

Aplicabilidade de medidor de gás natural tipo diafragma para monitoramento da produção de biogás de reatores anaeróbios de pequena escala



Aplicability of diaphragm type gas flowmeter for monitoring of biogas production of small scale anaerobic reactor

- **Data de entrada:**
20/11/2018
- **Data de aprovação:**
20/12/2018

Tiago Borges Ferreira^{1*} | Cláudio Leite de Souza¹ | Gustavo Rafael Collere Possetti² | Carlos Augusto de Lemos Chernicharo¹

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2020.043>

ORCID ID

Ferreira TB  <https://orcid.org/0000-0002-9425-9851>
Souza CL  <https://orcid.org/0000-0003-3560-3488>

Possetti GRC  <https://orcid.org/0000-0001-8816-5632>
Chernicharo CAL  <https://orcid.org/0000-0001-7226-8266>

Resumo

A produção de biogás é um importante parâmetro do monitoramento de reatores anaeróbios, porém o elevado custo dos medidores é um dos fatores limitantes para essa mensuração. Apesar de considerável fração das estações de tratamento de esgoto brasileiras empregar reatores anaeróbios, poucas unidades monitoram a produção de biogás. Com base nisso, avaliou-se um medidor de diafragma, utilizado para quantificar o volume de gás natural e/ou GLP, montado em série com um medidor tipo tambor rotativo Ritter, reconhecidamente eficiente em monitoramentos de produção de biogás em reatores anaeróbios. Avaliou-se a precisão relativa do medidor de diafragma, verificando erro relativo percentual médio e máximo de 1,9 e 3,4%, respectivamente. Esses resultados são positivos se considerados fatores como simplicidade estrutural, disponibilidade nacional e baixo custo inerentes ao medidor de diafragma.

Palavras-chave: Reator UASB. Tratamento de esgoto. Aproveitamento energético. Biometano. Medidor de vazão de biogás.

Abstract

The biogas production is an important parameter of anaerobic reactors monitoring. However, the high cost of flowmeters is one of the main limiting factors for this control. Despite considerable numbers of Brazilian sewage treatment plants employ the anaerobic reactors, small part of this units monitoring the biogas production. Based on this, this study evaluated a diaphragm type gas flowmeter, used for monitoring the domestic gas (LPG or natural gas), installed in series with a drum type gas flowmeter Ritter, admittedly efficient for biogas monitoring from anaerobic reactors. It also evaluated the relative precision of diaphragm flowmeter, obtained relative percentage error average and maximum of 1.9 and 3.4%, respectively. These results were positive, if considered the structural simplicity, national available and low cost inherent of diaphragm flowmeter.

Keywords: UASB reactor. Sewage treatment. Energy recovery. Biomethane. Flow biogas meter.

¹ Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) - Belo Horizonte - Minas Gerais - Brasil.

² Instituto Superior de Administração e Economia do Mercosul - Curitiba - Paraná - Brasil.

* **Autor correspondente:** tiago_bferreira@hotmail.com.

1 INTRODUÇÃO

A aplicação de tecnologias anaeróbias para o tratamento de esgoto sanitário é uma possibilidade para países tropicais e subtropicais, pois a temperatura é um importante fator para sua aplicação a efluentes com baixa carga orgânica e presença de sólidos. Seu adequado emprego resulta em três distintos produtos: lodo anaeróbio, efluente tratado e biogás, sendo este último composto majoritariamente por metano (60 a 70%), o que tem despertado maior interesse em seu aproveitamento energético, motivado principalmente pela lógica atual de tecnologias sustentáveis e de baixa emissão de carbono.

Além da potencial utilização desse composto, a vazão de biogás é um importante parâmetro de monitoramento de reatores anaeróbios, utilizada para determinação de suas eficiências e estabilidade do processo de digestão.

Há disponíveis comercialmente diversos modelos de medidores, os quais utilizam distintas formas de determinar o fluxo gasoso proveniente desses reatores. O princípio de medição atualmente mais popularizado é o deslocamento positivo, porém modelos recentes com métodos distintos, como ultrassônicos, mássicos e termais têm se destacado pela precisão, dimensão e pouca influência física na corrente gasosa.

