

II-175 - ESTUDO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM REATOR UASB TRATANDO ESGOTO DOMÉSTICO EM REGIME DE VAZÃO VARIÁVEL

Déborah de Freitas Melo ⁽¹⁾

Engenheira Bioenergética pela Fundação Mineira de Educação e Cultura (FUMEC). Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Lucas Martins Machado

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Mestrando em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Cláudio Leite de Souza

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos - Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Endereço⁽¹⁾: Av. Antônio Carlos 6627 – Pampulha – Belo Horizonte/MG – Escola de Engenharia, Bloco 1 – sala 4541; CEP: 31270-901 – Brasil -- E-mail: deborahfmelo@hotmail.com

RESUMO

O tratamento de esgotos domésticos pela via anaeróbia através de reatores UASB ocupa cada vez mais espaço dentre as estações de tratamento de esgoto por apresentarem diversas vantagens. Uma das mais relevantes é a formação do biogás, um subproduto gasoso gerado que contém em maior proporção o gás metano, que é um gás de elevado poder calorífico, sendo passível de aproveitamento energético. Sendo o biogás um subproduto de grande potencial combustível, é de interesse dos gestores de ETEs dimensionar e implantar sistemas que visem o seu aproveitamento. Entretanto, grandes dificuldades são encontradas nesse sentido quando em operação em escala real, pois muitas vezes as produções encontradas de biogás são consideravelmente menores que a produção teórica. Assim, o presente trabalho tem como objetivo aprofundar o conhecimento atual sobre a produção de biogás em reatores UASB em ETEs. O experimento foi realizado em um reator UASB escala demonstração, que operou com hidrograma típico, visando observar tendências possivelmente associadas a uma ETE em escala plena. A concentração de DQO afluente durante o período analisado apresentou média de 560 mg.L⁻¹ com eficiência média de remoção de 64%. A produção de biogás apresentou média de 2.048 NL.dia⁻¹, com desvio padrão de 772 NL.dia⁻¹. A concentração de metano presente no biogás foi de 68%_{v/v}, valor típico para o tratamento de esgotos domésticos. Já a concentração de metano dissolvido no efluente, apresentou concentrações relativamente inferiores às reportadas em literaturas, tendo média de 14,9 mg.L⁻¹, o que resultou em um grau de saturação de 0,95, ou seja, o metano esteve ligeiramente subsaturado no meio líquido. A partir dos resultados foi possível obter coeficientes de produção de biogás que podem auxiliar a gestão do mesmo em ETEs, como: 44,2 NL.m⁻³_{esg}.dia⁻¹, 79,0 NL.kgDQO_{apl}.⁻¹ ou 124,1 NL.kgDQO_{rem}.⁻¹. Os valores encontrados representam um aproveitamento de apenas, aproximadamente, 56% do metano total produzido. De forma geral, o trabalho permitiu conhecer sobre as produções de biogás e as parcelas de metano, contudo, ficando evidenciada a necessidade de se aprofundar sobre tais temáticas quando se trabalham com reatores operando com hidrograma típico, o que aparentemente, refletiu em variações nas produções.

PALAVRAS-CHAVE: Biogás, metano, metano dissolvido, reator UASB, esgoto doméstico.

INTRODUÇÃO

A composição do biogás gerado em reatores UASB varia de acordo com as condições presentes no seu interior, sendo razoavelmente uniforme quando o sistema opera em condições estáveis (Chernicharo, 2007). Entretanto, foram poucas as pesquisas que se detiveram no monitoramento dessa produção, com dados quantitativos e qualitativos, particularmente dentro da realidade brasileira.



No trabalho realizado por Possetti *et al.* (2013), também citado em documento do ProBiogás (BRASIL, 2015) – projeto desenvolvido pelo governo brasileiro juntamente com o governo alemão – verificou-se, a partir de medições em tempo real, que a produção de biogás segue, em geral, um comportamento diário padrão (temporal variável, periódico e não-estacionário), verificado a partir de gráficos de série temporal. Constatou-se que as vazões máximas de produção de biogás ocorreram entre meia noite e duas horas da madrugada e as vazões mínimas entre meio dia e quatorze horas, sendo influenciadas por chuvas e características físico-químicas do esgoto bruto. Encontrou-se correlações entre alcalinidade, pH, DBO, DQO e vazão de esgoto. O teor de CH_4 presente no biogás foi de cerca de 60%, com desvio padrão de 4,5%. Porém, os significados aprofundados dos dados e a correlação entre cada um dos parâmetros com a produção de biogás/metano ainda não são conhecidos. Ademais, apesar dos dados demonstrarem um comportamento padrão para ciclos diários, Possetti *et al.* (2013) salientam que a produção obtida foi cerca de 53% menor que a esperada, especulando que esse fato pode ser decorrente das perdas de metano (CH_4) dissolvido e das perdas de biogás por vazamento nas tubulações, evidenciando a dificuldade em se obter dados confiáveis para produções de biogás.

Vários fatores podem interferir na quantidade de biogás gerado no processo, como a carga de matéria orgânica afluente, a atividade metanogênica específica do lodo inoculado ou desenvolvido, a quantidade de biomassa presente, a temperatura, dentre outras condições e, de forma particularmente relevante, o regime hidráulico (hidrograma) aplicado ao reator, podendo o mesmo receber vazões constantes ou vazões variáveis, como normalmente acontece em estações de tratamento de esgotos domésticos (ETE), com picos e depressões ao longo das horas do dia.

Em geral, os sistemas de esgotamento sanitário/doméstico podem ficar expostos a diversos tipos de variações, a começar pela natureza cíclica das atividades humanas, que já conduz a uma produção de esgotos variável ao longo do dia (METCALF; EDDY, 2004).

Tradicionalmente, os projetos de ETEs assumem um consumo diário médio de água per capita e utilizam também coeficientes de esgoto/água e de pico que conduzem a valores de vazões de esgoto média, máxima e mínima. Porém, essas simplificações podem resultar em valores de projetos que não correspondem com fidedignidade à condição real. Campos e von Sperling (1996) analisaram os dados da cidade de Belo Horizonte/MG e verificaram que os valores de concentração e de carga de DBO per capita eram maiores do que os valores clássicos usualmente utilizados em projetos.

