



ESTUDO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA DE ESTERCO BOVINO EM UM BIODIGESTOR

Regina M. Barros¹, Geraldo L. Tiago Filho²,
Yone D. S. Nascimento³, Érika Gushiken⁴, Herlane C. Calheiros⁵,
Fernando G. B. da Silva⁶, Ângelo Stano Júnior⁷

RESUMO

Em áreas rurais são produzidos a cada dia, grandes volumes de dejetos de animais em seus sistemas de confinamento de bovinos leiteiros. Neste sentido, os biodigestores representam alternativa atraente para tratamento desta matéria orgânica e conversão em biogás e lodo, respectivamente aplicáveis como fonte energética e biofertilizante. Desta forma, o objetivo do presente estudo foi avaliar a produção de biogás em um biodigestor indiano implantado no Parque de Alternativas Energéticas e Desenvolvimento Auto-sustentável (PAEDA), área rural do município de Itajubá-MG, utilizando-se, como substrato, dejetos de bovinos. A produção de gás foi mensurada por meio do uso de um gasômetro em duas etapas: a primeira etapa entre Setembro e Outubro de 2007 e a segunda etapa, entre 1 de setembro a 17 de outubro de 2008 (após a necessidade de uma nova partida). A produção acumulada observada alcançou o valor de 5,025 m³,

1 Engenheira Civil, Doutora e Mestre pelo PPG-SHS/EESC/USP, Profa. Dra. IRN/ UNIFEI, Av. BPS, 1303, Bairro Pinheirinho, Itajubá-MG, CEP: 37500-903, tel.: (35) 36291224, fax: (35) 36291265, mambeli@unifei.edu.br

2 Engenheiro Mecânico, Doutor em Hidráulica pela USP e Mestre em Engenharia Mecânica na área de Máquinas de Fluxo pela UNIFEI, Prof. Dr. - IRN/ UNIFEI, Av. BPS, 1303, Itajubá-MG, CEP: 37500-903, tel.: (35) 36291454, fax: (35) 36291265, tiago@unifei.edu.br

3 Bióloga, especialista pelo CEMARH - IRN/UNIFEI, Av. BPS,1303, Itajubá - MG, CEP:37500-903, tel.:(35)36291224, fax: (35) 36291265, yonedomingues@gmail.com

4 Graduanda em Engenharia Ambiental pelo IRN/UNIFEI. E-mail: gushiken86@gmail.com

5 Engenheira Civil, Doutora e Mestre pelo PPG-SHS/EESC/USP, Profa. Dra. - IRN/ UNIFEI, Av. BPS, 1303, Itajubá - MG, CEP:37500-903,tel.:(35)36291460, fax: (35) 36291265, h2c@unifei.edu.br

6 Engenheiro Civil, Doutor e Mestre pelo PPG-SHS/EESC/USP, Prof. Dr. - IRN/ UNIFEI, Av. BPS, 1303, Itajubá-MG, CEP:37500-903, tel.:(35)36291485, fax: (35) 36291265, fernandobraga@unifei.edu.br

7 Engenheiro Elétrico, Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá, Operação Manutenção CERPCH/IRN & / UNIFEI, Av. BPS, 1303, Bairro Pinheirinho, Itajubá-MG, CEP: 37500-903, tel.: (35) 36291278, fax: (35) 36291265, stano@unifei.edu.br



com relação aos meses em questão na primeira etapa, equivalente ao uso de 9,28 botijões de gás natural liquefeito (GLP), ou ainda, de cerca de 6,4 kWh de energia elétrica. Na segunda etapa, os valores foram equivalentes à 1,92 botijões de GLP por mês ou ainda, de aproximadamente, 3,0 kWh de energia elétrica. As análises de DQO, efetuadas também na segunda etapa deste estudo, no afluente e efluente do biodigestor encontram-se bem correlacionados aos encontrados na literatura e a redução desta variável alcançou o valor de até 87,0%. Verificou-se um acréscimo na porcentagem de SF, como resultado da digestão anaeróbia da fração biodegradável.

Palavras-chave: biodigestão anaeróbia, dejetos de bovino, metano

ABSTRACT

Every Day in rural areas, large amounts of livestock waste are produced in the confinement systems of dairy cattle. Within this context, biodigesters represent an attractive alternative for the treatment of this organic matter and its conversion into biogas and moss, both of which can be used as energy sources and biofertilizers. This way, the goal of this study was to assess the production of biogas using dairy cattle waste in an Indian biodigester implemented at PAEDA (a park aiming at energy alternatives and sustainable development) in the countryside of the city of Itajubá. The production of gas was measured by using a gas meter in two stages: the first stage between September and October of 2007 and the second stage, between September 1 and October 17 of 2008 (after the need of a new departure). The accumulated production that was observed reached a value of 5.025 m³, in relation to the two aforementioned months in the first stage. This would be equivalent to using 9.28 tanks of Liquefied Petroleum Gas (LPG) or still, about 6.4 kWh of electricity. In the second stage, these values would be equivalent to using 1.92 tanks of GLP a month, or still, of approximately, 3.0 kWh of electricity. The analyses of DOQ, also made in the second stage of this study, in the affluent and effluent of the biodigester they are well correlated to the found in the literature and the reduction of this variable reached the value of up to 87,0%. An increment was verified in the percentage of Fixed Solids (FS), as a result of the anaerobic digestion of the biodegradable fraction.

Keywords: anaerobic biodigestion, livestock, methane



1. INTRODUÇÃO

A ampliação da atividade agropecuária no Brasil, somado ao desenvolvimento tecnológico nos sistemas de produção, resultam em aumento na geração de dejetos, os quais são, por vezes, lançados em corpos d'água superficiais. Eventualmente, os esterco frescos são aplicados ao solo previamente à sua estabilização.

Os esterco não estabilizados ou frescos são passíveis de esquentar e inibir a germinação de sementes e o alongamento de raízes, assim como de contaminar o operador, o solo e os vegetais. (SEDIYAMA *et al.*, 2008), sobretudo em sistemas de confinamento.

