2SO_4) como fonte de sulfato ($0,1 \text{ g SO}_4^{2-} \cdot \text{L}^{-1}$). O meio basal era preparado de acordo com Dos Santos (2005). Para manter o pH próximo a 7,0, a solução era tamponada com bicarbonato de sódio (NaHCO_3) na proporção de 1 g de NaHCO_3 para cada 1 g DQO. Todos os reagentes foram utilizados como adquiridos, sem purificação adicional.

Inóculo

O reator foi inoculado com lodo anaeróbio proveniente de um reator UASB, da Companhia de Água e Esgoto do Ceará – CAGECE, que tratava esgoto doméstico. As concentrações do inóculo, em termos de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis totais (SVT), foram, respectivamente, $89,78 \text{ g ST} \cdot \text{L}^{-1}$ e $56,09 \text{ g SVT} \cdot \text{L}^{-1}$.

Sistema experimental

A investigação experimental consistiu na instalação e operação de um reator UASB (*Up-flow anaerobic sludge blanket*), em escala experimental, com volume útil de 3,0 L e tempo de detenção hidráulica (TDH) de 8 h. O material utilizado para confecção do reator foram tubos e conexões de PVC para esgoto (**Figura 1**). O reator era alimentado por meio de uma bomba peristáltica (Minipuls 3, Gilson, EUA) através de tubos flexíveis de Tygon® (Cole-Parmer, EUA) e operado à temperatura ambiente de aproximadamente 28°C . O biogás produzido era coletado e medido por um medidor de gás previamente calibrado.

A microaeração do sistema foi fornecida por meio de uma bomba peristáltica (Minipuls 3, Gilson, EUA), que injetava ar atmosférico no *headspace* (etapa II) e na manta de lodo (etapas III e IV) do reator, numa vazão de $0,1 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$. O fornecimento de ar no sistema seguiu uma relação estequiométrica de 8,6 mmol de $S/2,5 \text{ mmol de O}_2$.



Figura 1: Reator UASB

O experimento foi dividido em seis etapas (**Tabela 1**). Durante a primeira etapa, o reator teve características de um UASB convencional, o qual serviu como referência/controle para as etapas seguintes. A etapa II consistiu na aplicação da microaeração no *headspace*; na etapa III, a aplicação da microaeração foi transferida para a manta de lodo; na etapa IV, a microaeração permaneceu na manta de lodo, mas foi adicionado nitrato (NO_3^-) no afluente; na etapa V, a microaeração foi transferida para o *headspace* e foi adicionado a mesma concentração de NO_3^- . Na última etapa (VI), o reator voltou a ser operado sob as mesmas condições operacionais da etapa I.

Tabela 1: Parâmetros operacionais do reator.

Etapas	I	II	III	IV	V	VI
Duração da etapa (dias)	116	147	42	51	63	42
Fim da etapa (dia)	116	290	355	411	479	528
TDH (h)	8	8	8	8	8	8
Pontos de aplicação da microaeração	-	<i>Headspace</i>	Manta de lodo	Manta de lodo	<i>Headspace</i>	-
Vazão de ar ($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$)	-	0,1	0,1	0,1	0,1	-
Nitrato ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	-	-	-	40	40	-

TDH, tempo de detenção hidráulica;

Métodos analíticos

Durante o monitoramento do reator, foram realizadas semanalmente três coletas e análises físico-químicas do afluente e efluente do reator, possibilitando, assim, a avaliação do seu desempenho.

DQO, sulfeto dissolvido, amônia, pH e alcalinidade foram analisados segundo o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012).

