



QUANTIFICAÇÃO DE BIOGÁS EM REATORES ANAERÓBIOS ATRAVÉS DO MÉTODO DE DESLOCAMENTO DE VOLUME DE ÁGUA

João Girardi Neto¹, Vinicius Gouveia dos Santos², Luiz Gustavo Andreguetto³, Gustavo Henrique Lange⁴, Joel Dias da Silva⁵, José Alexandre Borges Valle⁶ e Ivone Gohr Pinheiro⁷

Resumo: Ao pesquisar por métodos e procedimentos para a quantificação de biogás em reatores anaeróbios que contemplassem pequenos volumes, observou-se que, na maioria das vezes, os pesquisadores desenvolveram metodologias próprias. A construção de medidores de volume de biogás produzido em reatores anaeróbios, de fácil reprodução e que pudessem registrar até mesmo pequenos volumes foi, então, o objetivo deste trabalho. Trata-se de um sistema de vasos comunicantes ligados com um sifão que permite os deslocamentos do volume de água pelo biogás em forma de ciclos que são detectados por sensores ópticos e registrados através de software desenvolvido para esta finalidade. O registro do número de ciclos de volume de água deslocado é feito de forma ininterrupta, utilizando-se materiais resistentes à corrosão. A confiabilidade do sistema foi testada através de experimentos em laboratório, cujos resultados foram submetidos a testes estatísticos, a fim de determinar o volume de água a ser utilizado nos medidores. Para os reatores deste estudo de, que possuem volume de 200 e 2000 L, o volume de água que foi utilizado no sistema de vasos comunicantes foi de 500 e 1400 mL, respectivamente.

Palavras-chave: Biorreator. Produção de biogás. Quantificação.

1 Introdução

O processo de digestão anaeróbia como tratamento biológico de resíduos sólidos orgânicos tem despertado o interesse da comunidade científica e das autoridades municipais, principalmente no que diz respeito à produção de biogás a partir da degradação biológica de biomassas disponíveis localmente como resíduos industriais, resíduos agrícolas, resíduos sólidos urbanos e águas residuais (NGES et al., 2012; PICANÇO et al., 2003; FONSECA et al., 2006; KAO et al., 2012). Contudo, para que se conduza apropriadamente o processo de digestão anaeróbia são necessárias estratégias de monitoramento e controle. Os indicadores mais utilizados para o acompanhamento do processo são, pH,

alcalinidade, ácidos graxos voláteis e produção e composição do biogás (AGV) (HAWKES et al., 1993).

Embora todo o processo seja complexo e possa ser perturbado por dificuldades que afetem qualquer uma das reações envolvidas, a produção de biogás é o indicador mais comumente utilizado, tanto por estar relacionado à degradação do substrato como por seu valor econômico, uma vez que esboça o desempenho global do processo (VEIGA et al., 1990; WALKER et al., 2009; RAPOSO et al., 2011).

Instrumentos para medição do biogás produzido em digestores anaeróbios, por exemplo, podem ser basicamente classificados em dois tipos, equipamento industrial – adequadamente projetado para medir altas taxas de fluxo de gás, e

¹ E-mail: jgirardineto@hotmail.com

² E-mail: vinicius.gouveia.santos@hotmail.com

³ E-mail: luiz.andreguetto@gmail.com

⁴ E-mail: mrguga93@gmail.com,

⁵ E-mail: dias_joel@hotmail.com,

FURB - Universidade Regional de Blumenau, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. CAMPUS II - Complexo Tecnológico. Rua São Paulo, 3250 – Itoupava Seca. CEP 89.030-000 - BLUMENAU - SC, Brasil.

⁶ E-mail: alex@furb.br

⁷ E-mail: ivonegp@furb.br

equipamento para medições em laboratório, capaz de medir com precisão o volume de gás com escala de medição variando de mililitros a litros (VEIGA et al., 1990).

