

XI-116 - AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM REATORES UASB EM ESCALA PLENA TRATANDO ESGOTO DOMÉSTICO: CORRELAÇÕES A PARTIR DE MEDIÇÕES EM TEMPO REAL

Carolina Bayer Gomes Cabral⁽¹⁾

Engenheira Sanitarista e Ambiental. Mestre em Engenharia Ambiental pela UFSC. Doutoranda em Engenharia Sanitária na Universidade Técnica de Berlim. Engenheira da Rotária do Brasil.

Gustavo Rafael Collere Possetti

Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal do Paraná (UFPR) e Engenheiro Eletricista pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Mestre e doutor em Ciências pela UTFPR. Gerente da Assessoria de Pesquisa e Desenvolvimento da SANEPAR. Professor do Programa de Mestrado Profissional em Governança e Sustentabilidade do Instituto Superior de Administração e Economia do Mercosul (ISAE-FGV).

Christoph Julius Platzer

Engenheiro civil pela Universidade Técnica de Munique. Doutor em Engenharia Sanitária pela Universidade Técnica de Berlim. Sócio diretor da empresa Rotária do Brasil.

Carlos Augusto de Lemos Chernicharo

Engenheiro Civil e Sanitarista. Doutor em Engenharia Ambiental pela Universidade de Newcastle upon Tyne – UK. Professor Associado do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG.

Matthias Barjenbruch

Engenheiro Civil pela Universidade de Hannover. Doutor em Engenharia Sanitária pela Universidade de Hannover. Professor titular na Universidade Técnica de Berlim (TU Berlin)

Endereço⁽¹⁾: Rua Teodoro Manuel Dias, 421 - Bairro Santo Antônio de Lisboa - Florianópolis – Santa Catarina - CEP: 88050-540 - Brasil - Tel: +55 (48) 3234-3164 - Fax: +55 (48) 3234-3164 - e-mail: carolina@rotaria.net

RESUMO

O artigo apresenta os resultados das medições de vazão e composição de biogás em reatores UASB em escala real, em tempo real, durante um período de 6 meses. Para relacionar a produção do biogás com as demais variáveis intervenientes também foram realizadas medições de vazão de esgoto, de DQO do esgoto afluente e efluente aos reatores UASB e coletados dados como pluviometria e temperatura do esgoto. A partir dos dados coletados, realizou-se a análise de correlação da produção do biogás com carga orgânica removida, bem como com a pluviometria e a temperatura do esgoto. Por fim, estimou-se o potencial de geração de energia elétrica na ETE. Observou-se que a produção de biogás oscilou durante o período analisado, tendo diminuído em função das maiores precipitação e vazão de esgoto. Durante o período das medições, os valores médios de vazão de esgoto e de concentração de DQO afluente foram de 397 l/s e 453 mg/l, respectivamente. Isso possibilitou a geração de uma vazão média de biogás de 49 Nm³/h, contendo em média 80,5% de metano. A partir da eficiência média de remoção de DQO no reator UASB (67%), obteve-se a produção unitária de 80,8 NL de metano por quilograma de DQO removida. Já o potencial de geração de energia calculado foi de 3.216 kWh/d, que possibilitaria a instalação de um conjunto motogerador com potência de 134 kW.

PALAVRAS-CHAVE: Biogás, medições, tratamento anaeróbio, reator UASB, esgoto doméstico.

INTRODUÇÃO

O emprego de reatores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) tem sido considerado um importante fator para o aumento dos índices de cobertura de tratamento de esgoto na América Latina. Uma das vantagens inerentes ao uso da tecnologia anaeróbia está vinculada a custos. Tipicamente, uma planta de tratamento de esgoto dotada de reatores UASB demanda custos com investimento e operação até 50% menores que aqueles associados com uma planta convencional concebida a partir do sistema de lodos ativados (CHERNICHARO *et al.*, 2015).