No caso específico do Brasil, assim como outros países em desenvolvimento, há alguns fatores limitantes à utilização desses modelos, principalmente pela dificuldade de aquisição e assistência técnica, além do elevado custo, pois a maioria deles é importada.

Em escala laboratorial, tem-se desenvolvido aparatos simplificados que se baseiam principalmente no deslocamento de líquido para possibilitar o monitoramento da produção de biogás. Alguns trabalhos reportam modelos alternativos de medidores automáticos de baixo custo (LIU, OLSSON, MATTIASSON, 2004; CADENA PEREDA,

RIVERA MUÑOZ, HERRERA RUIZ, 2010; MARTÍNEZ-SIBAJA et al., 2011), sendo ainda possível empregar aqueles cujos princípios foram descritos por Walker et al. (2009) para medidas manuais simplificadas sem a influência da dissolução dos componentes do biogás no líquido utilizado, como realizado com sucesso em escala laboratorial por Ferreira et al. (2018).

Para reatores em escalas maiores, principalmente para estações de tratamento de esgoto (ETE) em escala real, não há muitas opções simplificadas e boa acurácia. Cerca de 40% das ETes brasileiras utilizam reatores anaeróbios (BRASIL, 2017), porém não há dados de quantas delas monitoram a produção de biogás, sendo o custo dos medidores um dos possíveis fatores para a ausência deste monitoramento. A possibilidade de utilizar os modelos laboratoriais possivelmente resultaria em aparatos de elevado custo, pela escala e robustez demandada, além de aparatos complexos e pouco aplicáveis a realidade nacional.

Outros setores comerciais que comercializam gases, como é o caso do setor de gás liquefeito de petróleo (GLP) residencial, possuem modelos simplificados de medidores. Um modelo bastante popularizado para esse fim é o medidor de diafragma, o qual também utiliza princípio de deslocamento positivo para possibilitar a determinação do volume. Sua estrutura é constituída por uma carcaça externa de alumínio e componentes interno de plástico, não sendo danificado por componentes agressivos presentes nos gases (LAO, s.d.). Porém, uma questão para a qual se deve atentar é o fato de algumas dessas partes internas serem móveis, o que tem sido reportado como uma característica negativa desses medidores (CASCETTA E VIGO, 1994), pois isso pode resultar em travamentos.

Quando utilizados para monitoramento do fluxo de gás doméstico, sob condições de pressão contínua, e respeitada a faixa ideal de fluxo, possuem

precisão maior que 99% (LAO, s.d.), além de possuir dimensões e massa relativamente reduzidas.

Assim, esse trabalho teve por objetivo avaliar a aplicação de um medidor nacional, tipo diafragma, utilizado para quantificar gás natural doméstico, no monitoramento da produção de biogás de reator anaeróbio.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Aparato experimental

O aparato experimental para desenvolvimento dos testes de avaliação do medidor tipo diafrag-

ma foi instalado na plataforma de metanização de resíduo alimentar da Universidade Federal de Minas Gerais (pMethar/UFGM), na linha de biogás de um digestor anaeróbio utilizado para o tratamento de resíduos alimentares gerados em um dos restaurantes universitários (FERREIRA, 2015). Os testes foram realizados de maneira comparativa, instalando-se dois medidores em série, sendo o primeiro do tipo diafragma, da marca LAO®, e o segundo da marca Ritter®. A Fig. 1 ilustra o diagrama esquemático do aparato experimental, assim como a Fig. 2 apresenta imagens desses medidores.