Campos e von Sperling (1996) analisaram os dados da cidade de Belo Horizonte/MG e verificaram que os valores de concentração e de carga de DBO per capita eram maiores do que os valores clássicos usualmente utilizados em projetos.

Sendo assim, são objetivos do presente trabalho: i) avaliar a produção de biogás na operação do reator UASB escala demonstração tratando esgoto doméstico, operando sob hidrograma típico de vazões ao longo do dia, e ii) avaliar as concentrações e a produção de metano no biogás e dissolvido no efluente ao longo do período operacional.

MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada no Centro de Pesquisa e Treinamento em Saneamento (CePTS), campo experimental que resulta de uma parceria entre UFMG e COPASA (Companhia de Saneamento de Minas Gerais). O CePTS está inserido na Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) da bacia do ribeirão Arrudas da COPASA, em Belo Horizonte, Minas Gerais. A vazão de esgotos que alimenta os vários sistemas experimentais instalados no CePTS corresponde a uma diminuta fração proveniente da linha da ETE Arrudas, após o esgoto bruto, tipicamente doméstico, passar pelo tratamento preliminar, composto por gradeamentos e desarenadores.

Para o desenvolvimento dos objetivos da pesquisa foi utilizado um reator UASB em escala demonstração (Figura 1), feito de aço-carbono, dimensionado para um equivalente populacional de 380 habitantes, considerando um per capita de esgoto de $125 \text{ L.hab}^{-1}.\text{dia}^{-1}$, com dimensões de 2,50 x 1,40 m e 4,80 m de altura e volume útil de $16,8 \text{ m}^3$.



Figura 1 - Foto do reator UABS escala demonstração

A alimentação do reator escala demonstração foi feita a partir de um hidrograma de vazão similar ao de uma ETE de pequeno porte, com valor mínimo de vazão ($0,5 \times Q_{\text{méd}}$) nas primeiras horas do dia e máximo ($1,6 \times Q_{\text{méd}}$) em torno das dez horas. O controle da curva de vazões é efetuado via um PLC (Programmable Logic Controller) acoplado ao inversor de frequência da bomba de alimentação do reator UASB (bomba helicoidal de cavidade progressiva).

A Figura 2a demonstra o hidrograma aplicado ao reator, sendo observado que, em período superior a 50% do tempo de operação da bomba alimentadora, as vazões afluentes foram cerca de 30% maiores que a vazão média de dimensionamento (Figura 2b). Tal comportamento tem sido observado em estações de tratamento em escala plena, a exemplo das ETE Laboreaux (Itabira/MG) e ETE Onça (Belo Horizonte/MG) (dados não publicados) (Ribeiro, 2015).

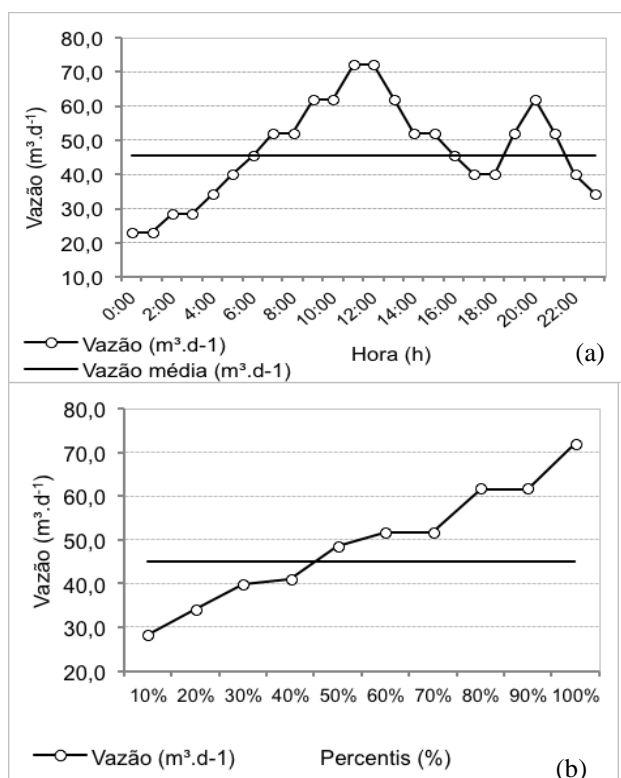


Figura 2 - Vazões afluentes ao reator: (a) Hidrograma e (b) Histograma de distribuições

O reator operou no período de 01/02 à 24/08 de 2015. Devido à realização de procedimentos operacionais que inviabilizam a coleta do biogás produzido (descarte de lodo e de espuma), os dados apresentados referem-se aos dias em que tais procedimentos não foram realizados. A Tabela 1 apresenta algumas condições operacionais do reator durante o período.

Tabela 1 - Condições operacionais médias do reator UASB ao longo da operação

Parâmetro	Valor
Duração (dias)	205
Vazão ($\text{m}^3.\text{dia}^{-1}$)	46,3
TDH (h)	8,6
Temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$)	21

Foram realizadas análises de: demanda química de oxigênio (DQO - afluente e efluente), produção volumétrica diária de biogás, qualidade do biogás (concentração de CH_4 , CO_2 e outros), concentração de CH_4 dissolvido, perfil de lodo na zona de digestão (sólidos totais e voláteis).

Durante o período operacional foram coletadas amostras compostas em 24 horas, de duas a três vezes por semana. O sistema de amostragem possuía acionamento horário, com intervalos de tempo entre 2 e 7 minutos, considerando alíquotas proporcionais associadas ao hidrograma de vazões (conforme mostrado na Figura 2). A coleta era realizada por meio de bombas peristálticas com rotação de 600 rpm, instaladas nas linhas de adução de esgoto bruto e saída do efluente do reator UASB. Durante o período de coleta as amostras eram armazenadas em frascos plásticos de 20 L, que eram mantidos sob refrigeração até o momento da análise.