Esses dejetos são compostos orgânicos com macro e micronutrientes, com alto teor energético, que proporcionam água, abrigo e temperatura, e são substratos de vários microorganismos, micro e macrovetores de alta importância sanitária, como nicho ecológico. Diversos autores vêm estudando as características de dejetos de animais previamente à digestão anaeróbia (HANSEN *et al.*, 1999; NOGUEIRA, 1992), assim como após tal digestão (CASTRILLÓN *et al.*, 2002).

O material fecal bovino possui os seguintes valores médios, a saber: pH de 8,0; %H₂O de 80; (Sólidos Fixos)-(%) Sólidos Totais) de 10; e relação Carbono/Nitrogênio (C/N) de 11,2 (FERNANDES, 1999), esta última variável também referenciada como 25, com 1,7% _{peso seco} (NOGUEIRA, 1992), ou ainda na matéria seca (17% H₂O), como: material orgânico (49,45 dag kg⁻¹), N (2,06 dag kg⁻¹) (FERREIRA *et al.*, 2003).

Tal composição é importante para o sucesso nos processos biológicos de tratamento. Existem alguns requisitos essenciais como nutrientes, temperatura, pH, alcalinidade e ácidos voláteis, e algumas substâncias que podem representar toxicidade. O pH ótimo para a desnitrificação heterotrófica é de 7 a 8 (ALMEIDA *et al.*, 1995; BHATTACHARYA e PARKIN, 1989; CHEN *et al.*, 2008), conquanto a redução de nitrato possa ocorrer até acima de pH 11. (MAHMOOD *et al.*, 2008; LEITÃO *et al.*, 2006; PHOLAND, 1968).

A biodigestão anaeróbia é a fermentação com ausência de oxigênio de dejetos animais, plantas e resíduos sólidos (domésticos e urbanos) por meio de bactérias anaeróbias e *archaeas* metanogênicas, que sintetizam a matéria orgânica transformando-a em metano e dióxido de carbono, principais componentes do biogás. (CHERNICHARO, 1997; CASTRO e CORTEZ, 1998; CHEN *et al.*, 2008; MAHMOOD *et al.*, 2008).



O biogás obtido a partir do esterco é constituído, especialmente, por metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), gás amônia (NH_3), sulfeto de hidrogênio (H_2S) e nitrogênio (N_2).

O volume do biogás produzido por unidade de peso da matéria orgânica é variável, em função de diversos fatores, como tipo do digestor, temperatura e especialmente, tipo do material orgânico empregado.

Neste sentido, foi apresentada por Ferreira *et al.* (2003), a produtividade, em $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, de esterco bovino fresco, esterco de galinha seco e esterco de suíno fresco como, respectivamente 0,04, 0,43 e 0,35.

Diversos autores (FLORENTINO, 2003; SANTOS, 2004; VILLELA *et al.* 2007) estudaram a biodigestão anaeróbia de dejetos de animais. Souza *et al.* (2005) descreveram o potencial de biogás do esterco suíno como sendo igual a cerca de 70 l de biogás por kg de esterco fresco e Santos (2004) tal valor foi de 0,35 m^3 de biogás por m^3 de substrato de dejetos de suíno.

A produção descrita por Castro e Cortez (1998) atingiu a média de 2,5 $\text{m}^3 \text{gás} \cdot \text{d}^{-1}$, após um mês e meio da partida um biodigestor rural modelo indiano, com 10 m^3 de capacidade. O potencial de produção de biogás por kg de estrume alcançado no experimento de Amaral *et al.* (2004), foi em média, de 0,025 m^3 . A produção média diária de biogás encontrada foi de 31,5 m^3 , equivalente a 0,63 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ do biodigestor. (ANGONESE *et al.*, 2006).

Há ainda que se considerar como benefícios, o poder calorífico do biogás obtido. Nesse sentido, Angonese *et al.* (2006) mencionaram considerável valor energético na produção de dejetos (cerca de 30% da energia de saída total do sistema, com eficiência energética de 0,38 ($J_{\text{saída}}/J_{\text{entrada}}$). Nogueira (1992), descreveu que a 15°C e 150 mm de coluna d'água de pressão, o poder calorífico pode ser diretamente proporcional com o seu teor de metano (em %), com um coeficiente de proporcionalidade de 90,67.

Com relação à produção de biofertilizante de biodigestores, Villela *et al.* (2007) avaliaram a produção dos mesmos por meio do uso de soluções nutritivas constituídas pela parte líquida do efluente de biodigestor (biofertilizante), em substituição a adubos minerais hidrossolúveis.

A média de redução do número mais provável (NMP) obtida por Amaral *et al.* (2004) foi 99 % em todos os TRH estudados e, desta forma, foi possível aos autores (*op. cit.*) concluir que vinte dias de TRH seriam suficientes para promoção de expressivas reduções ($P < 0,05$) nas bactérias do grupo coliforme.



Neste contexto e, considerando que a necessidade de avaliação da produção de biogás em um município com grande área rural, como Itajubá-MG, no presente estudo objetiva-se avaliar o desempenho do biodigestor do Parque de Alternativas Energéticas e Desenvolvimento Auto Sustentável (PAEDA), localizado na área rural do município mencionado.

O biodigestor foi alimentado com uma mistura de dejetos de bovinos e água, com tempo de detenção hidráulica (TDH) de 07 dias, sob temperatura ambiente. Este trabalho apontou também para a comparação entre a produção do biogás, prognosticado teoricamente por Canela (2006), e a gerada e verificada *in loco* no presente estudo, entre os meses de setembro e outubro de 2007.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada no Parque de Alternativas Energéticas e Desenvolvimento Auto Sustentável (PAEDA), que abriga a Usina Luiz Dias, de propriedade da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), cedida mediante convênio com a Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI).

O PAEDA está localizado na área rural do município de Itajubá-MG. Trata-se de uma Área Experimental do Instituto de Recursos Naturais (IRN) da UNIFEI, que tem sua operação e manutenção, a cargo do Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas (CERPCH), em função de convênio firmado com Ministério de Minas e Energia (MME).

No interior da área do PAEDA, no contexto de energias alternativas, dentre os diversos equipamentos, foi utilizado o biodigestor modelo indiano existente, cuja partida já fora anteriormente efetuada na primeira etapa, havendo a necessidade de execução de uma nova partida na segunda etapa. Um modelo de biodigestor tipo indiano (Figura 1A) e um modelo tipo chinês (Figura 1B) foram apresentados por Florentino (2003).