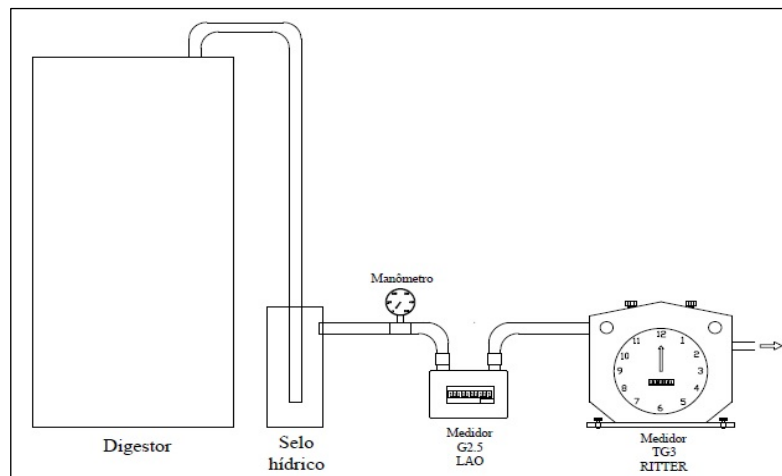


Figura 1. Ilustração esquemática do sistema montado para avaliação do medidor tipo diafragma

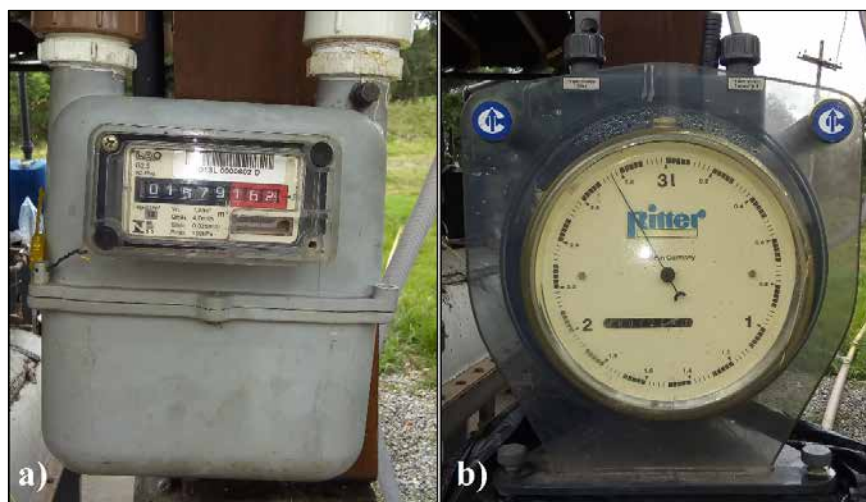


Figura 2. Medidores empregados no experimento: a) medidor tipo diafragma modelo G2.5 LAO®, b) medidor TG3 Ritter®.

Fonte: autor.

Apesar de ambos os medidores serem volumétricos, não havendo determinação direta da vazão, apresentam características gerais distintas, como se pode verificar na Tabela 1.

Tabela 1. Características metrológicas do medidor tipo diafragma LAO® G2.5 e medidor de tambor TG3 Ritter®.

Característica	Medidor	
	LAO G2.5*	Ritter TG 3
Vazão máxima (L.h ⁻¹)	4.000	360
Vazão mínima (L.h ⁻¹)	25	5
Acurácia de fundo de escala (%)	0,5	0,5
Acurácia de leitura (%)	<0,5	0,2
Pressão máxima de trabalho (mbar)	1000	50
Perda de pressão (mbar)	0,25 - 1,25**	0,2

*Utilizado para gás natural residencial

**Condicionada a vazão de gás

Fontes: LAO (s.d) e RITTER (2011)

O modelo TG3 Ritter® foi adotado como sistema de medição padrão pelo fato de fazer parte de uma ampla linha de medidores reconhecidamente aplicáveis a essa função, sendo este e outros modelos dessa mesma marca utilizados em trabalhos similares (BENITO MARTIN; SCHLIENZ; GREGER, 2017; GANESH et al., 2014).

A pressão do biogás na tubulação foi monitorada por manômetro analógico em inox, marca Elite, de 0 a 500 mmCA (milímetros de coluna de água), instalado na entrada do sistema, em série com os demais medidores.