Para a análise do perfil de lodo presente no reator UASB em escala demonstração, foram analisados 6 pontos ao longo da coluna do reator, sendo o ponto 1 o ponto de coleta inferior e o ponto 6 o ponto de coleta superior ao longo da coluna do reator. Assim, de P_1 a P_6 , os pontos estão localizados nas alturas de amostragens em 0,05 m, 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m, 2,0 m e 2,5 m.

Para verificação da produção volumétrica diária do biogás foi utilizado um gasômetro do tipo tambor, do fabricante Ritter®, com gerador de pulsos elétricos a partir da produção de gás. Ao gasômetro se associa um computador com software de registro e armazenamento dos dados, Rígamo®.

A amostragem e análise de metano dissolvido foram realizadas conforme Souza *et al.* (2011). As análises de DQO e de sólidos totais e voláteis e foram realizadas conforme o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005). A análise de DQO foi realizada duas vezes por semana e a análise do perfil de lodo na coluna do reator, realizada quinzenalmente.

A análise da qualidade do biogás ao longo do dia foi realizada por meio do analisador de gases portátil do fabricante Landtec®, Biogás CDM. As análises foram realizadas duas vezes por semana.

Ao final do período experimental, com os dados médios, foram obtidos alguns coeficientes de produção de biogás/metano que podem ter aplicabilidade através de parâmetros simples monitorados nas estações, como vazão afluente, carga orgânica aplicada e carga orgânica removida. Tais coeficientes foram também comparados com outros trabalhos.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

DQO

Ao longo do período analisado foram obtidos 40 dados de DQO, sendo a média da DQO afluente de 560 mg.L^{-1} , valor típico encontrado em esgotos sanitários, segundo von Sperling (2014). O efluente do reator apresentou DQO média de 197 mg.L^{-1} . Assim, a eficiência média de remoção de DQO durante o período foi de 64%, valor também coerente com o esperado para o tratamento anaeróbio por reatores UASB (Chernicharo, 2007).

A Figura 3 apresenta a variação dos dados de DQO obtidos ao longo do período analisado. Como pode ser observado, apesar da mediana ter apresentado um valor típico, os dados de DQO afluente obtidos apresentaram grande amplitude interquartil, estando essa, porém, ainda dentro da faixa típica para esgotos sanitários reportada por von Sperling (2014), de 450 a 800 mg.L⁻¹.

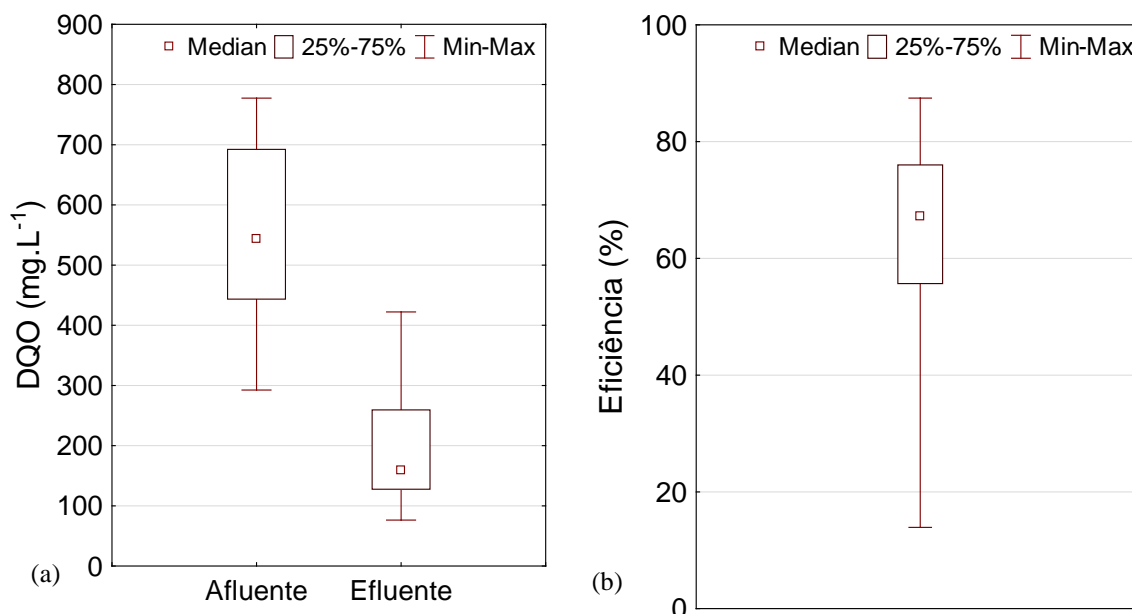


Figura 3 - Box-plot da DQO - (a) concentração afluente e efluente, (b) eficiência de remoção

Produção de biogás e metano

A produção de biogás, em série temporal mostrada na Figura 4, apresentou uma média de, aproximadamente, 2.048 NL.dia⁻¹, com um desvio padrão de 772 NL.dia⁻¹. Uma vez que a produção de biogás é decorrente da conversão da matéria orgânica aplicada ao reator, seria de se esperar que a produção de biogás ao longo dos dias apresentasse poucas variações, entretanto, considerando que a DQO afluente apresentou grandes variações ao longo do período, conforme discutido anteriormente, o perfil variável da produção pode ser explicado.