A medição de pequenos volumes de gás em digestores anaeróbios não tem sido uma tarefa fácil. Em busca de soluções, dispositivos de medição com base no princípio de deslocamento de líquidos têm sido desenvolvidos para volumes menores de biogás produzido, porém, nem todos podem ser facilmente utilizados para obter o volume preciso do gás ou ainda, fazer medições on-line (MARTINEZ-SIBAJA et al., 2011).

Veiga et al. (1990) salientaram que, pela limitada opção em instrumentos de medição, muitos pesquisadores foram levados a desenvolver seus próprios métodos para atender às suas demandas. Contudo, um medidor em escala de laboratório apresentará maior exigência no detalhamento do projeto físico e eletrônico, quando comparado com reatores em escala convencional, pela dificuldade na mensuração de pequenos volumes de gás (CADENA PEREDA; RIVERA MUÑOZ; HERRERA RUIZ; 2010).

A literatura apresenta experiências nesse sentido. Pesquisadores como Walker et al. (2009) e Veiga et al. (1990) descreveram diferentes medidores de vazão para gases, destacando-se (1) medidores contínuos, semi-contínuos e por bateladas; (2) medidores contínuos, basicamente semelhantes aos medidores industriais, cuja passagem do gás se dá através de um tubo ativando um contador mecânico; (3) medidores por bateladas, de deslocamento de água convencional, necessitando de reposição manual e gravação periódica do volume de água deslocado pelo gás.

Já Moletta e Albagnac (1982) projetaram um dispositivo composto por dois frascos comunicantes cujo princípio de funcionamento se constitui no deslocamento da água do primeiro para o segundo frasco pela passagem do biogás que no segundo frasco entrará em contato com a atmosfera. O volume de medição deste deslocamento é fixo, com sistema de detecção de nível por contatos elétricos. O sistema mostra o volume total gerado por dia, mas não as dinâmicas da produção de biogás (CADENA PEREDA; RIVERA MUÑOZ; HERRERA RUIZ, 2010).

Segundo Veiga et al. (1990), uma das principais falhas dos medidores semi-contínuos com eletroválvulas são os

sensores, que se não forem feitos de material resistente, são propensos à corrosão, seja pela presença de H₂S no gás ou pela solução salina, que acidentalmente entra em contato com a válvula. Para evitar este problema, Mata-Alvarez et al. (1986) projetaram um instrumento com uma válvula hidráulica semelhante ao utilizado por Merkens (1962) e, utilizaram como sensores, um sistema de células fotoelétricas, que detecta a luz transmitida através de líquido colorido. Outra concepção em que uma válvula elétrica foi utilizada é descrita no trabalho de Beaubien et al. (1988), no qual a produção de gás foi medida por um transdutor de pressão simples e é possível se encontrar detalhes de como programar um sistema de aquisição e gravação automática de dados de produção de gás.

Desta forma, o objetivo deste trabalho foi a construção de um medidor de volume de biogás de baixo custo com qualidade confiável.

2 Material e métodos

Foram construídos dois sistemas de medida de volume para atender a necessidade de mensurar a quantidade de gás produzida em dois reatores de digestão anaeróbia com produções distintas de gás. Um dos reatores possui capacidade de 200 L, com produção média diária prevista de geração de biogás de aproximadamente 80 L, enquanto para o reator com capacidade de 2000 L a perspectiva de geração de biogás pode atingir 900 L. Para o primeiro reator denominou-se o medidor de volume de gás de M500 e para o segundo, de M1400.