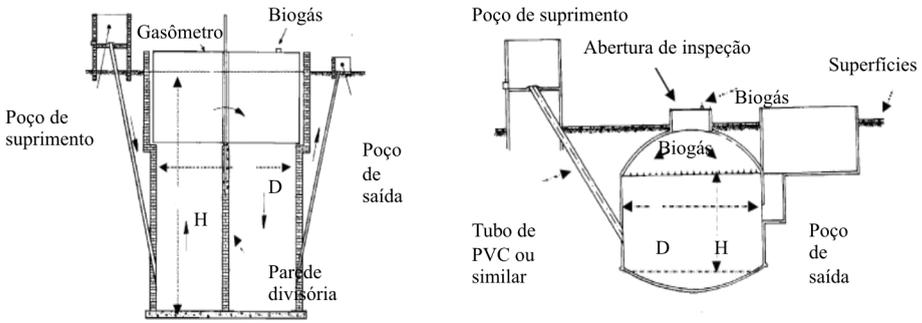


Figura 1. A. Biodigestor tipo indiano (esquerda); B. Biodigestor tipo chinês (direita). Fonte: Florentino (2003)

A representação esquemática do aparato utilizado no presente estudo encontra-se apresentado na Figura 2.

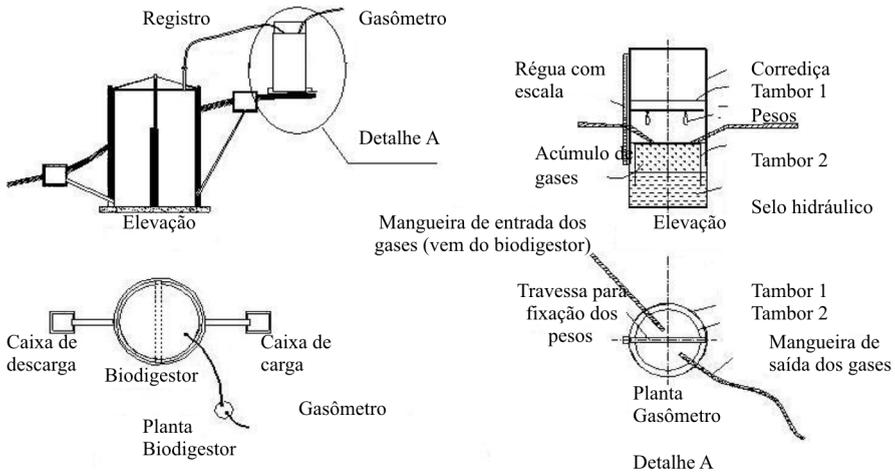


Figura 2. Disposição esquemática dos aparatos experimentais, em escala piloto e de demonstração

Conforme descrito em Canela (2006), relativamente às dimensões internas, o biodigestor utilizado no presente estudo possui diâmetro de 2,0 m e altura de 2,5 m; sobre o volume, o volume do compartimento de carga é de 7,0 m³, e o volume do gasômetro do biodigestor é de 3,0 m³ (diâmetro externo de 2,3 m e altura de 1,0 m).



Para o presente estudo, foi projetado e construído visando à coleta e armazenamento do biogás, um gasômetro externo ao biodigestor, com capacidade de $0,13 \text{ m}^3$ e as seguintes dimensões, a saber: 0,72 m de altura; 0,48 m de diâmetro.

O gasômetro foi equipado com uma régua graduada, de 0 a 50 cm, com um selo hidráulico a 0,57 m de altura. Ressalta-se que, este gasômetro foi construído para tornar mais acurada a leitura e cálculo do deslocamento de volume (no caso de um cilindro).

Com relação à metodologia volumétrica de medição do biogás, Aquino *et al.* (2007) mencionaram que a literatura reporta três metodologias muito usadas que empregam procedimentos volumétricos: medição do volume e composição do biogás; medição apenas da composição do biogás; medição direta do volume de metano. Este último fora usado no presente estudo.

Como substrato para o supracitado biodigestor modelo Indiano foram usados os dejetos sólidos de bovinos, a maior parte oriundo da própria área do PAEDA, e em menor monta, nas propriedades nas proximidades do biodigestor. A primeira etapa de coleta de dados compreendeu o período de 01 de setembro de 2007 a 31 de outubro de 2007 (leituras diárias), totalizando 60 dias. No início de 2008 houve a necessidade de limpeza do biodigestor, ocorrendo uma nova partida a partir de agosto deste mesmo ano.

A segunda etapa de coleta de dados iniciou-se em 4 de agosto de 2008, com frequência semanal. Posteriormente, quando existiu possibilidade de adquirir uma quantidade maior de esterco de proprietários circunvizinhos ao PAEDA, a recarga passou a ser realizada três vezes por semana, durante o período de 1 de setembro a 17 de outubro de 2008, permitindo, assim, que o biodigestor atingisse a sua capacidade máxima de armazenamento.

Após este período de 73 dias necessários para que o compartimento de carga estivesse completo, o reabastecimento foi realizado semanalmente, ou seja, com TRH de 7 dias. Observa-se, que as análises iniciaram-se concomitantemente à fase de partida do biodigestor, ou seja, simultaneamente ao tempo de adaptação e desenvolvimento normal dos microrganismos responsáveis pela degradação da biomassa.

Foram realizadas análises quinzenais de ST, SV, SF e DQO do afluente para que fosse possível verificar a qualidade do substrato utilizado no biodigestor. Notifica-se que, para cada amostra de sólidos foram feitas cin-



co repetições. Para a determinação de DQO foram feitas dez repetições de cada amostra, em diluição de 1:100 de amostra : água.

Na segunda etapa, quando houve início da produção de biofertilizante, foi possível realizar as análises de Sólidos Totais (ST), Sólidos Voláteis (SV), Sólidos Fixos (SF) e DQO, produzindo sete repetições para as amostras de sólidos e seis repetições para cada diluição das análises de DQO - sendo estas de 1:10, 1:50, 1:100 de amostra:água. Os valores de DBO do afluente e efluente do biodigestor também foram determinados, repetindo-se o experimento oito vezes para o afluente, em diluição 1:100, e cinco vezes para cada diluição do efluente - sendo estas de 1:50 e 1:10 de amostra:água. Notifica-se que, a metodologia utilizada seguiu os padrões internacionais, segundo *Standart Methods for examinations of Water and Wastewater*, publicado pela *American Public Health Association* (APHA, 1998).