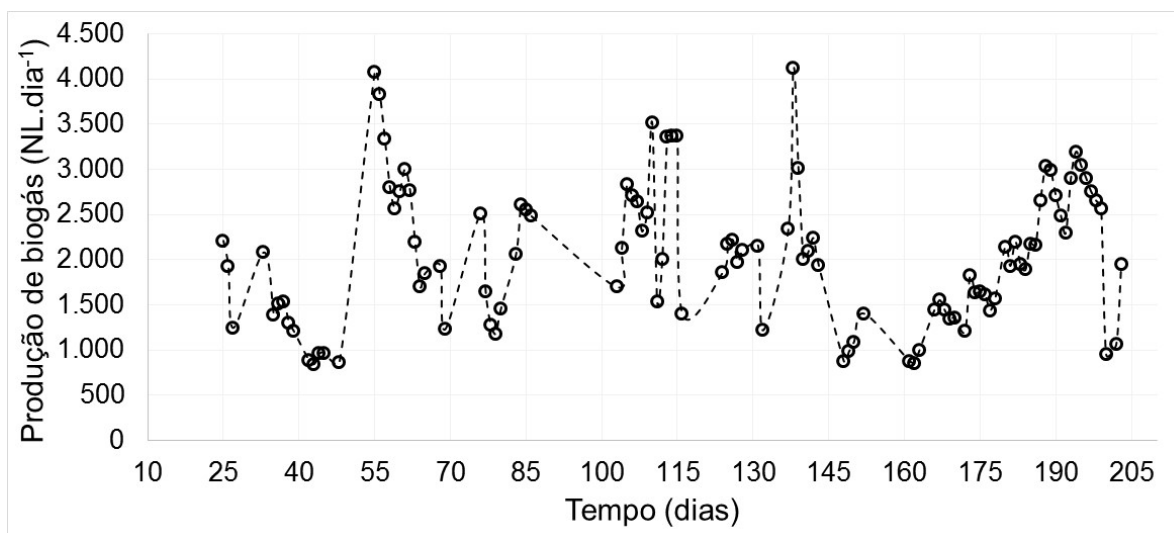


Figura 4 - Série temporal da produção volumétrica de biogás

Assim, compreende-se que a variação da carga orgânica ao longo dos dias provocou a instabilidade da conversão da matéria orgânica em seus produtos finais, que compõem o biogás, que pode ser comprovado também pela grande variação da eficiência de remoção (Figura 3b).

A Figura 5 apresenta a série temporal da variação eficiência de remoção de DQO juntamente com a variação da produção diária de biogás ao longo do período analisado. Conforme já levantado anteriormente, a produção de biogás acompanha a variação da concentração de matéria orgânica afluente, uma vez que é decorrente da conversão da mesma. Percebe-se picos máximos e mínimos de produção de biogás conjunto com o aumento e diminuição, respectivamente, da concentração de matéria orgânica afluente.

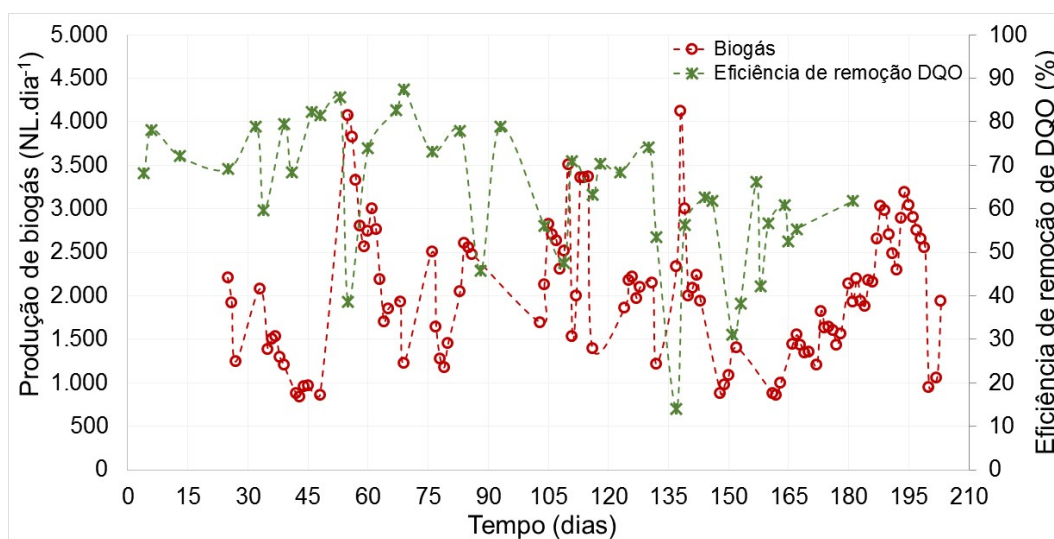


Figura 5 - Série temporal da eficiência de remoção de DQO e da produção diária de biogás

A Figura 6 apresenta a dispersão dos dados de produção diária do biogás. Ao total, foram analisados 106 dias, em virtude dos procedimentos de descarte de lodo e de espuma, tendo sido necessário retirar alguns dias.

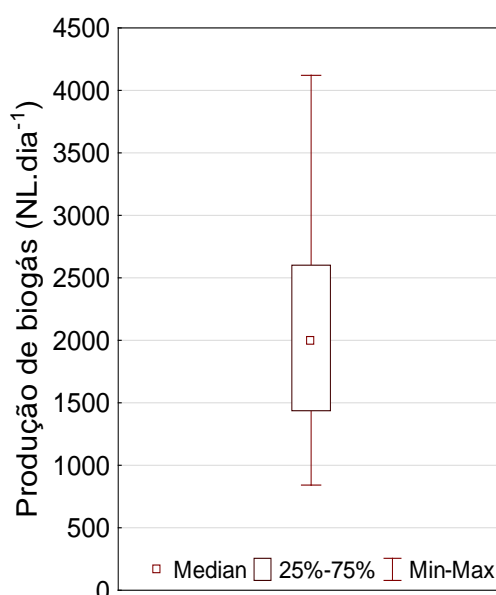


Figura 6 - Box-plot da produção diária de biogás

Segundo Lens e Verstraete (1991) e Megaert *et al.* (1992) *apud* Francisqueto (2007), os sistemas anaeróbios para tratamento de esgotos sanitários não foram testados quanto a sua capacidade de sustentar-se sob variações de vazão. De acordo com van Lier *et al.* (2001) as flutuações de cargas hidráulicas e orgânicas podem afetar negativamente o desempenho dos reatores.

Percebe-se que as concentrações de metano presente no biogás, em série temporal na Figura 7, apresentaram algumas variações ao longo do período operacional analisado, entretanto, mantendo em sua maior parte valores acima de 50%_{v/v}. A concentração de metano presente no biogás apresentou uma média de 68%_{v/v} e desvio padrão de 10%_{v/v}, valor de acordo com o reportado pela literatura, entre 60-80%_{v/v} de metano presente no biogás (NOYOLA, MORGAN-SAGASTUME, LÓPEZ-HERNAÁNDEZ, 2006).