Na busca pelo desenvolvimento de um sistema de tratamento autossuficiente, é de fundamental importância o gerenciamento integrado dos subprodutos gerados no processo, como o biogás, otimizando os seus benefícios (potencial energético) e minimizando os impactos (redução de odores e da emissão de gases de efeito estufa). Para tanto, busca-se entender o verdadeiro potencial combustível que se pode esperar desses reatores, formas para maximizá-lo e minimizar fugas de biogás ao meio ambiente.

Nesse contexto, este artigo pretende aprofundar o entendimento sobre a produção de biogás em reatores anaeróbios, correlacionando-a com alguns fatores operacionais e ambientais, tendo em vista que no Brasil são ainda incipientes os estudos sobre a caracterização quantitativa e qualitativa em tempo real do biogás proveniente de reatores anaeróbios em escala plena alimentados continuamente com esgoto doméstico.

MATERIAIS E MÉTODOS

O sistema de tratamento adotado na estação de tratamento de esgoto (ETE) analisada é composto por 6 reatores UASB, seguidos por 2 lagoas aeradas facultativas. Trata-se de uma ETE de médio porte, cujas principais características estão reportadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características da estação monitorada – médias anuais

DQO (mg/L)	Vazão de esgoto (l/s)	PE (hab.)	Temperatura (°C)	Pluviometria (mm/a)
517,00	371,85	198.000	16,80	1500

Para que fosse possível a quantificação da carga orgânica removida no esgoto tratado pelos reatores UASB, bem como da vazão e da composição do biogás produzido em cada reator monitorado, utilizaram-se os seguintes equipamentos:

- Medidor ultrassônico de nível instalado na Calha Parshall (para mensuração de vazão de esgoto);
- Medidor de vazão de biogás tipo Vórtex, instalado na linha de coleta do biogás para queima;
- Medidor de composição do biogás, composto por sensores dos teores de metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), sulfeto de hidrogênio (H₂S) e oxigênio (O₂), recebendo amostras de biogás coletado da linha do queimador.

Além disso, utilizaram-se os dados operacionais e ambientais enviados pela companhia responsável pela operação da ETE (vazão de esgoto, DQO afluente, DQO removida, temperatura do esgoto e precipitação na ETE). Os valores medidos foram transmitidos para um banco de dados (Komvex-Scadaweb) e, posteriormente, tratados em planilhas eletrônicas. Em seguida, empregou-se o programa computacional “Statistica 12” para elaboração da estatística descritiva e gráficos, como o Box-plot. Para auxílio na interpretação dos dados realizaram análises de correlação entre as variáveis avaliadas.

O período utilizado para o presente estudo foi de setembro de 2015 até fevereiro de 2016. De posse dos resultados das medições foram calculadas as relações unitárias NL CH₄/kg DQO removida e NL CH₄/m³ de esgoto tratado. Esses resultados foram comparados com aqueles provenientes do modelo de Lobato *et al.* (2012), o mais recente e que considera o maior número de variáveis para estimativa de produção de biogás em reatores UASB tratando esgoto doméstico. Para tanto, empregou-se o *software* Probio 1.0.

Por fim, o potencial de geração de energia foi estimado com base na vazão de metano ($Q_{CH_4, disponível}$), calculada multiplicando-se a vazão de biogás medida pela concentração de metano média de cada ETE. Assim, com um teor energético de 9,9 kWh/Nm³CH₄ ($EA_{específica}$) e a eficiência elétrica típica de um conjunto motogerador ($\eta_{elétrico}$) de 36 %, estimou-se a energia elétrica (E) a ser gerada mediante recuperação do biogás, conforme Equação 1:

$$E = Q_{CH_4, disponível} \cdot EA_{específica} \cdot \eta_{elétrico} = Q_{CH_4, disponível} \cdot 9,9 \text{ kWh/m}^3 \cdot 36\% \quad (1)$$

A potência elétrica do conjunto motogerador foi calculada dividindo-se o resultado da Equação 1 por 24h, assumindo-se, dessa forma, o uso contínuo do equipamento.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 1 apresenta-se a série histórica da composição de biogás durante o período monitorado.