Foi proposto, nesse estudo, conforme metodologia apresentada e recomendada por Souza e Lucas Júnior (2003) a biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos, uma diluição em proporção, em volume de quatro partes de dejetos e cinco partes de água, no afluente ao biodigestor (Figura 3A).

Conforme supracitado, o esterco utilizado na mistura da carga do biodigestor foi coletado nas instalações do PAEDA da (IRN/UNIFEI) e nas propriedades localizadas nos arredores. A biomassa fermentada, rica em material orgânico (também conhecida como biofertilizante) efluente ao biodigestor apresentou-se sob a forma líquida (Figura 3B), a cada carga de afluente.

Ressalta-se que o local de recolhimento de esterco é muito próximo ao biodigestor. Vale salientar também que, esse procedimento foi repetido a cada carga do biodigestor, operado em batelada, com um TDH de sete dias.



Figura 3. A. Carga de substrato no biodigestor modelo indiano com detalhe da consistência do substrato (direita); B. Detalhe da descarga de efluente do biodigestor (esquerda)



3. ESTIMATIVA DA VAZÃO DO BIOGÁS

A produção do biogás foi avaliada por meio do produto entre a seção horizontal do gasômetro pelo seu deslocamento, sendo a mesma corrigida em função da temperatura e pressão (Equação 1), para as condições de 1 atm e 20 °C, conforme metodologia empregada por Aquino *et al.* (2007).

$$V_0 = P_1 V_1 T_1^{-1} P_0^{-1} T_0 \quad (1)$$

Onde:

V_0 - Volume corrigido do biogás (m^3); P_0 - Pressão corrigida do biogás (mm de coluna de H_2O); T_0 - Temperatura corrigida do biogás (293,15 K); P_1 - Pressão do biogás no gasômetro (mm de coluna de H_2O); V_1 - Volume do biogás nas condições de leitura, m^3 ; T_1 - Temperatura do biogás no instante da leitura, K.

A seção horizontal do gasômetro é dada pela Equação 2 e o volume do biogás no gasômetro pela Equação 3.

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (2)$$

Onde:

A - área da seção horizontal do gasômetro (m^2); D - diâmetro da seção horizontal do gasômetro (m).

$$V = A \cdot h \quad (3)$$

V - volume do biogás (m^3); h: deslocamento aferido no gasômetro (m).

A pressão exercida no gasômetro, por meio de dois pesos de 10 kg mais o peso da estrutura totalizou 33,10 kg sobre uma área de 0,18 m^2 , pode ser calculada pela Equação 4.

$$P_1 = \frac{p_1}{A} \quad (4)$$

Onde:

P_1 - pressão exercida sobre o gasômetro ($kgf \cdot m^{-2}$); p_1 - peso total sobre a superfície do gasômetro (kg) multiplicado por 9,81 $m \cdot s^{-2}$ (dado em kgf).



Considerando que nas CNTP (0 °C e 1 atm) e pela relação 1 mol de qualquer gás ocupa 22,7 L, e utilizando-se a pressão atmosférica média para Itajubá de 1 atm, e a pressão média conferida ao gasômetro calculada pela Equação 5 (1792,59 kgf.m⁻²), resultou em fator, que multiplicado por $V_1 T_1^{-1}$, tornou possível calcular o volume corrigido de biogás.

Com a Equação 4 e de posse dos dados de temperatura, da constante dos gases (0,08206 atm.L.mol⁻¹.K⁻¹) e da pressão (Equação 5), foi possível calcular a massa específica e em seguida, correlacionar com a temperatura.

$$P_1 \cdot V = n \cdot R \cdot T \Rightarrow \rho = P_1 / R \cdot T \quad (5)$$

Onde:

N - número de moles (mol); ρ - massa específica (mol.L⁻¹).

As primeiras leituras feitas no gasômetro no mês de agosto de 2007 foram descartadas, pois o gasômetro foi locado no interior da casa de energia a uma distância de aproximadamente 60 m, proporcionando elevada perda de carga.

Desta maneira, o tempo de leitura para o gasômetro atingir a marca de 30 cm era muito elevado (cerca de 01h40 min). No início do mês de Setembro de 2007, deslocou-se o gasômetro para bem próximo ao biodigestor, e verificou-se que o tempo de leitura para atingir a marca de 30 cm reduziu-se para 20 minutos.

Objetivando-se um abaixamento ainda maior em tal tempo de leitura, foram retiradas as válvulas de saída do biogás do biodigestor para o gasômetro, fazendo-se a ligação direta. Observou-se que o tempo de leitura reduziu ainda mais (para uma média de 4 a 5 minutos). Utilizou-se nos dias de leitura no PAEDA a temperatura média de Itajubá para aplicação em cálculos.

Como definido por Canela (2006), por intermédio do equivalente em volume encerrado por um botijão, foi considerado uma produção teórica diária de biogás equivalente a 2,25 kg de GLP. Ressalta-se que a produção estimada por este autor (op. cit.) referiu-se ao mesmo biodigestor usado no presente estudo.

4. RESULTADOS

Os resultados obtidos relacionam-se com a massa específica e a estimativa da vazão do biogás no período em estudo (entre setembro e outubro de 2007).

4.1. Massa específica

O gráfico da Figura 4 apresenta os resultados da variação de massa específica em função da temperatura, assim como a massa específica média calculada.