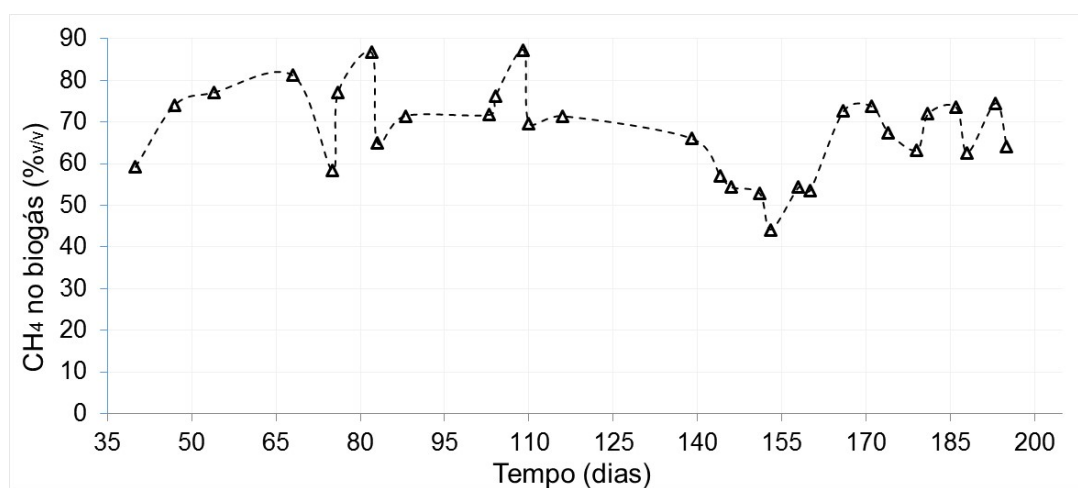


Figura 7 - Série temporal da concentração de metano no biogás

Para o metano dissolvido observou-se o mesmo comportamento, conforme verificado na série temporal da Figura 8. Pela Figura, percebe-se que apesar de ainda haver alguns valores menores, de maneira geral, a concentração se manteve constante, fato que também pode ser evidenciado pelo desvio padrão obtido da amostra. A concentração média de metano dissolvido foi de 14,9 mg.L⁻¹, aproximadamente, com desvio padrão de 2,2 mg.L⁻¹, estando um pouco abaixo dos valores já encontrados por outros pesquisadores, como Souza *et al.* (2011) e Matsuura *et al.* (2015) que reportam concentrações entre 15-25 mg.L⁻¹.

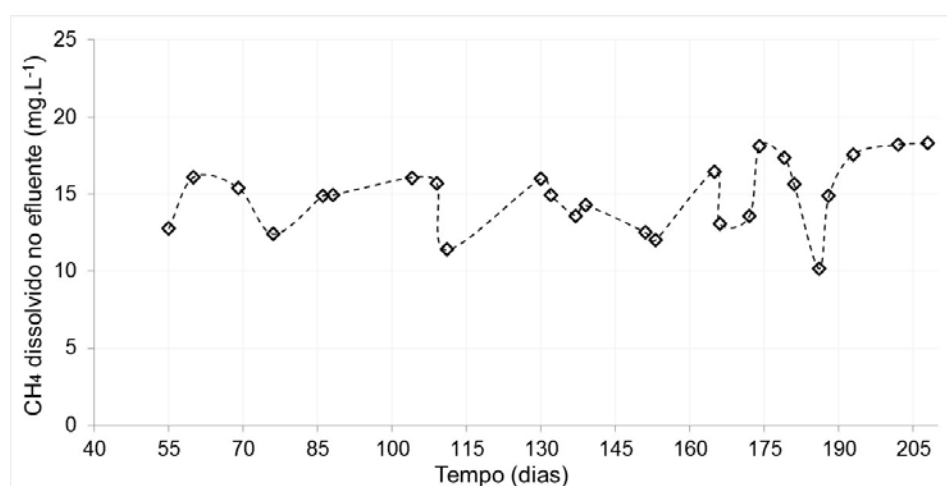


Figura 8 - Série temporal da concentração de metano dissolvido no efluente

Hartley e Lant (2006) levantaram a hipótese de que o metano dissolvido em efluentes de reatores anaeróbios pode ser supersaturado em relação a saturação calculada de acordo com a lei de Henry. Para os resultados obtidos neste trabalho, o metano se apresentou subsaturado (0,95).

Assim, o presente trabalho traz um intrigante resultado, por identificar um menor percentual de saturação de metano dissolvido no efluente. Cabe ressaltar que grande parte dos trabalhos dispostos a avaliarem metano dissolvido são desenvolvidos em escala de bancada e piloto e também operando reatores sob vazão constante. Dessa forma, pressupõe-se que o próprio regime de operação, sob hidrograma típico, pode ocasionar tais variações à cerca da saturação do metano dissolvido. Assim, obteve-se um coeficiente de perda de metano dissolvido de $63,0 \text{ L}_{\text{CH}_4\text{dissolvido}} \cdot \text{kgDQO}_{\text{removida}}^{-1}$.

De maneira geral, as concentrações de metano presente no biogás e dissolvido no efluente apresentaram também um perfil de dispersão bastante variado (Figura 9). Foram analisados 34 dados para o metano presente no biogás e 26 dados de metano dissolvido no efluente.