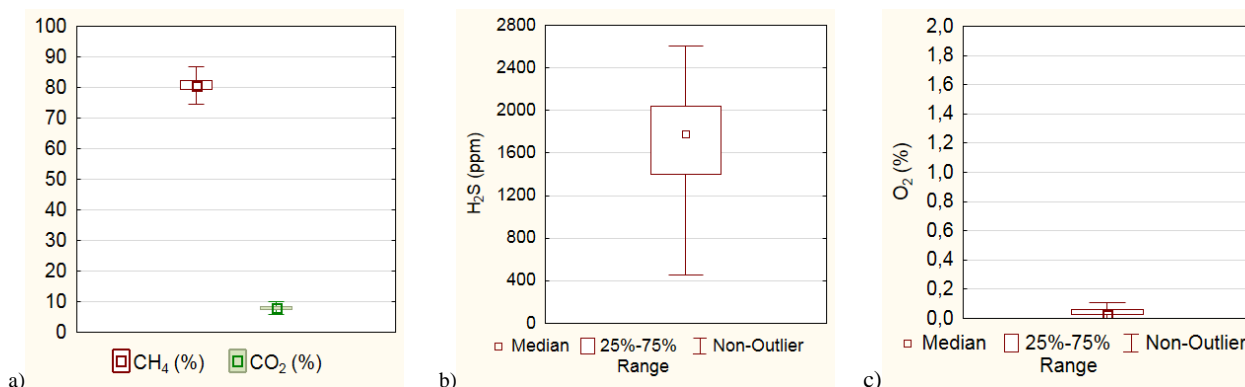


Figura 1: Médias horárias da composição do biogás: a) CH₄ e CO₂, b) H₂S, c) O₂.

As concentrações médias horárias de CH₄, CO₂ e O₂ foram, respectivamente, $(80,5 \pm 2,4)$, $(8,3 \pm 0,7)$ e $(0,04 \pm 0,02)\%$ v/v. Destaca-se que 50% dos valores de concentração de CH₄ ficaram entre 79,1 e 82,2% v/v, sem ocorrer qualquer tipo de tratamento do biogás. Esses valores estão de acordo com a faixa reportada na literatura (SILVEIRA *et al.*, 2015; DWA-M 361, 2011).

Por sua vez, a concentração média horária de H₂S foi de (1.746 ± 410) ppm, com mínimo de 376 ppm e máximo de 2.604 ppm. Esses resultados indicam que a remoção dessa substância antes do aproveitamento energético do biogás é importante para evitar problemas com a corrosão de componentes eletromecânicos e para minimizar as emissões de compostos sulfurosos oriundos de sua combustão. Por exemplo, grupos motogeradores tipicamente demandam concentrações de H₂S abaixo de 130 ppm para o seu bom funcionamento (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2008; SOREANU *et al.*, 2011). Além disso, esses resultados estão algumas ordens de grandeza acima do limiar de detecção humano da substância ($\sim 0,4$ ppb), indicando que o controle das emissões de biogás é imprescindível para mitigar problemas com maus odores nas proximidades das ETEs.

Cabe destacar que a soma das concentrações de CH₄, CO₂, O₂ e H₂S é menor que 100% v/v. Dessa forma, acredita-se que a parcela complementar ($\sim 11\%$ v/v) seja representada por nitrogênio (N₂), conforme reportado por Noyola *et al.* (2006).

Na Figura 2 visualizam-se as médias horárias das vazões de esgoto e de biogás durante o período das medições.