2.2 Coleta e tratamento dos dados

Os volumes registrados por ambos os medidores, hora e a pressão na tubulação de biogás foram

coletados manualmente cerca de duas vezes ao dia, durante quatro meses de monitoramento. Para a análise geral, utilizou-se o software MS Excel® para realização de estatística descritiva e determinação da variação percentual relativa de cada par de vazões, tomando o medidor TG3 Ritter® como sistema de medição padrão. A análise da normalidade, correlação e teste de hipótese dos dados verificados em ambos os medidores foi realizada no software Statistica® 8.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O digester de resíduos alimentares, em que foi instalado o sistema, operou com carga orgânica volumétrica (COV) de 0,13 (DP - desvio padrão 0,03) kg ST m⁻³ d⁻¹, valor inferior à faixa de 1 a 4 kg SV m⁻³ d⁻¹ normalmente aplicada em digestores operados sob essas condições, (BENITO MARTIN; SCHLIENZ; GREGER, 2017; GRIMBERG et al., 2015; PAUDEL et al., 2017; SAMBUSITI et al., 2015; VOELKLEIN et al., 2016). Essa carga volumétrica foi mantida para que a produção de biogás não extrapolasse a faixa ótima de operação dos dois medidores (25 a 360 L h⁻¹), sendo esses valores referentes ao limite inferior e superior dos medidores de diafragma e Ritter, respectivamente.

As distribuições das vazões de biogás determinadas a partir dos volumes registrados em ambos os medidores se encontram agrupadas na Fig. 3.

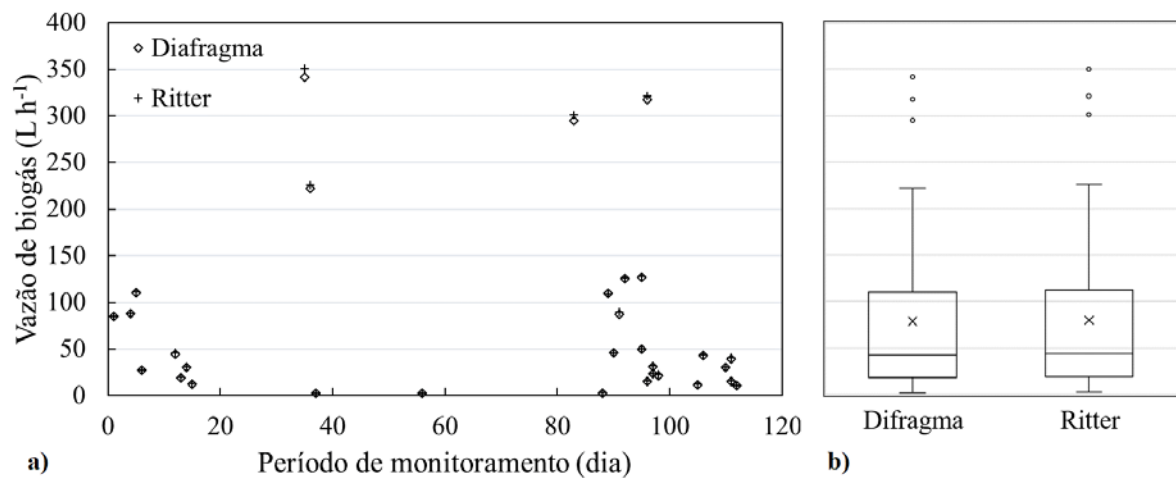


Figura 3. Distribuição temporal das vazões médias diárias de biogás (a) e a distribuição quantitativa das vazões (b) de ambos os medidores (n = 37)

Como se pode verificar na figura supracitada, a distribuição temporal das vazões não foi uniforme, variando entre 2,2 e 317 L h⁻¹ e condicionada ao regime de alimentação e disponibilidade de resíduos alimentares. Para a distribuição quantitativa das vazões de biogás de ambos os medidores, pode-se notar valores de medianas muito próximas; 42,7 e 43,9 L h⁻¹ para os medidores de diafragma e Ritter, respectivamente. Os valores de 1° e 3° quartis também foram semelhantes, 18,9 e 110,2 L h⁻¹ para o

medidor de diafragma e 19,6 e 111 L h⁻¹ no caso do medidor Ritter (Fig. 3).