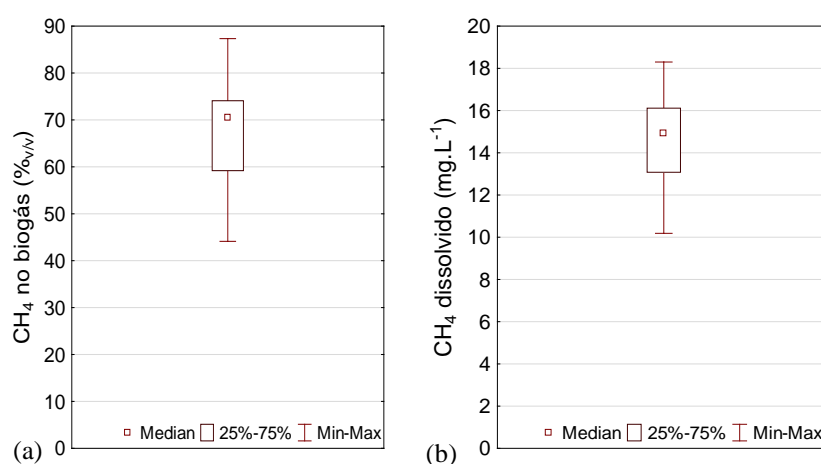


Figura 9 - Box-plot da concentração de CH₄ – (a) no biogás e (b) dissolvido no efluente

O metano presente no biogás representou apenas cerca de 14% do total da carga orgânica aplicada ao reator, valor muito abaixo ao encontrado por Souza, Chernicharo e Aquino (2011), de 27%. Já em relação ao total de metano produzido, o metano no biogás representou cerca de 57%, valor somente um pouco menor que o reportado por Souza, Chernicharo e Aquino (2011), de 62%.

A fração de metano dissolvido representou cerca de 11% da carga de DQO aplicada ao reator UASB e, em relação ao total de metano produzido, representou, aproximadamente, 43%. Medições realizadas por Souza, Chernicharo e Aquino (2011) indicaram que, em relação à DQO aplicada ao reator, cerca de 17% foi utilizada em conversão de metano que permaneceu dissolvido no efluente e, de todo o metano produzido em reatores UASB tratando esgoto doméstico, a parte dissolvida no efluente variou de 30 a 41%. A Figura 10 mostra a distribuição da DQO total afluente convertida a metano, nas suas fases gasosa e líquida.

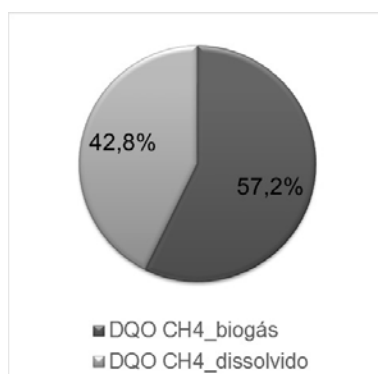


Figura 10 - Balanço de massa da DQO total afluente convertida a CH₄

A fração de metano produzida que não é contabilizada na fase gasosa do biogás e nem dissolvido no efluente, pode ser atribuída a perdas de gases residuais pela parte superior do decantador, conforme coloca Souza, Chernicharo e Aquino (2011), que encontraram perdas residuais representando até 5% do total de metano produzido.

Massa de lodo (sólidos totais e voláteis)

A massa de sólidos presente no interior do reator também foi avaliada ao longo do período. A Figura 11 apresenta a série temporal das massas de ST e STV. As linhas tracejadas na vertical representam os dias em que houve grandes descartes de lodo no reator.

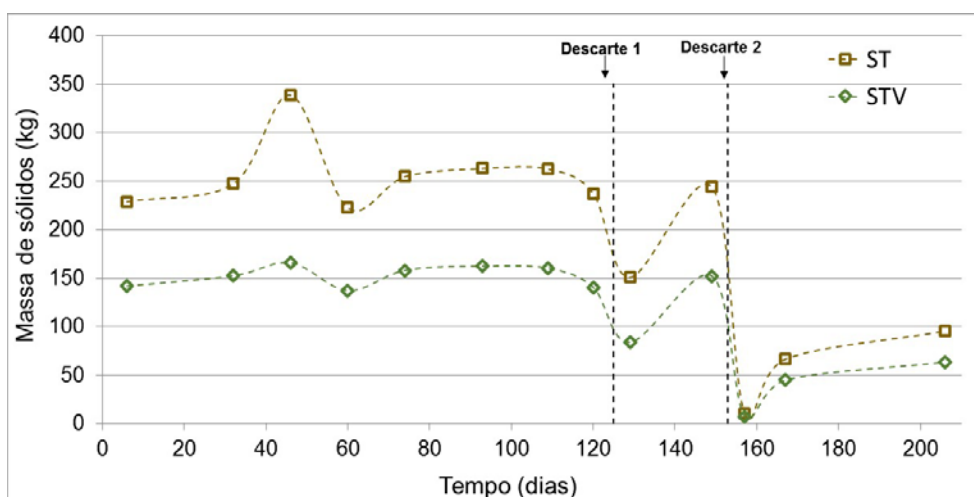


Figura 11 - Série temporal da variação de sólidos totais e voláteis no reator

Como pode ser observado na Figura 12, a quantidade de lodo/biomassa no interior do reator apresenta influência direta sobre a produção de biogás. Nota-se que nos momentos em que houve descarte de lodo, verificou-se um decréscimo na produção de biogás, e quando a biomassa volta a crescer, percebe-se também um aumento na produção de biogás. Tal fato pôde também ser comprovado em estudo realizado por Melo (2015), que avaliou a produção de biogás e metano em reatores UASB tratando esgoto doméstico, dando a partida sem inóculo, evidenciando que a produção efetiva de biogás e metano ocorrem a partir do momento em que se encontra no reator a quantidade mínima necessária à conversão da matéria orgânica.