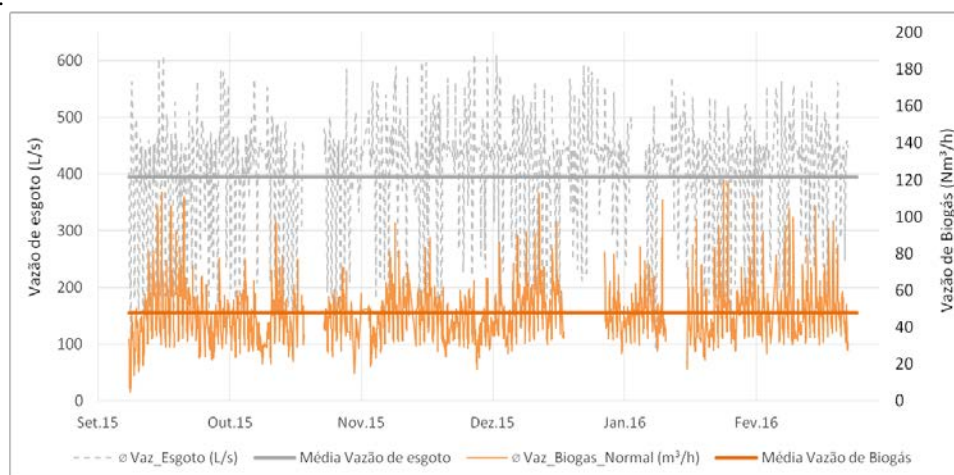


Figura 2: Médias horárias das vazões de esgoto e de biogás

Destaca-se que existe uma grande variação horária dos valores de vazão de esgoto e biogás. A vazão média horária de esgoto foi de (395 ± 45) L/s, com mínimo de 279 L/s e máximo de 506 L/s. Já a vazão média horária de biogás foi de $(48 \pm 9,6)$ Nm³/h, com mínimo e máximo de 27,6 e 83,9 Nm³/h, respectivamente, sendo que 50% dos valores ficaram entre 41 e 53 Nm³/h.

Observou-se também que, de modo geral, existe um comportamento diário padrão das vazões de esgoto e de biogás, com máximos e mínimos bem característicos. Dessa forma, como reportado por Possetti *et al.* (2013), as taxas de produção de biogás seguiram um comportamento variável, periódico e não-estacionário. A Figura 3 resume esse comportamento diário padrão. A vazão máxima de biogás ocorreu no período da tarde, nas proximidades das 15 horas.

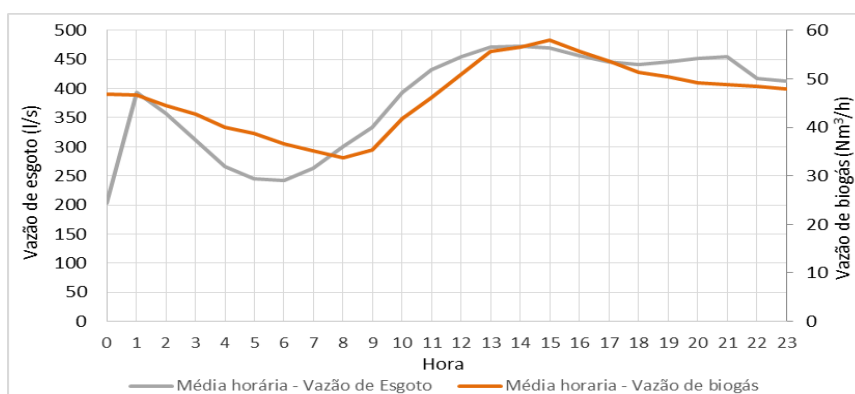


Figura 3: Comportamento horário padrão das vazões de esgoto e de biogás

A Tabela 2 sumariza as principais estatísticas descritivas das seguintes variáveis: vazão de esgoto, DQO afluente, DQO removida, carga removida, temperatura do esgoto, precipitação e vazão de biogás. A matriz de correlações dessas variáveis está apresentada na Tabela 3.