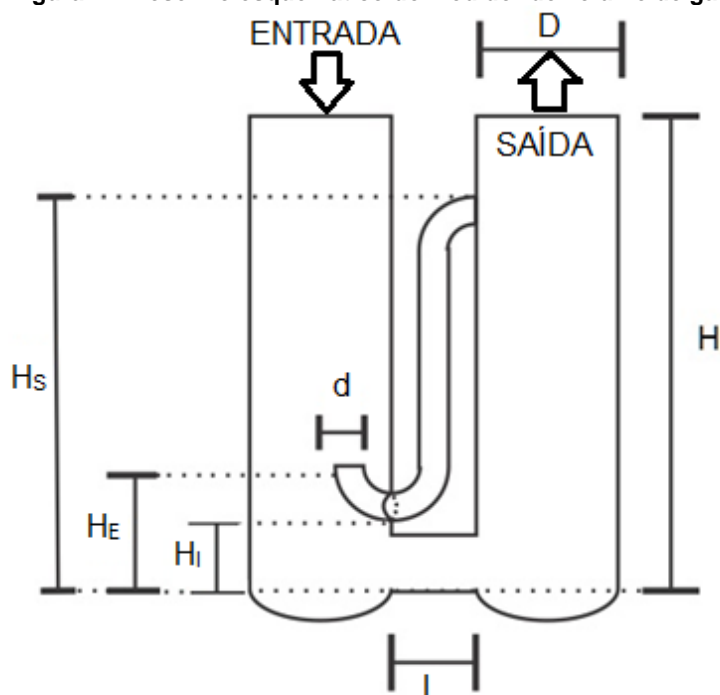
A concepção do projeto contempla dois vasos comunicantes com uma parte eletrônica de aquisição dos dados. Os vasos comunicantes permitem mensurar o volume de biogás produzido pelo deslocamento de água conforme Veiga et al. (1990), Walker et al. (2009), Martinez-Sibaja et al. (2011), e são tubos na forma de “U”, ligados por um sifão que permite a recirculação da água no sistema. Este formato em “U” com recirculação de água possibilita o aproveitamento de água e necessidade de reposição quase nula, diferentemente de outros sistemas que necessitam de reposição periódica de água, pois deslocam o volume de água para fora do sistema, a fim de ser medido em um recipiente graduado. Entretanto, mesmo nos sistemas com

recirculação de água, uma pequena adição de água é requerida, referente ao volume evaporado do sistema.

Devido à baixa solubilidade do metano (MUHA et al., 2012) na água, e ao pequeno volume de trabalho, a saturação dos gases no líquido ocorre em um curto espaço de tempo, em função apenas da produção de gás nos sistemas de digestão anaeróbia, não interferindo na leitura de medição.

Os medidores de volume de biogás M500 e M1400 possuem altura (H) de 21,5 e 43 cm, diâmetro interno dos tubos (D) de 6 e 7 cm, altura superior do sifão (H_s) de 18,5 e 33 cm, espaçamento entre os tubos (L) de 3,5 e 5 cm, altura na entrada do sifão (H_E) de 7 e 11,5 cm e altura inferior do sifão (H_i) de 3,5 e 5,5 cm, respectivamente (Figura 1).

Figura 1 – Desenho esquemático do medidor de volume de gás



H =altura, D =diâmetro, H_s =altura superior do sifão, L =espaçamento entre os tubos, H_E = altura na entrada do sifão, d =diâmetro do sifão, H_i =altura inferior do sifão
Fonte: Autores (2013)

Propôs-se uma configuração eletrônica que pudesse registrar o número de ciclos de volume de água deslocado de modo ininterrupto, com utilização de materiais resistentes à corrosão, optando-se por sensores ópticos (transmissor e receptor) posicionados externamente, e sem contato com agentes oxidantes. Os transmissores utilizados para este caso são de LED que emitem feixes luminosos, infravermelho, e os receptores são do tipo foto-transistores compatíveis ao infravermelho, que registram os ciclos quando o sinal for interrompido.

Os medidores encontram-se instalados dentro de recipientes que bloqueiam a luz solar, a fim de impedir a interferência no sinal dos sensores transmissores.

3 Resultados e discussão

A construção dos medidores baseou-se na metodologia proposta pelos pesquisadores Karthik Rajendran, Solmaz Aslanzadeh, Mohammad J. Taherzadeh (2013), acrescida de um sistema automático de aquisição de dados.

3.1 Construção dos medidores de volume de gás

A construção dos medidores foi realizada com dois recipientes de vidro (Figura 2), e dois controladores eletrônicos (Figura 3).