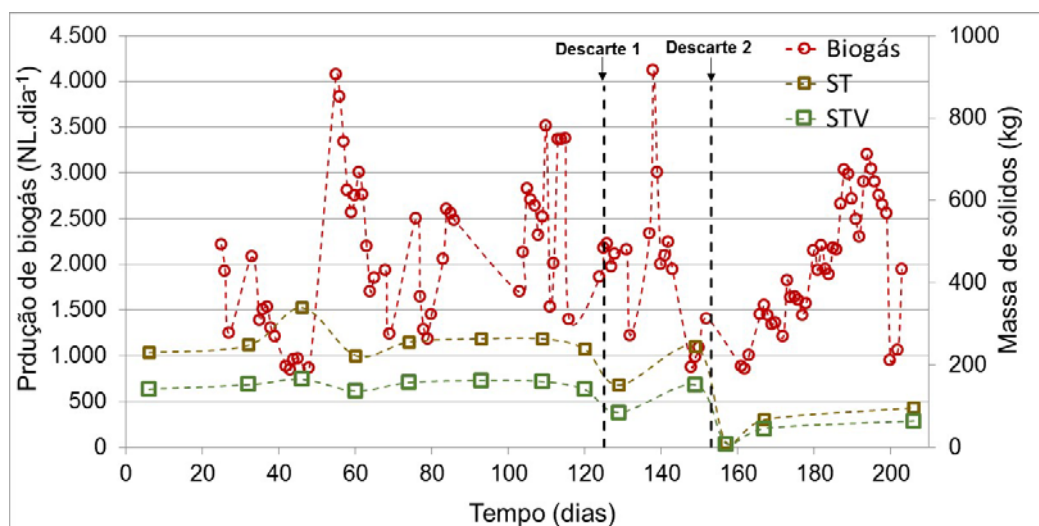


Figura 12 - Série temporal da variação de sólidos e da produção de biogás

Considerando a carga de matéria orgânica diária média aplicada ao reator ($46,3 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$ e $560 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), obteve-se a relação de $7,8 \text{ kgST} \cdot \text{kgDQO}_{\text{apl}}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$ e uma carga biológica de $0,2 \text{ kgDQO}_{\text{apl}} \cdot \text{kgSTV}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$. Chernicharo (2007) ressalta que a carga biológica máxima depende da atividade metanogênica específica (AME) do lodo e que, para esgotos domésticos, a atividade metanogênica encontra-se usualmente dentro a faixa de $0,1$ a $0,4 \text{ gDQOCH}_4 \cdot \text{gSTV}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$, que seria, então, o limite para a carga biológica.

Coefficientes de produção

A partir de dados médios, foram obtidos coeficientes para a produção de biogás e metano, que são os fatores de interesse em estações de tratamento de esgoto, tanto para o gerenciamento quanto para o aproveitamento dos subprodutos. Os principais coeficientes obtidos foram de $79,0 \text{ NL}_{\text{biogás}} \cdot \text{kgDQO}_{\text{apl}}^{-1}$, $124,1 \text{ NL}_{\text{biogás}} \cdot \text{kgDQO}_{\text{rem}}^{-1}$ e $44,2 \text{ NL}_{\text{biogás}} \cdot \text{m}^{-3} \text{ esgoto}$.

Comparou-se também os resultados encontrados no presente trabalho com outros obtidos em pesquisas realizadas estudando a produção de biogás, contudo, tratando esgoto com vazão constante. Tais coeficientes são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Coeficientes de produção de biogás e metano no biogás

Coeficientes de produção calculados	Vazão variável		Vazão constante		
	Presente trabalho	Araújo <i>et al.</i> (2015)	Souza (2010)	Lobato <i>et al.</i> (2012)	Melo (2015)
$\text{NL}_{\text{biogás}} \cdot \text{kgDQO}_{\text{aplicada}}^{-1}$	79,0	171,5	146,9-151,0	-	131,2
$\text{NL}_{\text{biogás}} \cdot \text{kgDQO}_{\text{removida}}^{-1}$	124,1	281,1	176,6-193,5	162,0-245,0	175,1
$\text{NL}_{\text{biogás}} \cdot \text{m}^{-3} \text{ esgoto}$	44,2	148,0	65,8-75,6	60,0-100,0	73,5
$\text{NL}_{\text{CH}_4} \cdot \text{kgDQO}_{\text{aplicada}}^{-1}$	53,5	138,9	92,5-112,1	-	87,8
$\text{NL}_{\text{CH}_4} \cdot \text{kgDQO}_{\text{removida}}^{-1}$	84,1	227,7	121,7-131,1	113,4-196,0	117,3
$\text{NL}_{\text{CH}_4} \cdot \text{m}^{-3} \text{ esgoto}$	30,0	119,0	41,4-52,9	42,2-81,3	49,1

Verificou-se que os coeficientes encontrados no presente trabalho estiveram consideravelmente abaixo da maioria reportada em outros trabalhos. Entretanto, ressalta-se que tais trabalhos tiveram seus reatores operados sob vazão constante. Assim, pressupõe-se que o fato de o reator operar sob regime de hidrograma típico pode contribuir para uma situação de instabilidade na conversão da matéria orgânica, juntamente com a variação da concentração de matéria orgânica aplicada ao reator, conforme já foi colocado anteriormente, levando à menores produções de biogás e metano.

Araújo *et al.* (2015) avaliaram a produção de biogás em reator UASB tratando esgoto doméstico em uma ETE escala real, operando também com hidrograma típico recebendo, porém, uma vazão média equivalente à, aproximadamente, 38% da vazão de projeto. Os resultados encontrados pelos pesquisadores estiveram acima dos resultados obtidos neste trabalho. Segundo Araújo *et al.* (2015) a produção de biogás acompanhou as variações da vazão de esgoto afluente à estação, ressaltando a relação direta entre a vazão tratada pela estação e o volume de biogás produzido pelos reatores. Entretanto, os próprios autores ressaltam a ocorrência de imprecisões nas medições realizadas.

Por meio do projeto Probiogás, do Ministério das Cidades do governo federal, medições estão em andamento em 10 estações de tratamento de esgoto (ETE) em todo o Brasil, objetivando encontrar quanto de biogás se produz em várias unidades relativas, para assim, caracterizar a produção de biogás em termos de vazão e composição do esgoto. Uma organização prévia dessa caracterização foi apresentada por Cabral *et al.* (2015). No referido estudo, os autores apresentaram os dados de uma determinada estação que também trabalhava com hidrograma típico. Entretanto, os dados foram apresentados em termos de produção horária, não sendo possível fazer correlações com o presente trabalho em termos de produção diária e coeficientes.

Cabral *et al.* (2015) reportaram, novamente, um perfil de produção periódico e temporal variável, de forma que as maiores taxas de produção foram observadas no período de 15 a 18 horas e as menores taxas no período de 07 a 10 horas, acompanhando o hidrograma típico à estação. Entretanto, os próprios autores ressaltam que se trata de dados não conclusivos, uma vez que os mesmos se referem a um período de adaptação do projeto e ajustes dos medidores.