Com base na análise de distribuição das vazões, pôde-se confirmar que não seguem distribuição normal, sendo necessários métodos não paramétricos para suas análises estatísticas. A correlação entre os dados que se enquadram no intervalo comum a ambos os medidores (25 a 360 L h⁻¹) foi realizada com vazões verificadas em diferentes momentos do dia, não se restringindo a vazões médias diárias (Fig. 4).

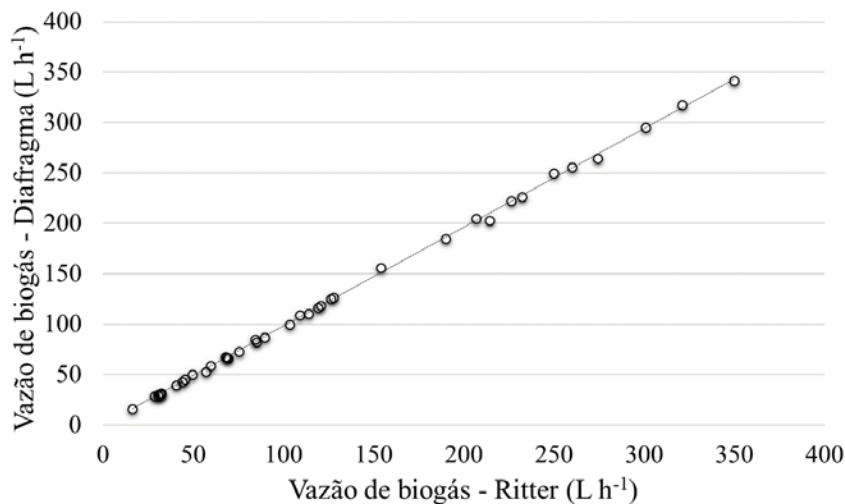


Figura 4. Correlação entre as vazões de biogás verificadas nos dois medidores monitorados (n: 39)

Há uma correlação bastante expressiva entre as vazões de biogás determinadas durante o experimento, resultando em um coeficiente de Spearman elevado (0,999). Essa característica reforça a similaridade das vazões medidas em ambos os medidores. Ainda com esse grupo de vazões de biogás que atendem ao intervalo adequado aos dois medidores, aplicou-se teste de Mann-Whitney para verificação da similaridade das medidas obtidas nos dois aparelhos a um intervalo

de confiança de 99% ($\alpha = 0,01$), para o qual se obteve valor de $p: 1,0$. Esse resultado confirma a similaridade dos dois equipamentos com grau bastante elevado de segurança.

Confirmada a similaridade dos medidores pelo teste de hipótese, determinou-se as diferenças percentuais entre os pares de vazões, sendo apresentadas na Fig. 5 no eixo das ordenadas, em relação às vazões verificadas no sistema de medição padrão.

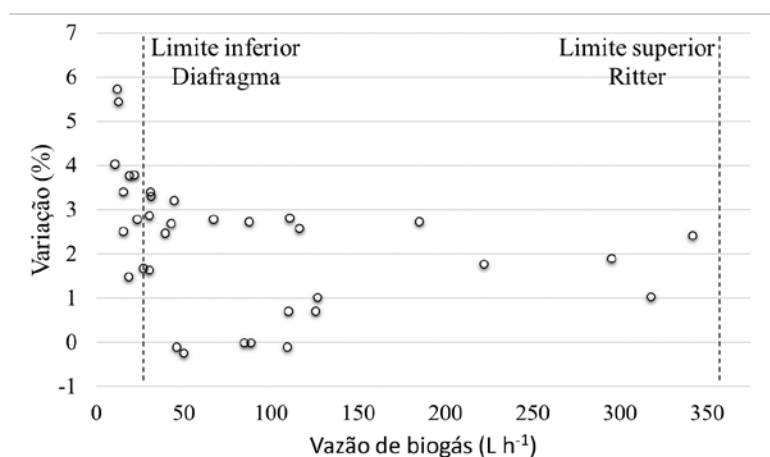


Figura 5. Curva de erro verificada em relação à vazão de biogás e a variação percentual calculada entre o sistema de medição padrão e o medidor de diafragma.