Figura 2 – Fotos dos medidores M500 (à esquerda) e M1400 (à direita)



Fonte: Autores (2013)

O software de simulação e projetos em circuitos impressos, Proteus Design Suite 8.0 (LABCENTER ELECTRONICS LTDA, 2013), foi utilizado para elaboração e construção do *layout* na placa, construindo-se a base do controlador eletrônico. Em seguida foi realizada sua impressão em uma folha couchê em impressora a laser. Com

uma chapa quente, o layout foi transferido para uma placa de fenolite, mergulhada em ácido perclorato de ferro para a gravação do layout na placa. Depois deste procedimento, com os lugares demarcados, foram realizados furos nas placas para encaixe e fixação dos diferentes componentes do sistema (Figura 3).

Figura 3 – Controlador digital



1- Transformador, 2- capacitor, 3- regulador de tensão, 4- display LCD, 5- conectores, 6- lâmpada de LED, 7- CI LM555, 8- PIC 16F877, 9- conector de hardware, 10- cristal oscilador, 11- botões de configuração.

Fonte: Autores (2013)

Além do projeto eletrônico físico desenvolvido para estas funções específicas, também foi desenvolvido um sistema de microcontrolador com o software “pic c” em

ccs, para que o pic 16F877a pudesse receber os dados, tratá-los e exibi-los em tela de acordo com a necessidade do usuário. Pode-se observar os seguintes

elementos da placa numerados, sendo o componente 1 o transformador, que abaixa a tensão da rede elétrica de 220 volts AC para a tensão de trabalho da placa de 6 volts AC e isola o sistema para não dar choque. O componente 2 é um capacitor que estabiliza a tensão na saída da ponte retificadora, sendo formada por quatro diodos, logo abaixo dele na figura. A ponte retificadora transforma os 6 volts AC em 6 volts CC. O próximo componente (3) é o LM7805, regulador de tensão. Nesse circuito está sendo utilizado para receber os 6 volts CC que não estão 100% linear e transformá-lo em 5 volts CC linear, sem oscilação. Este componente é necessário para evitar que o PIC (componente 11) venha a travar. O componente 4 é um display LCD alfanumérico de 16x2, utilizado como interface do circuito com o usuário. Os componentes 5 são os conectores que interligam o circuito eletrônico com os sensores ópticos do sistema físico. O componente 6 é uma lâmpada de LED que auxilia no estado do sensor, tornando a calibração mais fácil. O componente 7 é o CI LM555 que transforma o sinal analógico do sensor em um sinal digital para que o PIC possa compreendê-lo. O componente 8, PIC 16F877a é um dos mais importantes, sendo o cérebro da placa, ele interpreta os dados de entrada e os mostra no display. Neste componente o software é armazenado, e pode ser atualizado. O componente 9 é um conector para futura expansão de hardware. O componente 10 é um cristal oscilador de 4 MHz, que dá a velocidade ao processador do PIC. E por fim os componentes 11 são botões de configuração usados pelo usuário.

3.2 Calibração do sistema

A calibração dos sistemas de medição iniciou-se com a determinação de volumes mínimos de água nos recipientes que pudessem gerar um ciclo, ou seja, quando a pressão exercida pelo gás no primeiro tubo desloca a coluna de água até a altura inferior do sifão (H_1), permitindo que o gás escape pelo tubo que está em contato com a pressão atmosférica (Figura 1). No primeiro ciclo o gás necessita deslocar a água do primeiro vaso até a parte inferior do sifão, para que os gases possam romper a pressão desta coluna de água e serem liberados no segundo vaso. A primeira medição foi desconsiderada devido ao volume de ar atmosférico inicialmente

existente. Os resultados obtidos são comparados somente a partir do segundo ciclo, pois a água retorna até a altura próxima a entrada do sifão, impedindo a passagem do gás para o segundo tubo.