Sulfato, nitrito e nitrato foram determinados por cromatografia líquida em um cromatógrafo de íons DionexTM ICS – 1100 (Thermo Scientific). Era injetada 5 μL da amostra filtrada, e a separação cromatográfica era realizada em uma coluna Dionex IonPacTM AS23 (RFICTM 2x250mm). O cromatógrafo também era equipado com uma pré-coluna Dionex IonPacTM AG23 (RFICTM 2x50mm) além de uma supressora Dionex AERS 500 (2mm). A temperatura era 30 °C, e a corrente 7mA. Era utilizado um eluente na proporção de 4,5 mM de carbonato de sódio e 0,8 mM de bicarbonato de sódio a um fluxo de 0,25 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$, e o tempo de corrida de 30 minutos.

A caracterização do biogás foi realizada, em termos de ar ($O_2 + N_2$), CO_2 e CH_4 , por cromatografia gasosa com detecção por condutividade térmica (GC-TCD, gas chromatography-thermal conductivity detection) (GC-17A, Shimadzu Corporation, Japão) de acordo com Firmino (2013). Para a determinação das concentrações de $H_2S(g)$, $NH_3(g)$ e $O_2(g)$ foi utilizado um medidor individual de gases (Dräger X-am® 5600, Drägerwerk AG & Co. KGaA, Alemanha) conforme Sousa (2016). Todas as análises foram realizadas três vezes por semana.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na **Tabela 2**, podem ser observados os valores médios de sulfato, sulfeto dissolvido, amônia, nitrito, nitrato, pH e alcalinidade total (AT) do reator UASB tratando o efluente sintético durante as seis etapas.

Na etapa I, elevada remoção de DQO foi alcançada (90%), e a eficiência de remoção de sulfato foi de 56%, indicando que o processo de sulfetogênese estava ocorrendo no meio. Na etapa II, com a adição limitada de ar no *headspace* foram alcançadas eficiências médias de remoção de sulfato de 54% e DQO de 90%. De acordo com os resultados obtidos, a microaeração não afetou a remoção desses parâmetros. A concentração de sulfeto dissolvido no líquido reduziu consideravelmente quando comparado a etapa I, atingindo valor médio de 3 $mg.L^{-1}$ e remoção de 28% de H_2S no biogás (em relação à etapa I), indicando que a remoção do sulfeto ocorreu devido a microaeração adicionada. De acordo com Diaz *et al.*, (2011), quando a microaeração ocorre no *headspace* do reator, o O_2 reage de forma mais fácil e direta com o H_2S . Devido a isso, menores dosagens de ar atmosférico são suficientes para obter bons resultados de remoção desse composto.

Na etapa III, com a adição de ar na manta de lodo, foi alcançada eficiência média de remoção de sulfato de 57%, apesar do maior valor médio de remoção ter sido obtido com a microaeração realizada na manta de lodo, é possível verificar também que, nessa etapa, o sistema apresentou maior desvio padrão. Na etapa III, o valor médio de remoção de DQO foi superior às etapas I e II, correspondendo a 93%. Durante a etapa III obtiveram-se concentrações médias de sulfeto dissolvido próximas às da etapa II, apresentando valor médio de 3 $mg.L^{-1}$. Mora *et al.*, (2016) realizaram testes respirométricos e comprovaram a oxidação de sulfetos utilizando a microaeração, nesses testes o sulfeto foi, preferencialmente, consumido e oxidado a enxofre elementar em concentrações de oxigênio dissolvido acima de 0,8 $mg OD L^{-1}$. Não houve remoção do H_2S na etapa III em relação à etapa I, porém essa etapa apresentou um maior desvio padrão.

Na etapa IV, em que houve a adição de nitrato enquanto o reator continuava a ser microaerado na manta de lodo, a concentração de sulfeto dissolvido no líquido diminuiu consideravelmente quando comparada com a etapa III, para 1 $mg.L^{-1}$. É possível que, devido à microaeração associada à adição de nitrato no meio, tenha ocorrido a desnitrificação autotrófica, e, conseqüentemente, a remoção de sulfeto acontecia de forma satisfatória. Esses resultados corroboram as hipóteses de Reyes *et al.*, (2004), que afirmam a possibilidade da remoção simultânea de sulfeto e nitrato no tratamento anaeróbio.