A apresentação de todo o conjunto de dados possibilitou a confirmação da necessidade de respeitar a faixa prescrita pelo fabricante para obter medidas mais acuradas. O medidor Ritter possui limite inferior de 5 L h⁻¹, mantendo assim sua acurácia e possibilitando avaliar o medidor de diafragma quando em vazões inferiores aos 25 L h⁻¹, para as quais se pode verificar a elevação do erro percentual relativo na leitura efetuada pelo medidor de diafragma.

Para os valores que se enquadram na faixa coincidente aos dois medidores (25 a 360 L h⁻¹), verificou-se erro percentual máximo de 3,4%, para vazão próxima ao limite inferior (30 L h⁻¹). As vazões enquadradas na faixa citada resultaram em

valor médio de 100,6 (DP 90,6) L h⁻¹, com erro percentual médio de 1,9 (DP 1,1) % entre o medidor de diafragma e o sistema de medição padrão. Essa diferença é superior à reportada pelo fabricante para uso em linhas residenciais de gás (LAO, s.d), porém as condições de trabalho são distintas, principalmente em relação à variação de pressão, discutida no item subsequente.

Alguns medidores de baixo custo importados, como é o caso do medidor ultrassônico Puxin BF 2000, produzidos especificamente para monitoramento de biogás em reatores anaeróbios, podem apresentar, segundo o fabricante, erro percentual de até 1,5%. Apesar de maior erro percentual relativo verificado para o medidor

tipo diafragma, deve-se destacar o fato de esse medidor ser oriundo de produção nacional, o que pode proporcionar facilidade na aquisição, manutenção e reposição. Outro método que possui erro percentual semelhante (1,5 a 5%) aos verificados para o medidor de diafragma é a medição por meio de pressão dinâmica, porém necessita da densidade do biogás, além de operar melhor em elevadas pressões (BRASIL, 2015).

A faixa de vazão avaliada, quando enquadrada no conceito de população equivalente (P.E.), resultaria em valores entre 100 e 150 habitantes, típicos de estações de tratamento de esgoto sanitário (ETE) descentralizadas, de porte muito pequeno, nas quais raramente se utiliza algum tipo de monitoramento da produção de biogás. Tendo em vista que existem medidores tipo diafragma com diversas faixas de operação, isso

possibilitaria a aplicação em ETEs de diferentes escalas, inclusive nas pequenas unidades utilizadas no tratamento descentralizado.

3.1 Variação de pressão

A produção de biogás em reatores anaeróbios não é realizada em fluxo contínuo, pois geralmente os mesmos são submetidos a variações de vazão e de carga orgânica ao longo do dia. Principalmente no caso de reatores tratando esgoto sanitário em estações de pequeno porte, ou ainda em sistemas alimentados de forma intermitente, como é o caso do biodigestor de resíduos alimentares em questão. Como consequência, o fluxo de biogás apresentará variações de pressão, verificadas neste experimento e apresentadas na Fig. 6.



Figura 6. Variação de pressão verificada ao longo do período experimental (n: 43)

Verifica-se na Fig. 6 que houve variação de pressão, permanecendo com valores entre 0 e 140 mmCA. Apesar de alguns valores elevados, a maior parte dos dados verificados localizavam-se próximos a 0 mmCA, sendo este o valor de sua mediana teórica. O fato de se tratar de reduzi-

da e variável pressão possivelmente é um fator que causa a elevação dos erros verificadas para o medidor de diafragma, pois seu uso em redes domésticas de gás natural/GLP não está submetido a tais oscilações.