Tabela 2 – Estatística descritiva dos parâmetros operacionais inerentes a ETE

Variável	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão
Vazão de esgoto (L/s)	397,40	280,87	492,67	46,76
DQO afluente (mg/L)	453,72	132,00	1244,00	225,14
DQO removida (mg/L)	298,57	19,00	1144,00	198,61
Carga removida (kg DQO remov/h)	417,03	24,51	1473,23	276,59
Temperatura do esgoto (°C)	21,87	20,00	26,00	1,43
Precipitação (mm/d)	7,88	0,00	45,00	10,70
Vazão de biogás (Nm³/h)	48,83	35,14	65,41	8,04

Para avaliar a variação temporal desses itens em conjunto foram elaborados os gráficos Box-plot apresentados na Figura 4.

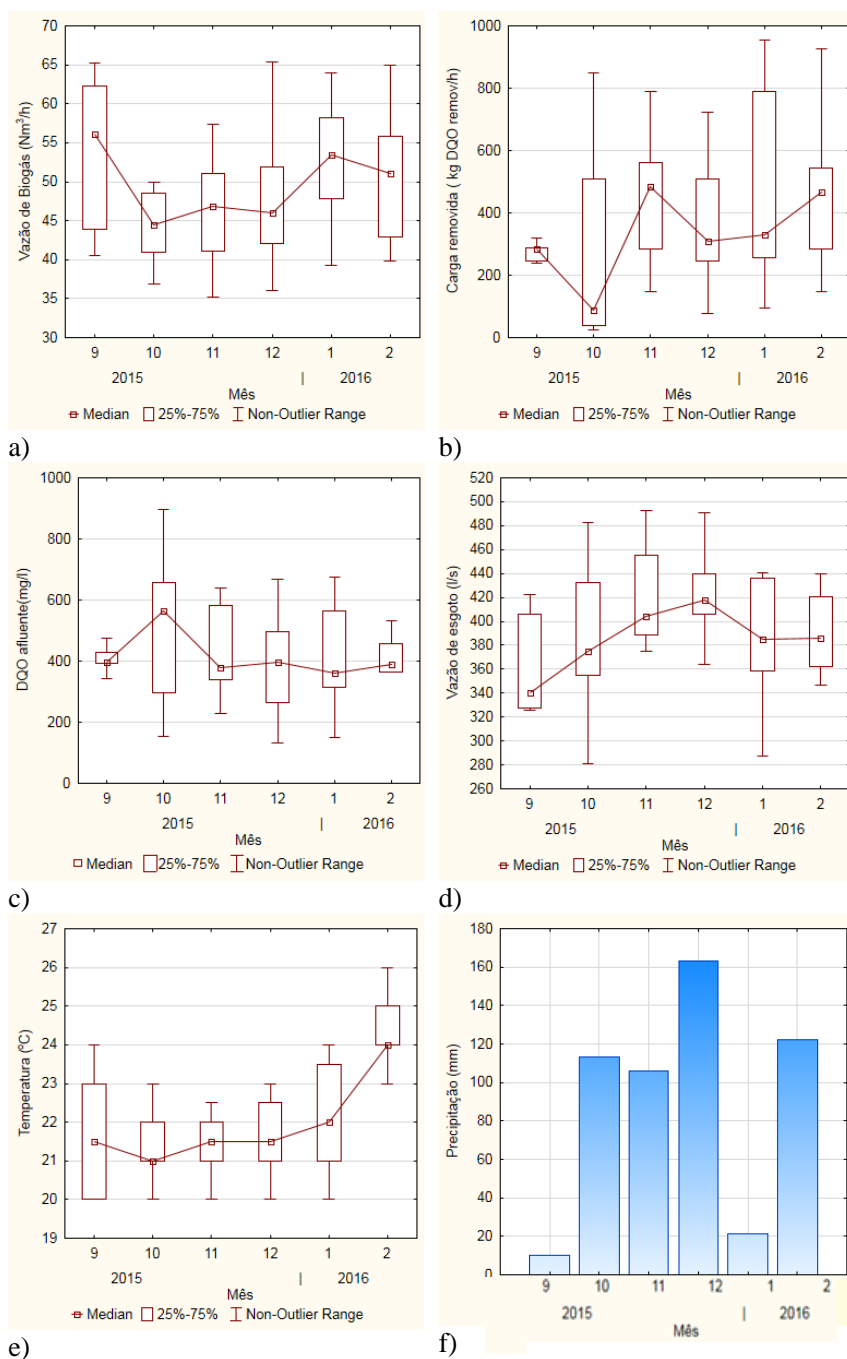


Figura 4: Gráficos Box-plot das variáveis: a) Vazão de biogás; b) Carga removida; c) DQO afluente; d) Vazão de esgoto; e, e) temperatura. Gráfico de colunas de precipitação acumulada (f).

Observando os gráficos não é possível, apenas visualmente, explicar a relação das variáveis com a produção de biogás, devido à sobreposição do efeito de cada uma. Assim, para verificar a relação entre as variáveis, elaboraram-se matrizes de correlações pelos métodos de Gamma, Kendall Tau e Spearman. Os resultados obtidos foram aproximadamente iguais e, portanto, optou-se por apresentar a tabela obtida pelo método de Spearman, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Matriz de correlações entre as variáveis*

Variável	Vazão de Biogás	Vazão de esgoto	DQO afluente	Carga removida	Precipitação	Temperatura
Vazão de Biogás	1,000000	-0,268449	0,305117	0,313709	-0,353712	0,224307
Vazão de esgoto	-0,268449	1,000000	-0,330136	-0,268992	0,376632	-0,164344
DQO afluente	0,305117	-0,330136	1,000000	0,933304	-0,077856	0,042798
Carga removida	0,313709	-0,268992	0,933304	1,000000	-0,134246	0,105031