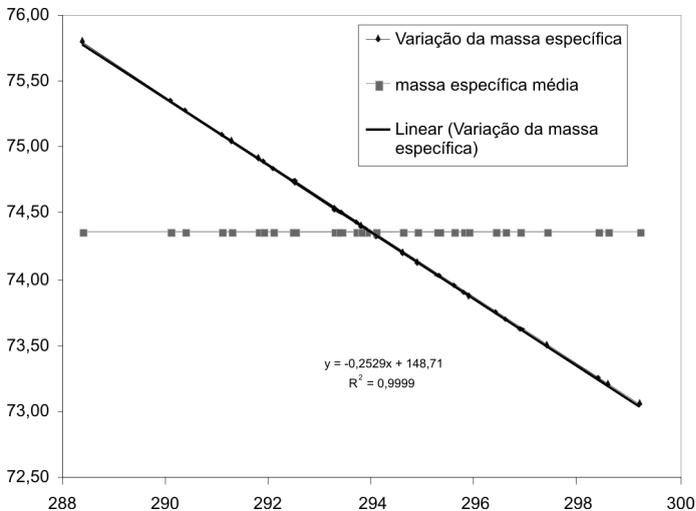


Figura 4. Variação da massa específica em função da temperatura

Observa-se do gráfico da Figura 4 que à medida que a temperatura aumentou a massa específica do biogás diminuiu. Essa variação era esperada, e descreveu-se, neste caso, que a influência da temperatura expressa em função de variação na massa específica por grau de temperatura alterado como $-0,2529$ ($\text{mol.L}^{-1}.\text{K}$), válido nos intervalos T (K) [288,4; 299,2] e massa específica (mol.L^{-1}) [73,06; 75,80].

4.2. Estimativa da vazão do biogás

Os gráficos da Figura 5 à Figura 7 apresentam gráficos sobre a produção de biogás na primeira etapa do presente estudo. O gráfico da Figura 5 apresenta a produção de biogás em função da temperatura aferida no



dia, a Figura 6 mostra a vazão acumulada de biogás durante período de observação e a Figura 7, as produções acumuladas de biogás ($m^3.d^{-1}$) em conjunto com a produção equivalente em botijão de GLP.

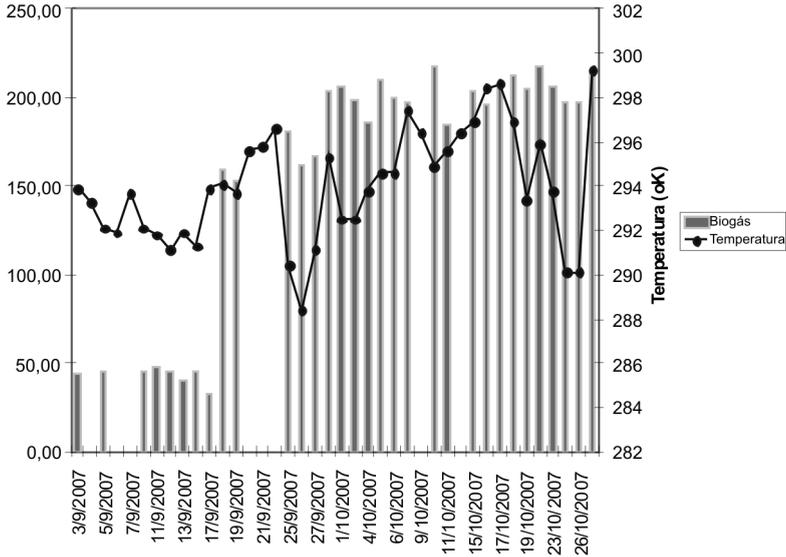


Figura 5. Produção diária de biogás observada para a primeira etapa.

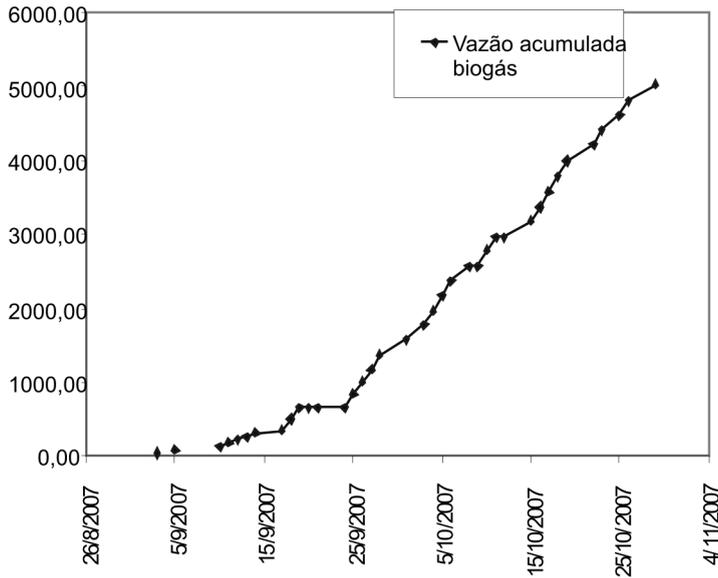


Figura 6. Vazão acumulada de biogás no período de observação durante a primeira etapa.

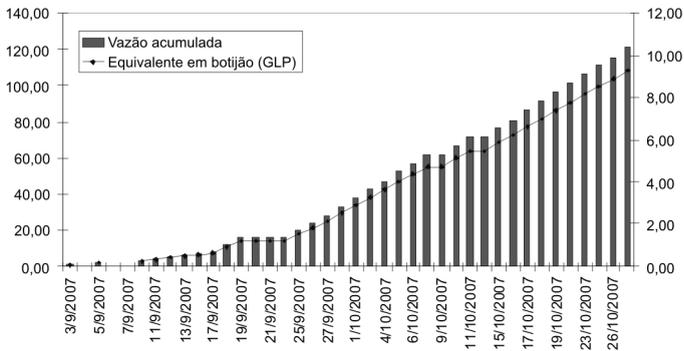


Figura 7. Vazão acumulada de biogás e o equivalente em botijão de GLP, no período de observação durante a primeira etapa.

Verifica-se do gráfico da Figura 5 que o deslocamento do gasômetro para as proximidades do biodigestor afetou sobremaneira os resultados obtidos com relação à produção de biogás. Tal fato pode ser exemplificado com a alteração verificada entre os dias 17 de setembro de 2007, cuja vazão foi de $33,04 \text{ Lh}^{-1}$ de biogás e em 19 de setembro, que foi de $158,75 \text{ Lh}^{-1}$.

Quando houve uma queda da temperatura de $296,6$ a $288,4$ (K), entre os dias 27 de setembro e 3 de outubro de 2007, ocorreu também leve decréscimo na vazão de biogás, de $181,10$ para $162,04 \text{ Lh}^{-1}$.