Na etapa IV, houve uma redução na eficiência de remoção de sulfato, porém não foi significativa quando comparada a etapa III ($p = 0,396$). Essa redução pode estar associada ao aumento da concentração afluente de sulfato, que apresentou uma concentração 16% maior no afluente do que a etapa III.

A etapa IV apresentou a eficiência média de remoção de DQO de 93%. Esse resultado mostra que a presença do nitrato não afetou negativamente a digestão do material orgânico, pois não houve diferenças significativas entre as etapas III e IV ($p = 0,068$). Souza *et al.*, (2016) monitoraram dois reatores, um anaeróbio e outro com a microaeração no *headspace*, e suas eficiências de remoção de DQO foram de 90% e 89%, nessa ordem.

Tabela 2: Desempenho operacional do reator.

Etapa		I	II	III	IV	V	VI
Microaeração (0,1 mL _{AR} .min ⁻¹)			Headspace	Manta de lodo	Manta de lodo	Headspace	-
Nitrato (mg·L ⁻¹)		-	-	-	~40	~40	-
DQO	Afluente (mg·L ⁻¹)	1117 (193)	880 (101)	1097 (199)	1170 (65)	1114 (101)	1154 (100)
	Efluente (mg·L ⁻¹)	115 (34)	89 (35)	69 (23)	78 (27)	67 (27)	62 (21)
	Eficiência (%)	90 (3)	90 (5)	93 (3)	93 (2)	94 (2)	95 (2)
SO ₄ ²⁻	Afluente (mg·L ⁻¹)	119 (15)	128 (13)	129 (15)	153 (16)	158 (11)	149 (8)
	Efluente (mg·L ⁻¹)	53 (12)	59 (15)	54 (18)	68 (13)	57 (14)	53 (5)
	Eficiência (%)	56 (8)	54 (11)	57 (15)	55 (9)	64 (9)	65 (3)
S ²⁻	Efluente (mg·L ⁻¹)	13 (3)	4 (2)	3 (2)	1 (1)	3 (1)	21 (2)
NH ₄ ⁺	Afluente (mg·L ⁻¹)	62 (3)	63 (8)	70 (10)	57 (9)	57 (6)	72 (9)
	Efluente (mg·L ⁻¹)	58 (3)	59 (9)	62 (9)	56 (7)	54 (4)	76 (8)
NO ₃ ⁻	Afluente (mg·L ⁻¹)	-	-	-	39 (12)	39 (14)	-
	Efluente (mg·L ⁻¹)	-	-	-	1 (3)	1 (1)	-
	Eficiência (%)	-	-	-	96 (11)	99 (4)	-
pH	Afluente	7,8 (0,2)	7,8 (0,2)	7,5 (0,2)	7,9 (0,2)	7,9 (0,1)	7,6 (0,1)
	Efluente	7,5 (0,4)	7,5 (0,2)	7,2 (0,2)	7,8 (0,3)	7,9 (0,3)	7,6 (0,1)
Alcalinidade total	Efluente (mg·L ⁻¹)	708 (47)	709 (41)	771 (49)	814 (19)	801 (23)	777 (30)
H ₂ S	Biogas (mL·d ⁻¹)	7 (2)	5 (3)	8 (8)	6 (5)	4 (2)	8 (1)
CH ₄	Biogas (L·d ⁻¹)	3,1 (0,6)	2,4 (0,5)	2,4 (1,5)	2,0 (1,4)	2,5 (0,6)	3,0 (0,3)
Ar (O ₂ + N ₂)	Biogas (L·d ⁻¹)	0,1 (0,1)	0,2 (0,1)	0,5 (0,5)	0,4 (0,4)	0,7 (0,7)	0,1 (0,1)

O desvio padrão é exibido entre parênteses.

*As eficiências de remoção de sulfeto dissolvido e H₂S citadas no texto foram obtidas através da média de cada etapa (II, III, IV, V e VI), comparando-se sempre com a etapa I (anaeróbia).