Precipitação	-0,353712	0,376632	-0,077856	-0,134246	1,000000	0,142206
Temperatura	0,224307	-0,164344	0,042798	0,105031	0,142206	1,000000

* Correlações **marcadas em negrito** tem significância ao nível $p < 0,05$ (5%).

Constatou-se que a vazão de biogás está correlacionada positivamente com DQO afluente e com a carga removida. Por outro lado, verificou-se que a vazão de biogás está correlacionada negativamente com a precipitação e com a vazão de esgoto. Não há correlação estatística significativa entre as variáveis vazão de biogás e temperatura para o nível de significância atribuído. Destaca-se que durante as medições ocorreram eventos significativos de chuva, os quais diminuíram a vazão de biogás. Isso se reflete na correlação negativa também com a variável vazão de esgoto. Esse efeito da chuva em reatores UASB foi reportado também por Waiss e Possetti (2015) e por Cabral *et al.* (2016).

Destaca-se assim que parâmetros como vazão de esgoto, DQO e pluviometria foram mais determinantes na variação da produção de biogás do que a temperatura. Isso também foi verificado por Campello (2009) ao monitorar um reator em escala plena, concluindo que outras variáveis desempenharam papel mais importante que a temperatura. Esse comportamento com temperaturas entre 20 e 25 °C também foi reportado por Van Haandel e Lettinga (1994).

Para verificar o efeito das chuvas e a relação da vazão de biogás com a vazão de esgoto, os dados foram divididos em 3 categorias, período em que a precipitação acumulada ficou abaixo de 1 mm (efeito da chuva não significativo, conforme verificado por Silva em sua investigação em outra ETE), entre 1 e 10 mm e acima de 10 mm. Para esses três períodos verificou-se a relação da vazão de biogás com a vazão de esgoto nos gráficos de distribuição ilustrados na Figura 5.