3.2 Considerações em relação ao custo e fatores operacionais

O custo final de medidores está condicionado à faixa de vazão mais adequada, além de fatores como câmbio, impostos e fretes, no caso de importação. De forma geral, desconsiderando os custos de importação, o medidor tipo diafragma avaliado neste experimento possui custo entre 28 e 33 vezes menor que outros modelos como mássico termal e o TG Ritter, utilizado como referência neste estudo. Apesar de oferecerem acurácias mais elevadas, os custos desses modelos importados podem inviabilizar sua aplicação em unidades de menor porte. O monitoramento de unidades com essas características não necessita de elevada acurácia, porém baixo custo e robustez são características determinantes para aplicações amplas e disseminadas.

Outro ponto a se destacar é a possibilidade de travamento das partes móveis internas do medidor tipo diafragma, porém tais ocorrências não foram constatadas durante os quatro meses de avaliação, mesmo utilizando um medidor que já se encontrava em uso por, pelo menos, 1 ano. Em experiências anteriores, utilizando esse modelo de medidor nesse mesmo digestor, foram identificados travamentos, porém o tempo esperado para tais ocorrências e custos de manutenções preventivas e corretivas deve ainda ser avaliado com monitoramentos em longo prazo.

Martí-Herrero et al. (2018) reportam o acúmulo de água no interior de medidor, oriundo da condensação da umidade presente no biogás, ao operarem equipamento semelhante (G2.5 Metrix) na mensuração da vazão de biogás gerado em digestor de resíduos de frutas e verduras operado em regime semicontínuo, demandando monitoramento e limpeza semanal. Em todo o período experimental, cerca de 4 meses, além do período de uso anterior, cerca de 1 ano, o medidor avaliado (G2.5 LAO) não foi aberto para

limpeza ou remoção de líquido. Possivelmente, o fato de haver um selo hídrico (Fig. 1) na tubulação de biogás, instalado entre o reator e o medidor, seja o motivo da inexistente demanda pela remoção de líquido do interior do equipamento.

4 CONCLUSÕES

Com base nesses resultados verifica-se a possibilidade de utilizar o modelo de medidor tipo diafragma para monitoramento de produção de biogás em reator anaeróbico, com erro percentual relativo médio de 1,9%, apesar da diminuta e variável pressão na tubulação.

Adicionalmente, deve-se destacar a existência de modelos produzidos no Brasil, com reduzido custo, quando comparados a outros medidores comerciais importados.

Recomenda-se realização de monitoramento em longo prazo para verificação da estabilidade, assim como a determinação da vida útil e manutenções necessárias.

Assim, a simplicidade operacional, boa acurácia e baixo custo, de fato, justificam o emprego desse equipamento no monitoramento da produção de biogás em reatores anaeróbios, particularmente nas plantas menores em escala real e também em pesquisas com escassos recursos financeiros disponíveis, desde que respeitada a faixa de vazão adequada.

5 AGRADECIMENTOS

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) - Código de financiamento 001, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia ETEs Sustentáveis (INCT ETEs Sustentáveis).

6 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Todos os autores contribuíram de forma igualitária.