Por outro lado, em 6 de outubro, quando houve elevação de temperatura ($295,3 \text{ K}$), também houve acréscimo na vazão de biogás, para $203,37 \text{ Lh}^{-1}$. Não obstante, em 29 de outubro, com uma diminuição de temperatura para $290,10 \text{ K}$, a vazão do biogás não foi afetada e permaneceu na faixa de valores de cerca de 200 Lh^{-1} . Isso pode ser decorrência de um período longo antecedente com altas temperaturas, de 22 dias.

Desse modo, é possível que a atividade bacteriana, beneficiada com o acréscimo de temperatura não tenha sido afetada por esta queda de temperatura. O valor médio da produção de biogás para o mencionado período foi de $4,39 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. Esse valor foi bem correlacionado com o estimado teoricamente. Durante este período, havia a contribuição de esterco de 11 gados bovinos, incluindo os gados das propriedades circunvizinhas. Desse modo, considerando o valor de produção de biogás apresentado em Nogueira (1992) de $0,360 \text{ m}^3 \cdot \text{cabeça}_{\text{bovino}}^{-1}$, espera-se a produção teórica de $3,96 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. Considerando-se ainda, o valor de $5500 \text{ kcal} \cdot \text{m}^{-3}$ (NOGUEIRA, 1992), verifica-se um poder calorífico do biogás produzido de 21780



kcal.d⁻¹. Esse valor de 4,39 m³.d⁻¹ seria o suficiente para manter duas geladeiras em funcionamento ou uma geladeira em funcionamento, um fogão com queimador de 2" por 3 horas e um forno por 2 horas. Conforme o autor (*op. cit.*), é necessário 0,62 m³ de biogás para a geração de energia elétrica (1 kWh). Portanto, seria o suficiente para a geração de cerca de 6,4 kWh de energia elétrica.

Do gráfico da Figura 6, verificou-se que a vazão acumulada de biogás foi constante, salvo os baixos valores obtidos no início – quando o gasômetro estava locado no interior da casa, o que já era esperado, em função da perda de carga e até mesmo da observação do gráfico da Figura 5.

O gráfico da Figura 7 apresenta os valores da vazão acumulada de biogás (m³.d⁻¹) e o equivalente dessa vazão em botijão de GLP. Conforme anteriormente mencionado, a produção acumulada do biogás, equivalente em GLP, foi avaliada considerando-se o botijão de GLP de 13 kg e a produção dada por Canela (2006).

Este autor (*op. cit.*) definiu que cada dia de produção de biogás neste mesmo biodigestor, equivale à produção de 2,25 kg de GLP. Assim, a produção estimada de biogás seria equivalente a 10,4 de botijões de gás GLP em dois meses.

No presente estudo, a produção equivalente em botijão de GLP verificada foi de 9,28 botijões de GLP. Os valores foram bem próximos, com uma variação de 10,7%, talvez explicada pelos dias em que a vazão observada de biogás foi afetada em função da perda de carga em consequência da distância do gasômetro ao biodigestor.

O gráfico da Figura 8 apresenta os valores sobre a produção de biogás em função da temperatura aferida no dia, na segunda etapa deste estudo.

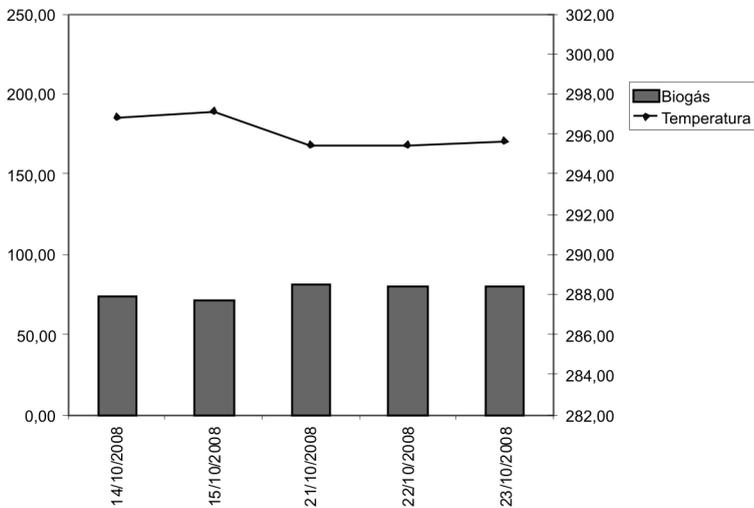


Figura 8. Produção diária de biogás observada para a segunda etapa.

Verifica-se dos dados da Figura 8 que houve uma produtividade média de $79,6 \text{ L.h}^{-1}$ (ou $1,9 \text{ m}^3.\text{d}^{-1}$). Esse valor foi bem correlacionado com o teoricamente estimado. Durante este período, havia a contribuição de esterco de 5 gados bovinos. Desse modo, considerando o valor de produção de biogás apresentado em Nogueira (1992) de $0,360 \text{ m}^3.\text{cabeça}_{\text{bovino}}^{-1}$, espera-se a produção teórica de $1,8 \text{ m}^3.\text{d}^{-1}$. Considerando-se ainda, o valor de 5500 kcal.m^{-3} (NOGUEIRA, 1992), verifica-se um poder calorífico do biogás produzido de $10505 \text{ kcal.d}^{-1}$. Esse valor de $1,9 \text{ m}^3.\text{d}^{-1}$ seria o suficiente para manter um fogão com queimador de 2" por 2,8 horas e um forno por 2 horas. Conforme o autor (*op. cit.*), é necessário $0,62 \text{ m}^3$ de biogás para a geração de energia elétrica (1 kWh). Portanto, seria o suficiente para a geração de cerca de 3,0 kWh de energia elétrica.

Ao se considerar os dados de Canela (2006) e Nogueira (1992), em que cada metro cúbico de biogás equivale a 0,45 kg de gás GLP e que cada botijão contém 13 kg, verificou-se que haveria possibilidade de substituição de 1,92 botijão por mês.

Comparativamente, esses valores foram considerados próximos aos determinados na teoria, onde a quantidade esperada de biogás gerado no biodigestor indiano era de aproximadamente de 2 m^3 por dia e haveria possibilidade de substituição de 2,1 botijões por mês. Os valores empíricos foram inferiores ao estimados, provavelmente, devido a fatores como falta de adaptação e desenvolvimento completos dos microrganismos (fase de partida do biodigestor).