CONCLUSÕES

Ao longo do período analisado, a produção diária de biogás apresentou grandes variações, fato que pode estar relacionado às grandes variações da concentração de matéria orgânica afluyente ao reator, promovendo instabilidade da conversão da matéria orgânica em seus produtos finais. A concentração média de DQO foi de 633 mg.L⁻¹ com desvio padrão de 143 mg.L⁻¹. Ressalta-se que a eficiência média de remoção de DQO para o período foi de 64%. Já a produção diária de biogás apresentou média de 2.048 NL.dia⁻¹ com desvio padrão de 772 NL.dia⁻¹. Assim, tem-se que a produção de biogás tende a apresentar variações mais significativas quando operados em regimes de hidrogramas típicos, sobretudo quando o reator recebe efluentes com grandes variações de matéria orgânica.

Constatou-se ainda que a produção de biogás sofre influência direta da quantidade de lodo/biomassa presente no reator. Foi verificado ao longo da operação uma carga biológica média de 0,2 kgDQO_{apl}.kgSTV⁻¹.dia⁻¹.

Concentrações de metano no biogás estiveram dentro do esperado para reatores UASB tratando esgoto doméstico, com média de 68%_{v/v} e desvio padrão de 10%_{v/v}. Entretanto, concentrações de metano dissolvido apresentaram valores inferiores aos reportados em literatura, com média de 14,9 mg.L⁻¹ e desvio padrão de 2,2 mg.L⁻¹.

Por fim, foram obtidos coeficientes de produção que foram comparados com outros trabalhos. Os principais coeficientes gerados nesse trabalho foram de 44,2 NL_{biogás}.m³_{esg.}⁻¹, 79,0 NL_{biogás}.kgDQO_{apl}⁻¹, 124,1 NL_{biogás}.kgDQO_{rem.}⁻¹.

Entretanto, são necessários ainda maiores aprofundamentos para que se possa compreender com clareza qual é, de fato, a influência do regime de operação com vazão variável na produção de biogás de reatores UASB tratando esgoto doméstico, juntamente com a variação da matéria orgânica aplicada.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA, AWWA, WPCF. Standard methods for the examination of water and wastewater, 18 th edition. Washington DC.: American Public Health Association, 2005.
2. ARAUJO, S. F.; PEREIRA, S. P.; GONDIM, R. B.; LIMA, D. T. Avaliação da produção de biogás em reatores UASB operando em escala real no tratamento de efluente doméstico. ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, 2015.
3. Brasil. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto/Probiogás; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); autores, Bruno Silveira ... [et al.]. – Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2015. 183 p.: il. – (Aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto ; 1)



4. CABRAL, C. B. G.; PLATZER, C. J.; ROSENFELDT, S.; HOFFMANN, H. CHERNICHARO, C. A. L. Caracterização do biogás gerado no tratamento de efluentes domésticos em reatores UASB no Brasil. ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, 2015.
5. CAMPOS, H. M.; VON SPERLING, M. Estimation of domestic wastewater characteristics in a developing country based on socio-economic variables. *Water Science and Technology*. [S.l: s.n.], 1996.
6. CHERNICHARO, C. A. L. Reatores anaeróbios. 2 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. 380 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.5).
7. FRANCISQUETO, L. D. O. S. Comportamento de Reatores UASB Frente a Variações Horárias de Vazão de Esgoto Sanitário. p. 178, 2007.
8. HARTLEY, K. & LANT, P. 2006. Eliminating non-renewable CO₂ emissions from sewage treatment: an anaerobic migrating bed reactor pilot plant study. *Biotech. Bio.* 95 (3), 384–398.
9. LOBATO, L. C. S.; CHERNICHARO, C. A. L.; SOUZA, C. L. Estimates of methane loss and energy recovery potential in anaerobic reactors treating domestic wastewater. *Water Science and Technology*, v. 66, n. 12, p. 2745–2753, 2012.
10. MATSSURA, 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. MELO, D. F. Estudo da influência da quantidade de lodo na produção de biogás em reator UASB tratando esgoto doméstico. 2015. 99 p f. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente, Saneamento e Recursos Hídricos - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2015.
12. METCALF; EDDY. *Wastewater engineering: treatment, disposal, reuse*. 4. ed. [S.l: s.n.], 2004.
13. NOYOLA, A.; MORGAN-SAGASTUME, J. M.; LÓPEZ-HERNÁNDEZ, J. E. Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: Odor control and energy/resource recovery. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, v. 5, n. 1, p. 93–114, 2006.
14. POSSETI, G. R. C.; JASINSKI, V. P.; MESQUITA, N. C.; KRIGUEL, K.; CARNEIRO, C. Medições em tempo real do biogás produzido em reatores UASB alimentados com esgoto doméstico. In: 27º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2013. Goiânia. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária. 2013.
15. RIBEIRO, T. B. Sistema UASB/FBP submetido a hidrograma típico de vazão: avaliação do uso de meio suporte baseado em espuma de poliuretano e operação sem decantadores secundários [manuscrito] / Thiago Bressani Ribeiro. - 2015.
16. SOUZA CL, CHERNICHARO C. A. L., AQUINO S.F., (2011) Quantification of dissolved methane in UASB reactors treating domestic wastewater under different operating conditions. *Water Science Technololy*. 64(11):2259–2264.
17. SOUZA, C. L. Estudo das rotas de formação, transporte e consumo dos gases metano e sulfeto de hidrogênio. 2010. 147 p f. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente, Saneamento e Recursos Hídricos - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010.
18. VAN LIER, J.B.; TILCHE, A.; AHRING, B.K.; ACARIE, H.; MOLETTA, R.; DOHANYOS, M.; HULSHOFF, L.W.; LENS, P.; VERSTRAETE, W. New perspectives in anaerobic digestion. *Water Science and Technology*, v. 43, n. 1, p. 1–18, 2001.
19. VON SPERLING, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias- Vol. 1: Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgostos. Editora UFMG. 4.ed. Belo Horizonte, 2014. 470 p.