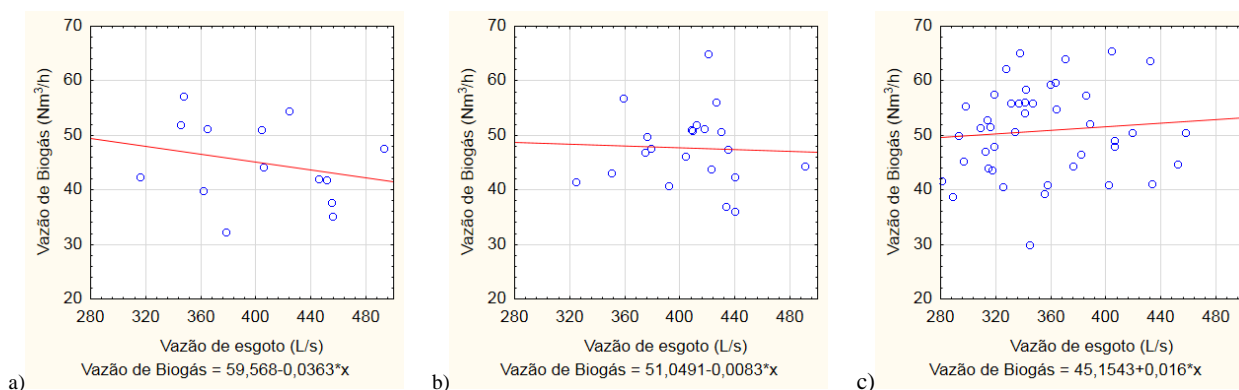


Figura 5: Gráficos de distribuição relacionando vazão de biogás com vazão de esgoto para: (a) dias com chuva superior a 10 mm; (b) dias com chuva inferior a 10 mm e superior a 1 mm; (c) dias com chuva inferior a 1mm.

Para os dias com chuva acumulada superior a 1 mm, constatou-se uma queda na vazão de biogás a medida que a vazão de esgoto aumentou, sendo a queda mais acentuada nos dias de chuva mais forte (acima de 10 mm). Nesse período a vazão de biogás média foi de 44 Nm³/h e a vazão de esgoto 403 l/s. Para os dias com chuva entre 1 e 10 mm, a média da vazão de biogás foi de 47 Nm³/h e de esgoto foi de 407 l/s. Nos dias com precipitação inferior a 1 mm, observou-se um leve aumento da produção de biogás, com o aumento da vazão de esgoto. Nesse período, as vazões médias de esgoto e de biogás foram, respectivamente, 353 l/s e 51 Nm³/h.

Quanto as taxas de produção de biogás por metro cúbico de esgoto e por carga removida, a Tabela 4 resume as principais relações unitárias obtidas por meio das medições, bem como por meio de estimativas do modelo proposto por Lobato *et al.* (2012).

Tabela 4 - Relações unitárias obtidas para a ETE em comparação com o modelo de Lobato *et al.* (2012).

Relação unitária	Unidade	ETE – Valores medidos			Pior situação (modelo)		
		Máx.	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média
Volume unitário de CH ₄	NL.m ⁻³ esgoto	49,2	13,8	27,3	81,7	16,7	42,2
	NL.kgDQO _{remov} ⁻¹	170,4	30,1	80,8	154,1	66,0	113,4

Observa-se que as relações unitárias obtidas para a ETE sob investigação estão abaixo da pior situação de reatores UASB modelada por Lobato *et al.* (2012), que é a situação onde o potencial energético é menor (sistemas operando com esgoto mais diluído, concentrações de sulfato maiores, menor eficiência de remoção de DQO e maiores índices de perda de metano).

Por fim, considerando os valores medidos, realizaram-se estimativas de geração de energia elétrica associada com a recuperação do biogás, bem como a potência do conjunto motogerador necessário para tal. Os resultados obtidos foram: 3.216 kWh/d e 134 kW, respectivamente.