Na etapa V, com a microaeração no *headspace* associada à adição de nitrato, foram obtidas remoções médias de sulfeto e DQO de 64% e 94%, respectivamente. A concentração de sulfeto dissolvido no líquido foi de 3 mg.L⁻¹, apresentando valor médio próximo aos das etapas II e III. A etapa V foi a que apresentou a melhor eficiência de remoção de H₂S, efetivando 43% de remoção desse composto. Segundo Krayzelova *et al.*, (2014), a oxidação do sulfeto na fase gasosa, ocorre principalmente, devido as bactérias oxidadoras de sulfeto, quase que exclusivamente no *headspace* e na interface gás-líquido, ou seja, no topo do reator. Ramos *et al.*, (2014), ao avaliarem os resultados após 24 h do início da aplicação da microaeração no *headspace* do reator, com vazão de 12 L.m⁻³.d⁻¹, notaram uma redução dos níveis de sulfeto no biogás de 0,49 (v/v) % para 0,35 (v/v) %.

De acordo com os resultados, para todos os pontos de dosagem de ar testados, houve efeito significativo na remoção de sulfeto da fase líquida. Além disso, observou-se que, quando a microaeração foi aplicada na manta de lodo associada com a adição de nitrato (etapa IV), a concentração de sulfeto dissolvido diminuiu em comparação com a fase anaeróbia.

Sousa *et al.*, (2016), ao operarem um reator UASB microaerado com relação de 16 mmol O₂/mmol S, alcançaram eficiências de 79% na remoção de sulfeto dissolvido. Esses valores estão próximos aos encontrados nas etapas II e III, quando comparados à etapa I. Krayzelova *et al.*, (2014), ao operarem um reator microaeróbio com volume total de 2,7 L, tratando efluente de cervejaria e com vazão de ar de 0,6 mL.min⁻¹, obtiveram remoção de 74% de sulfeto dissolvido.

Dessa forma, aparentemente, pode-se inferir que a microaeração, tanto no *headspace* como na manta de lodo, associada com a adição de nitrato contribuíram para a remoção do sulfeto no biogás e dissolvido no efluente. Isso confirma a aplicabilidade de reatores microaerados com a adição de nitrato para a oxidação de sulfetos dissolvidos, visto que a etapa IV foi que apresentou a menor concentração de sulfeto dissolvido no líquido e a etapa V que apresentou a menor concentração de sulfeto na fase gasosa. Diante do exposto, pode-se afirmar que a aplicação dessa tecnologia de baixo custo apresenta resultados favoráveis para a remoção de sulfeto. Entretanto, os resultados de remoção de sulfeto gasoso foram insatisfatórios na pesquisa, tendo em vista que outros trabalhos reportam eficiências da ordem de 99%.

Na etapa VI, o reator foi operado em condições anaeróbias sem adição de nitrato para verificar se as condições iniciais de operação seriam reestabelecidas. A eficiência média de remoção de sulfato foi de 65% e de DQO de 95%. As concentrações de sulfeto dissolvido no líquido e de sulfeto de hidrogênio no biogás comprovam que o processo de sulfetogênese estava ocorrendo no meio, logo, foi observado um aumento nas concentrações desses parâmetros.

Diaz e Fdz-Polanco (2012) avaliaram a robustez de sistemas microaeróbios após a pausa no fornecimento de oxigênio em um digestor em escala piloto e relataram que houve um aumento da concentração de sulfeto de hidrogênio após a pausa no fornecimento de oxigênio. Contudo, quando foi aplicada novamente a microaeração, a concentração do sulfeto diminuiu gradativamente até atingir os valores médios anteriores.