4.3. Demanda Química de Oxigênio (DQO)

Ao realizar a determinação da Demanda Química de Oxigênio (DQO) do afluente e efluente, foram obtidos os resultados apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Resultados da análise do afluente quanto à Demanda Química de Oxigênio (DQO), para a diluição de 1:100 de amostra:água.

Data da coleta	16/09/08	29/09/08	14/10/08
Amostras	1	2	3
Abs	0,196	0,196	0,198
DQO (mgO ₂ /L)	50000	50000	50000

Tabela 2– Resultados da análise do efluente quanto à Demanda Química de Oxigênio (DQO), para diluições de 1:100, 1:50 e 1:10 de amostra:água.

Diluição	1:100	1:50	1:10
Amostras	1	2	3
Abs	0,232	0,079	0,033
DQO (mgO ₂ /L)	7000	7500	5000

Observa-se das Tabelas 1 e 2 que os resultados de cada amostra não variaram especificamente, pois a DQO é determinada para uma faixa específica de absorvância, no caso 0,195 a 0,199, para o afluente, o que resultou na necessidade de 500 mgO₂/L. No entanto, como as amostras foram diluídas na proporção 1:100, verifica-se que a necessidade real de DQO é de 50000 mgO₂/L. O mesmo ocorreu para na determinação de DQO do efluente, resultando no valor médio de 6500 mgO₂/L.

Os resultados para a DBO do afluente e efluente do biodigestor indiano são apresentados na Tabela 3, e para que fosse possível uma análise comparativa, os resultados de DQO e DBO do afluente e efluente foram agrupados na Tabela 4.



Tabela 3 – Resultados da DBO para as diluições 1:100 de amostra:água, para o efluente; e de 1:50 e 1:10 para o efluente do biodigestor anaeróbio.

	Afluente ($\text{mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$)	Efluente ($\text{mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$)	
Diluição	1:100	1:50	1:10
DBO	2110,01	155,95	245,54
DBO total	21100	7797	2455

Tabela 4 – Valores médios de DQO e DBO determinados para o afluente e efluente do biodigestor anaeróbio.

	Afluente ($\text{mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$)	Efluente ($\text{mgO}_2\cdot\text{L}^{-1}$)	Redução (%)
DQO	50000	6500	87,0
DBO	26420	5126	80,6

Comparativamente, a DQO encontrada situa-se próxima aos valores determinados por Santos (2004) e por Campos *et al.* (2002) em seus estudos, 56.879 mgO_2/L e 51776 mgO_2/L , respectivamente.

4.4. Sólidos Totais, Sólidos Fixos e Sólidos Voláteis

Os valores de concentrações de ST, SF e SV determinadas para o substrato do biodigestor indiano são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultado da análise do afluente quanto à concentração de Sólidos Totais (ST), Fixos (SF) e Voláteis (SV).

Data da coleta	Amostras	ST (mg/L)	SF (mg/L)	SV (mg/L)
16/09/08	1	75098	12232	62866
29/09/08	2	88370	14928	73442
14/10/08	3	80362	14150	66212
Média		81276	13770	67506
Percentual (%)		100	20,0	80,0

Ao analisar os resultados é possível perceber o alto percentual de SV (80,99%), demonstrando que o substrato utilizado apresenta uma alta taxa de biodegradabilidade. Além disto, verificou-se que diante de estudos similares, como em Santos (2004) e Campos *et al.* (2002), o percentual de sólidos determinados encontram-se próximos aos valores dos mesmos, que obtiveram de suas pesquisas 79,2 % e 72,1% de SV, e 20,8% e 27,9% de SF, respectivamente.



Os valores de concentrações de ST, SF e SV determinadas para o biofertilizante do biodigestor indiano são apresentados na Tabela 6. Os valores médios e percentuais obtidos para SV, SF e ST no substrato utilizado, suas reduções médias e percentuais após a digestão anaeróbia são apresentados na Tabela 7.

Tabela 6 - Resultado da análise do efluente quanto à concentração de Sólidos Totais (ST), Fixos (SF) e Voláteis.

Amostras	ST (mg/L)	SF (mg/L)	SV (mg/L)
Média	13972	5666	8306
Percentual (%)	100	40,6	59,4

Tabela 7 - Valores médios e percentuais obtidos para Sólidos Voláteis, Sólidos Fixos e Sólidos Totais no substrato utilizado, suas reduções médias e percentuais após a digestão anaeróbia.

Sólidos	Afluente (mg.L ⁻¹)	Porcentagem (%)	Redução (mg.L ⁻¹)	Porcentagem (%)
Voláteis	67506	80,0	59200	87,7
Fixos	13770	20,0	8104	58,9
Totais	81276	100	67304	82,8

5. CONCLUSÕES

No presente estudo buscou-se aliar a prática da digestão anaeróbia, por meio da avaliação da produção de biogás em um biodigestor modelo indiano implantado no Parque de Alternativas Energéticas e Desenvolvimento Autossustentável (PAEDA), situado na área rural do município de Itajubá-MG (distrito do Rio Manso), usando-se, como substrato, dejetos de bovinos.

Para tal, houve a necessidade da construção de um gasômetro com capacidade de 0,13 m³ de biogás. O tempo de detenção hidráulica foi de 07 dias.

Com relação ao objetivo proposto no presente estudo, a produção de biogás acumulada e mensurada por meio do uso do gasômetro nos meses de Setembro e Outubro de 2007, foi de 5,025 m³. Os resultados indicaram boa correlação entre a produção teórica de equivalente em GLP an-



teriormente estimada (quando da construção do biodigestor), por Canela (2006), ou seja, de 10,4 botijões de GLP para dois meses e a observada no presente estudo (9,28 botijões de GLP). O valor de $4,39 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ seria o suficiente para manter duas geladeiras em funcionamento ou uma geladeira em funcionamento, um fogão com queimador de 2" por 3 horas e um forno por 2 horas, ou ainda, de cerca de 6,4 kWh de energia elétrica.

Na segunda etapa, verificou-se que houve uma produtividade média de biogás de $79,6 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ (ou $1,9 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$), correspondendo a 1,92 botijão por mês. Esse valor de $1,9 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ seria o suficiente para manter um fogão com queimador de 2" por 2,8 horas e um forno por 2 horas, ou ainda, de aproximadamente, 3,0 kWh de energia elétrica.