Após os volumes mínimos determinados (400 e 800 mL para os reatores de 200 e 2000 L, respectivamente) iniciou-se a calibração, com intervalos de volume de 50 mL. O deslocamento da água nos equipamentos (Figura 4) foi realizado com injeção de ar atmosférico a uma velocidade compreendida entre 2 e 2,4 mLs⁻¹ por meio de uma seringa graduada descartável de 60 mL (Figura 4). Foram realizadas 20 repetições para cada volume testado, com aferições volumétricas em provetas de 50 mL.

Figura 4 – Calibração do medidor de gás



Fonte: Autores (2013)

No sistema de medição menor, o M500, o volume mínimo de água inserido no sistema no primeiro ciclo foi de 400 mL, tendo sido necessário injetar um volume de ar atmosférico em torno de 15 mL para se deslocar o volume de água (Tabela 1). No intervalo utilizado de 450 até 600 mL de água, o volume de ar atmosférico girou em torno de 112 mL. As medições foram realizadas até 600 mL, pois com este volume a água deslocada ultrapassava a parte superior (H_2) no segundo vaso.

No sistema de medição maior, o M1400, o volume mínimo de água determinado foi de 800 mL, quando o volume de ar atmosférico para causar um ciclo ficou em torno de 30 mL. Para as demais medições compreendidas entre 850 e 1050 mL, o volume de ar ficou por volta de 30 mL. Já para um volume de água inserido no tubo de entrada compreendido entre 1100 mL e

REA – Revista de *estudos ambientais* (Online)
v.16, n. 1, p.45-53, jan./jun. 2014

1600 mL, o volume de ar registrado saltou para próximo de 280 mL (Tabela 2). As medições foram realizadas até 1600 mL, pois com este volume a água deslocada ultrapassa a parte superior do sifão (H_s) no segundo vaso.

Após calibração, os dados obtidos passaram por análise estatística com o software Statistica 7 da StatSoft.

A análise de variância – ANOVA -, com nível de confiança de 95% ($p < 0,05$), foi aplicada aos dois medidores, seguida do teste de Tukey para comparação entre

volumes aplicados, tendo em vista a análise de diferenças estatisticamente significativas (Tabelas 1 e 2).

No teste de Tukey para M500, a média dos volumes de ar injetado para deslocar os volumes de água de 450 e 500 mL não apresentou diferença estatística (Tabela 1), e apresentou baixa variância. As médias dos volumes de ar injetado para deslocar os outros volumes de água aplicados já apresentam diferença estatística entre si.

Tabela 1 – Determinação dos volumes de trabalho para o medidor 500 mL (M500), para 95% de confiança

Volume de água aplicado (mL)	Média de volume de ar injetado \pm DP (mL)	Tukey	CV (%)	p
400	15 \pm 4	a	28	<0,05
450	112 \pm 3	b	3	
500	112 \pm 1	b	1	
550	117 \pm 1	c	1	
600	107 \pm 1	d	1	

Fonte: Autores (2013)

Para o medidor M1400, o teste de Tukey identificou seis grupos distintos (Tabela 2). Os grupos “c”, “d”, “e” e “f” apresentam um coeficiente de variação baixo quando

comparados a “a” e “b”. Contudo, o grupo de maior média de volume de ar injetado foi o grupo “f”, seguido dos grupos “e” e “d”.

Tabela 2 – Determinação do volume de trabalho para o medidor 1400 mL (M1400), para 95% de confiança.

Volume de água aplicado (mL)	Média de volume de ar injetado \pm DP (mL)	Tukey	CV(%)	P
800	24 \pm 3	a	12	<0,05
850	31 \pm 4	b	14	
900	21 \pm 5	a	21	
950	28 \pm 5	b	18	
1000	20 \pm 4	a	20	
1050	35 \pm 54	a	156	
1100	267 \pm 4	c	2	
1150	275 \pm 3	d	1	
1200	280 \pm 2	e	1	
1250	283 \pm 3	e	1	
1300	288 \pm 3	f	1	
1350	290 \pm 4	f	1	
1400	292 \pm 3	f	1	
1450	288 \pm 3	f	1	
1500	273 \pm 3	d	1	
1550	274 \pm 4	d	1	
1600	276 \pm 3	d	1	