7 REFERÊNCIAS

- BENITO MARTIN, P.C.; SCHLIENZ, M.; GREGER, M. Production of bio-hydrogen and methane during semi-continuous digestion of maize silage in a two-stage system. **International Journal of Hydrogen Energy**, v.42, p.5768-5779. 2017.
- BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. **Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto**. Brasília: Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ), 2015.
- BRASIL. Agência Nacional de Águas/Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Atlas Esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas**. Brasília: ANA, 2017.
- CADENA PEREDA, R.O.; RIVERA MUNÓZ, E.M.; HERRERA RUIZ, G. Automatic volumetric gas flow meter for monitoring biogas production from laboratory-scale anaerobic digester. **Sensors and Actuators B**, v.147, p.10-14, 2010.
- CASCETTA, F.; VIGO, P. **Sensor for Measuring Flow, Sensors a Comprehensive Survey — Mechanical Sensors**, Bau-De Rooij-Kloeck, 1994, pp. 373-436.
- FERREIRA, B. O. **Avaliação de um sistema de metanização de resíduos alimentares com vistas ao aproveitamento energético do biogás**. Dissertação (mestrado) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.
- FERREIRA, T.B.; REGO, G.C.; RAMOS, L.R.; SOARES, L.A.; SAKAMOTO, I.K.; OLIVEIRA, L.L.; VARESCHE, M.B.A.; SILVA, E.L. Selection of metabolic pathways for continuous hydrogen production under thermophilic and mesophilic temperature conditions in anaerobic fluidized bed reactors. **International Journal of Hydrogen Energy**, v.43, p.18908-18917, 2018.
- GANESH, R.; TORRIJOS, M.; SOUSBIE, P.; LUGARDON, A.; STEYER, J.P.; DELGENES, J.P. Single-phase and two-phase anaerobic digestion of fruit and vegetable waste: Comparison of start-up, reactor stability and process performance. **Waste Management**, v. 34, n. 5, p. 875-885, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.02.023>>.
- GRIMBERG, S.J.; HILDERBRANDT, D.; KINNUNEN, M.; ROGERS, S. Anaerobic digestion of food waste through the operation of a mesophilic two-phase pilot scale digester – Assessment of variable loadings on system performance. **Bioresource Technology**, v. 178, p. 226-229, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.001>>.
- LAO. Medidores de gás. [online] Disponível em: <http://www.laoindustria.com.br/images/uploads/Medidores%20de%20G%C3%A1s.pdf>. Acesso em: 17 de janeiro de 2018.
- LIU, J.; OLSSON, G.; MATTIASSON, B. A volumetric meter for monitoring of low gas flow rate from laboratory-scale biogas reactors. **Sensors and Actuators B**, v.97, p.369-372, 2004.
- MARTÍ-HERRERO, J.; SORIA-CASTELLÓN, G.; DIAZ-DE-BASURTO, A.; ALVAREZ, R.; CHEMISANA, D. Biogas from a full scale digester operated in psychrophilic conditions and fed only with fruit and vegetable waste. **Renewable Energy**, v. 133, p. 676-684, 2018.
- MARTÍNEZ-SIBAJA, A.; ALVARADO-LASSMAN, A.; ASTORGA-ZARAGOZA, C.M.; ADAM-MEDINA, M.; POSADA-GÓMEZ, R.; RODRÍGUEZ-JARQUIN, J.P. Volumetric gas meter for laboratory-scale anaerobic bioreactors. **Measurement**, v.44, p.1801-1805, 2011.
- PAUDEL, S.; KANG, Y.; YOO, Y.S.; SEO, G.T. Effect of volumetric organic loading rate (OLR) on H₂ and CH₄ production by two-stage anaerobic co-digestion of food waste and brown water. **Waste Management**, v.61, p.484-493. 2017.
- RITTER. **Drum-Type Gas Meter – Data sheet**. [online] 2011. Disponível em: <https://www.ritter.de/download/tg-3-plastic.pdf>. Acesso em: 16 de junho de 2018.
- SAMBUSITI, C.; MONLAU, F.; FICARA, E.; MUSATTI, A.; ROLLINI, M.; BARAKAT, A.; MALPEI, F. Comparison of various post-treatments for recovering methane from agricultural digestate. **Fuel Processing Technology**, v. 137, p. 359-365, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.04.028>>.
- VOELKLEIN, M. A.; O'SHEA, R.; JACOB, A.; MURPHY, J.D. Assessment of increasing loading rate on two-stage digestion of food waste. **Bioresource Technology**, v.121, p.185-192, 2017.
- WALKER, M.; ZHANG, Y.; HEAVEN, S.; BANKS, C. Potential errors in the quantitative evaluation of biogas production in anaerobic digestion processes. **Bioresource Technology**, v.100, p.6339-6346, 2009.