Comparando as vazões de CH₄ entre as fases I a VI, percebe-se uma redução na vazão de metano para as condições microaeróbias. Verificou-se uma redução em torno de 25% (em relação à etapa I) nas etapas II e III. Nas etapas IV e V houve uma diminuição na vazão de CH₄, enquanto a concentração de ar (O₂ + N₂) no biogás aumentou em comparação com a etapa I (anaeróbia). A hipótese para a diminuição da vazão de metano é evidenciada pelo desvio das rotas metabólicas da metanogênese para a desnitrificação heterotrófica, pois, quando a remoção de DQO é a mesma e não está sendo convertida em metano, provavelmente está sendo utilizada na desnitrificação (SHOW, 2013). Tal fato também pode ser corroborado através do aumento do ar (O₂ + N₂), levando em consideração que houve a adição de ar e que o resultado da desnitrificação é, principalmente, a produção de N₂ (SHOW *et al.*, 2013; CHEN *et al.*, 2017; HUANG, *et al.*, 2017; ZHANG *et al.*, 2018).

Em geral, o reator UASB operou de forma estável durante as seis etapas. Os valores de pH do reator mantiveram-se sempre próximos à neutralidade, não apresentando variação entre as condições anaeróbia e microaeróbia, em que o pH variou entre 7 e 8. Durante a operação do sistema, as alcalinidades totais estiveram próximo a 800 mg/L. Ressalta-se que foram adicionadas as mesmas quantidades de bicarbonato de sódio em todas as etapas operacionais, e, certamente, devido a isso, não houve variação significativa nos resultados.

CONCLUSÕES

A microaeração, tanto no *headspace* quanto na manta de lodo, promoveu elevadas eficiências de remoção de sulfeto dissolvido (> 75%). Porém, para o sulfeto gasoso, a aplicação no *headspace* associada a adição de nitrato foi efetiva, embora reduzidas eficiências foram alcançadas.

A adição de nitrato, sob condições microaeróbias, aumentou a eficiência de remoção de sulfeto gasoso e dissolvido.

Tanto a microaeração quanto a adição de nitrato não afetaram a remoção do material carbonáceo, obtendo eficiências maiores que 90%, porém houve diminuição da produção de metano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABATZOGLOU, N., BOIVIN, S., 2009. A review of biogas purification processes. *Biofuels Bioproduction & Biorefining*, 3, 42-71.
2. APHA., 2012. Standard methods for the examination of water and wastewater. 22a. ed. Washington: American Public Health Association.
3. BOTHEJU, D.; BAKKE, R. Oxygen effects in anaerobic digestion - a review. *The Open Waste Manage*, v. 4, p. 1-19, 2011.
4. CARNEIRO, P. M. *et al.*, Multivariate optimization of headspace-GC for the determination of monoaromatic compounds (benzene, toluene, ethylbenzene, and xylenes) in waters and wastewaters. *J Sep Sci*, v. 37, n. 3, p. 265-71, Feb 2014.
5. CHEN C, ZHANG R, XU X, FANG N, WANG A, REN N, LEE D., 2017. Enhanced performance of denitrifying sulfide removal process at high carbon to nitrogen ratios under micro-aerobic condition. *Bioresource Technology*; 232: 417-422.
6. CHEN, L.; HUANG, J.; YANG, C. Absorption of H₂S in NaOCl caustic aqueous solution. *Environmental Progress*, v. 20, n.3, p. 175-181, 2001.
7. CHERNICHARO, C. A. L. *Reatores Anaeróbios - Princípios do tratamento biológico de águas residuárias*. 2ª ed. Belo Horizonte: Ed. da UFMG, 380p, 2007.
8. CHOI, D-Y.; LEE, J-W.; JANG, S-C.; AHN, B-S, CHOI, D-K. Adsorption dynamics of hydrogen sulfide in impregnated activated carbon bed. *Adsorption*, v.14, n. 4-5, p. 533-538, 2008.
9. DÍAZ, I. H₂S free biogas. From anaerobic to microaerobic. 140 (Tese de doutorado). Departamento de Engenharia Química e Tecnologia do Meio Ambiente, Universidade de Valladolid, Valladolid. 2011.
10. DÍAZ, I.; LOPES, A.C; PÉREZ, S.I.; FDZ-POLANCO, M. Determination of the optimal rate for the microaerobic treatment of several H₂S concentrations in biogas from sludge digesters, *Water Science & Technology*, v. 64, n.1, p. 233-238, 2011.
11. DÍAZ, I.; FDZ-POLANCO, M. Robustness of the microaerobic removal of hydrogen sulfide from biogás, *Water Science & Technology*, v. 65, n.8, p. 1368-1374, 2012.
12. DOS SANTOS, A. B. Aplicação conjunta de tratamento anaeróbio termofílico por lodo granular e de mediadores redox na remoção de cor de águas residuárias têxteis. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 10, p. 253-259, 2005.
13. HUANG, C., *et al*, 2017. Elemental sulfur recovery and spatial distribution of functional bacteria and expressed genes under different carbon/nitrate/sulfide loadings in up-flow anaerobic sludge blanket reactors. *Journal of Hazardous Materials*; v.324, p. 48-53.
14. JENÍČEK, P., KECLIK, F., MACA, J., BINDZAR, J., Use of microaerobic conditions for the improvement of anaerobic digestion of solid wastes. *Water Science and Technology: a Journal of the International Association on Water Pollution Research*. 58, 1491-1496. 2008.
15. KRAYZELOVA, L. *et al.*, Microaeration for hydrogen sulfide removal in UASB reactor. *Bioresour Technol*, v. 172, p. 297-302, 2014.
16. METCALF e EDDY. 2016. Tratamento de efluentes e recuperação de recursos. 5. ed. Porto Alegre, AMGH, 1980p.
17. MORA, M.; LÓPEZ, L. R.; LAFUENTE, J. Respiriometric characterization of aerobic sulfide, thiosulfate and elemental sulfur oxidation by S-oxidizing biomass. *Water research*. v.. 89, p. 282-292. 2016.