CONCLUSÕES

- Os resultados apresentados apontam de maneira realista o potencial de geração de energia em reatores UASB, já que se baseia em medições realizadas em uma ETE em escala real. O teor de metano encontrado (~80%) é próprio para o aproveitamento em unidades de co-geração de energia e pelo teor de H₂S (média próxima a 1800 ppm) é necessário prever mecanismos de remoção bruta (redução aproximada de 2000 a 500 ppm) e fina (de 500 a 50 ppm) dessa substância.
- Os períodos de chuva aparentemente fazem com que a produção de biogás seja reduzida e, nesse caso, a temperatura não teve influência significativa quando comparada com os demais fatores. A vazão de esgoto e a precipitação apresentaram correlação negativa com a produção de biogás nesse período, sendo que a carga removida apresentou relação positiva.
- A taxa de produção de metano encontrada foi de 80,8 NL.kgDQO_{remov}⁻¹ o que está abaixo do pior cenário modelado por Lobato *et al.* (2012).
- O fato das relações unitárias de produção de biogás estarem abaixo da pior situação prevista pelo modelo de Lobato *et al.* (2012) indica que as perdas de biogás sinalizadas pelos referidos autores (metano dissolvido no efluente, vazamentos por meio de fissuras para a atmosfera) certamente estão presentes nos reatores da ETE em questão e aparentemente essas parcelas são maiores do que o previsto no modelo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CABRAL, C. B. G.; PLATZER, C. J.; CHERNICHARO, C. A. L.; HOFFMANN, H.; BELLI, P. F. Evaluation of biogas production and energy recovery potential in a full-scale WWTP with UASB reactors. XII Latin American Workshop and Symposium on Anaerobic Digestion, 2016
- 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).
- DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction**. Wiley-VCH, Weinheim. 443 p. 2008.
- LOBATO, L.C.S., CHERNICHARO, C.A.L., SOUZA C.L. (2012). Estimates of methane loss and energy recovery potential in anaerobic reactors treating domestic wastewater. Water Science and Technology, 66 (12) 2745-2753.

5. NOYOLA, A.; MORGAN-SAGASTUME, J.M.; LÓPEZ-HERNÁNDEZ, J.E. Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odour control and energy/resource recovery. *Reviews in Environmental Sciences and Bio/Technology*, v.5, p. 93-114. 2006.
6. POSSETTI, 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: *Anais do 27º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 2013.
7. ROSENFELDT, S.; CABRAL, C. B. G. ;PLATZER, C. J.; HOFFMANN, H.; ARAUJO, R.A. Avaliação da viabilidade econômica do aproveitamento energético do biogás por meio de motor-gerador em uma ETE. *28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 2015.
8. SILVA, T. C. F. Utilização de Biogás de Estações de Tratamento de Esgoto para Fins Energéticos. 2015. 152p. Dissertação – Programa de Pós Graduação em Energia da Universidade de São Paulo – São Paulo, 2015.
9. SILVEIRA, B. et al. Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto. Brasília, DF. Ministério das Cidades, 2015. 183 p.
10. SOREANU, G., BÉLAND, M., FALLETTA, P., EDMONSON, K., SVOBODA, L., AL-JAMAL, M., SETO, P. **Approaches concerning siloxane removal from biogas - A review**. *Canadian Biosystems Engineering*. 53: 8.1-8.18, 2011.
11. VALENTE, V. B. Análise de viabilidade econômica e escala mínima de uso do biogás de reatores anaeróbios em Estações de Tratamento de Esgoto no Brasil. Dissertação (mestrado) UFRJ/COPPE 182 p. Rio de Janeiro. 2015.
12. WAISS, T.C.F. e POSSETTI, G.R.C. Influência de eventos de chuva na produção de biogás de reatores anaeróbios alimentados com esgoto doméstico. In: *Anais do 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 2015.