Fonte: Autores (2013)

REA – Revista de *estudos ambientais* (Online)
v.16, n. 1, p.45-53, jan./jun. 2014

Observa-se na Tabela 2 um volume de água aplicado – 1050 mL – com desvio padrão e coeficiente de variação maiores que os outros valores. Esta situação corresponde a um ponto de transição entre os volumes de água para se gerar um ciclo que deixam o nível de água abaixo da entrada do sifão (d) (Figura 1) e os volumes de água que geram um nível de água que cobre a entrada do sifão. O nível de água para os volumes de 800 a 1000 mL permaneceram abaixo da entrada do sifão, já para os volumes de água compreendidos entre 1100 e 1600 mL o nível de água se posiciona acima da entrada do sifão, tendo sido possível observar a reposição de água do primeiro vaso.

O volume de água aplicado de 1050 mL se caracterizou como ponto de transição que separa os volumes em dois grupos, de menor volume de ar passando pelo sifão (de

16 a 36 mL) e de maior volume de ar passando pelo sifão (de 263 a 295 mL).

Observadas as diferenças significativas das médias de volumes de ar injetado, e levando-se em conta o objetivo de se escolher o maior volume de ar injetado para otimizar a quantificação média esperada de 80 e 900 L para o reator de 200 e 2000 L, respectivamente, optou-se por utilizar o volume de água de 500 mL no primeiro medidor e 1400 mL no segundo medidor.

Uma vez calibrados, os medidores de 500 mL (M500) e de 1400 mL (M1400) foram instalados nos reatores de digestão anaeróbia de 200 L e 2000 L, respectivamente (Figura 5). Eles funcionaram adequadamente registrando o volume diário de biogás produzido nos dois reatores durante os experimentos que duraram 225 dias.

Figura 5 – Biorreatores com medidores de vazão (M500 e M1400)



Fonte: Autores (2013)

4 Conclusão

A construção de medidores de vazão de gás para sistemas de digestão anaeróbia em escala laboratorial apresentou-se eficaz e foi realizada com sucesso. Tanto os vasos comunicantes que armazenam o volume de trabalho quanto a parte eletrônica, foram estudados e construídos de maneira que podem ser reproduzidos sem grandes dificuldades.

As dimensões dos vasos comunicantes foram determinadas levando-se em conta o volume de água a ser deslocado e a pressão necessária proveniente do biogás do reator para causar

este deslocamento. O registro automatizado do volume de biogás produzido foi realizado adequadamente.

Pelo fato de a disponibilidade comercial de medidores de volume de gás ser voltada para grandes volumes de gás, o desenvolvimento deste equipamento pode contribuir para outras pesquisas que apresentarem esta necessidade.

Este dispositivo demonstrou-se como uma ferramenta útil para quantificar a produção de biogás no processo de digestão anaeróbia em pequena escala e poderá servir em processos de outras áreas de pesquisa.

5 Biogas quantification in anaerobic reactor based on the method of water displacement volume

Abstract: *When searching for methods and procedures for measuring biogas in anaerobic reactors that addressed small volumes, it was observed that, in most cases, the researchers developed their own methodologies. The construction of volume meters for quantify the biogas produced in anaerobic reactors, easy to reproduce and that could register even small volumes was then the aim of this work. It is a system of communicating vessels joined by a siphon which allows the displacement of the water volume by the biogas in the form of cycles that are detected by optical sensors and recorded through a software developed for this purpose. The record of the number of cycles of displaced water volume is done continuously, using materials resistant to corrosion. The reliability of the system was tested by laboratory experiments and the results were submitted to statistical analysis in order to determine the volume of water to be used in meters. To the reactors in this study, having volume of 200 and 2000 L, the volume of water that was used in the system of communicating vessels was 500 and 1400 mL, respectively.*

Keywords: Bioreactor. Biogas. Quantification.