18. RAMÍREZ, M., GÓMEZ, J.M.; AROCA, G.; CANTERO, D. Removal of hydrogen sulfide by immobilized *Thiobacillus thioautotrophicus* in a biotrickling filter packed with polyurethane foam. *Bioresource Technology*, v.100, n. 21, p. 4989-4995, 2009.
19. RAMOS, I.; PEREZ, R.; FDZ-POLANCO, M. Microaerobic desulphurisation unit: a new biological system for the removal of H₂S from biogas. *Bioresour Technol*, v. 142, p. 633-40, Aug 2013.
20. REYES-AVILA J, RAZO-FLORES E, GOMEZ J. Simultaneous biological removal of nitrogen, carbon and sulfur by denitrification. *Water Res* 38:3313–21. 2004.
21. SHOW, K. Y., LEE, D. J., PAN, X. 2013. Simultaneous biological removal of nitrogen–sulfur–carbon: Recent advances and challenges. *Biotechnology Advances*. v.31, p.409–420.
22. SOUSA, M. R.; OLIVEIRA, C. J. S.; LOPES, A. C.; RODRÍGUEZ, E. R.; HOLANDA, G. B. M; LANDIM, P. G. C.; FIRMINO, P. I. M.; SANTOS, A. B. Technical, Economical, and Microbiological Aspects of the Microaerobic Process on H₂S Removal for Low Sulfate Concentration Wastewaters. *Appl Biochem Biotechnol*. 2016.
23. ZHANG, S., BAO, R., LU, J., SANG, W. Simultaneous sulfide removal, nitrification, denitrification and electricity generation in three-chamber microbial fuel cells. *Separation and Purification Technology*, v.195 p.314–321, 2018.
24. ZHANG, J. ZHANG, Y. CHANG, J. QUAN, X. LI, Q. Biological sulfate reduction in the acidogenic phase of anaerobic digestion under dissimilatory Fe (III) e Reducing conditions. *Water Research*. v. 47, p.2033-3040, 2013.