6 Referências

- BEAUBIEN, A.; JOLICOEUR, C.; ALARY, J. F. Automated high sensitivity gas metering system for biological processes. *Biotechnol Bioengng*. V. 32, p. 105-109; 1988.
- CADENA PEREDA, R.O.; M. RIVERA MUÑOZ, E. M.; HERRERA RUIZ, G. Automatic volumetric gas flow meter for monitoring biogas production from laboratory-scale anaerobic digester. *Sensor and Actuators B: Chemical*, V. 147, No. 1, p. 10-14; 2010.
- FONSECA, J. C. L.; SILVA, M. R. A.; BAUTIZ, I. R.; NOGUEIRA, R. F. P.; MARCHI, M. R. R. Avaliação da confiabilidade analítica das determinações de carbono orgânico total (COT). *Eclética Química*, v. 31, p. 47-52, 2006.
- HAWKES, F. R.; GUWY, A. J.; ROZZI, A. G.; HAWKES, D. L. A new instrument for online measurement of bicarbonate alkalinity. *Wat. Res*. V. 27, p. 167-170; 1993.
- KAO, C.; CHIU, S.; HUANG, T.; DAI, L.; HSU, L.; LIN, C. Ability of a mutant strain of the microalga *Chlorella* sp. to capture carbon dioxide for biogas upgrading. *Applied Energy*, v. 93, p. 176-183, 2012.
- 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.
- LABCENTER ELECTRONICS LTDA. Software Proteus Design Suite 8.0. 2013.
- MATA-ALVAREZ, J.; MARTINEZ-VITURTIA, A.; TORRES, R. A simple device to measure biogas production in laboratory scale digesters. *Biotechnology letters*, V. 8, No. 10, p. 719-720; 1986.
- MOLETTA, R.; ALBAGNAC, G. A gas meter for low rates of flow: application to the methane fermentation. *Biotechnology letters*, V. 4, No. 5, p. 319-322; 1982.
- MUHA, I.; GRILLO, A.; HEISIG, M.; SCHONBERG, M. LINKE, B.; WITTUM, G. Mathematical modeling of process liquid flow and acetoclastic methanogenesis under mesophilic conditions in a two-phase biogas reactor. *Bioresource Technology*. V. 106, p. 1-9, 2012.
- NGES, I. A.; ESCOBAR, F.; FU, X.; BJÖRNSSON, L. Benefits of supplementing na industrial waste anaerobic digester with energy crops for increased biogas production. *Waste Management*. V. 32, No. 1, p. 53-59; 2012.
- PICANÇO, A. P.; SALGADO, M. T.; SOUTO, G. D. de B.; POVINELLI, J. Digestão anaeróbia e resíduos sólidos urbanos (RSU) em sistemas de batelada uma e duas fases. *ABES*, p. 1-6, 2003.
- RAPOSO, F.; DE LA RUBIA, M.A.; FERNÁNDEZ-CEGRÍ, V.; BORJA, R. Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: An overview relating to methane yields and experimental procedures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 16, No. 1, p. 861-877; 2011.
- VEIGA, M. C.; SOTO, M.; MENDEZ, R.; LEMA, J. M. A new device for measurement and control of gas production by bench scale anaerobic digesters. *Water research*, V. 24, No. 12, p. 1551-1554; 1990.
- WALKER, M.; ZHANG, Y.; HEAVEN, S.; BANKS, C. Potential errors in the quantitative evaluation of biogas production in anaerobic digestion.

REA – Revista de *estudos ambientais* (Online)
v.16, n. 1, p.45-53, jan./jun. 2014

Bioresource Technology, V. 100, No. 24, p. 6339-6346; 2009.

7 Agradecimentos

A FAPESC/CAPES pelas bolsas de stricto sensu, ao programa de pós-graduação

em engenharia ambiental e departamento de engenharia elétrica da FURB, Fundação Universidade Regional de Blumenau. Ao professor doutor Mohammad J. Taherzadeh e aos doutorandos Karthik Rajendran e Solmaz Aslanzadeh.