As análises de DQO, efetuada na segunda etapa deste estudo, no afluente e efluente do biodigestor encontram-se bem correlacionados aos encontrados na literatura e a redução desta variável alcançou o valor de até 87,0%. No que concerne aos valores de médios e percentuais obtidos para SV, SF e ST no substrato utilizado, suas reduções médias e percentuais após a digestão anaeróbia, verifica-se um aumento na porcentagem de SF, como resultado da digestão anaeróbia da fração biodegradável. Quanto aos resultados da análise do afluente, é possível verificar o alto percentual de SV (80,99%), demonstrando que o substrato utilizado apresenta uma alta taxa de biodegradabilidade.

AGRADECIMENTOS

Ao Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas (CERPCH), pela disponibilidade, sobretudo de funcionários, dados e informações. Ao Prof. Dr. Luiz Augusto Horta Nogueira pelas valiosas contribuições. Ao Eng. Mecânico M. Sc. Fábio José Horta Nogueira e ao Eng. Eletricista Carlos Adriano Rosa, pela grande disponibilidade. Ao desenhista Argemiro dos Santos, pela grande disponibilidade na elaboração dos desenhos. À Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), cuja parceria estabelecida com a UNIFEI que tem permitido o desenvolvimento de trabalhos de cunhos científicos, tecnológicos, educacional e social em Itajubá e região.



REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALMEIDA, J. S. REIS, M. A. M. CARRONDO, M. J. T. Competition between nitrate and nitrite reduction by denitrification by *Pseudomonas fluorescens*, *Biotechnology and Bioengineering*, v.46, p.476–484. 1995.

AMARAL, C. M. C.; AMARAL, L. A.; LUCAS JÚNIOR, J.; NASCIMENTO, A. A.; FERREIRA, D. S.; MACHADO, M. R. F. Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de retenção hidráulica. *Ciência Rural*, v.34, n.6. 2004.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). Standard methods for the examination of water and wastewater. 20 ed. Washington: APHA/AWWA/WEF, 1998.

ANGONESE, A. R.; CAMPOS, A. T.; ZACARKIM, C. E.; MATSUO, M. S.; CUNHA, F. Eficiência energética de sistema de produção de suínos com tratamento dos resíduos em biodigestor. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, n.3. 2006.

AQUINO, SF.; CHERNICHARO, C. A. L.; FORESTI, E.; SANTOS, L.; MONTEGGIA, L. O. Metodologias para determinação da atividade metanogênica específica (AME) em lodos anaeróbios. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.12, n.2, p.192-201. 2007.

BHATTACHARYA, S. K.; PARKIN, G. F. The effect of ammonia on methane fermentation process. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, v.61, n.1, p.55–59. 1989.

CANELA, G. C. Construção e operação de um biodigestor rural no PAEDA. 58p. Trabalho (de Diploma) – Instituto de Recursos Naturais da Universidade Federal de Itajubá (IRN/UNIFEI), Itajubá-MG. 2006.

CASTRILLÓN L; VÁZQUEZ, I; MARAÑÓN, E, SASTRE, H. Anaerobic thermophilic treatment of cattle manure in UASB reactors. *Waste management & Research: the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association*, ISWA, v.20, n.4, p.350-360, 2002.

CASTRO, L. R; CORTEZ, L. A. B. Influência da temperatura no desempenho de biodigestores com esterco bovino. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.2, n.1, p.97-101. 1998.



CHEN, Y.; CHENG, J. J.; CREAMERA, K. S. Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology*, v.99, n.10, p.4044-4064. 2008.

CHERNICHARO, C. A. L. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: biodigestores anaeróbios. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental-UFMG, 1997. v.5. 246p.

FERNANDES, F. (org). Manual prático para compostagem de biossólidos. Rio de Janeiro:

ABES - Projeto PROSAB, 1999. 84p.

FERREIRA, M. M. M.; FERREIRA, G. B.; FONTES, P. C. R.; DANTAS, J. P. Influência das adubações nitrogenada e orgânica no tomateiro sobre os teores de N-NO₃ e N-NH₄ no perfil do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.7, n.2, p.233-239. 2003.

FLORENTINO, H. O. Mathematical tool to size rural digesters. *Scientia Agrícola*, v.60, n.1. 2003.

HANSEN, K. H.; ANGELIDAKI, I.; AHRING, B. K. Improving thermophilic anaerobic digestion of swine manure. *Water Research*, v.33, n.8, p.1805-1810. 1999.

LEITÃO, R. C.; VAN HAANDEL, A. C.; ZEEMAN, G.; LETTINGA, G. The effects of operational and environmental variations on anaerobic wastewater treatment systems: A review. *Bioresource Technology*, v.97, p.1105-1118, 2006.

MAHMOOD, Q.; ZHENG, P.; HAYAT, Y.; ISLAMA, E.; WUA, D.; REN-CUNA, J. Effect of pH on anoxic sulfide oxidizing reactor performance. *Bioresource Technology*, v.99, n.8, p.3291-3296. 2008.

NOGUEIRA, L. A. H. Biodigestão: A alternativa energética. 1.ed. São Paulo: Nobel, 1992. 93p.

POHLAND, F. G. Thermal energy interchange during anaerobic methane fermentation of waste organic substrates. *Applied Microbiology*, v.16, n.10, p.1518-1523, 1968.

SANTOS, J. H. T. Avaliação de um sistema de aquecimento do substrato na biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos. Viçosa: UFV, 2004. 66 p. Dissertação Mestrado



SEDIYAMA, M. A. N.; VIDIGAL, S. M.; PEDROSA, M. W.; PINTO, C. L. O.; SALGADO, L. T. Fermentação de esterco de suínos para uso como adubo orgânico. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, n.6, p.638-644. 2008.

SOUZA, C. F.; LUCAS JÚNIOR, J. ; FERREIRA, W.P.M. Biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos sob efeito de três temperaturas e dois níveis de agitação do substrato - considerações sobre a partida. *Engenharia Agrícola*, v.25, n.2. 2005.

SOUZA, C. F.; LUCAS JÚNIOR, J. Construção e operação de biodigestores. *Série Energia alternativa: manual n. 441*. Viçosa: CPT, 2003. 176p.

VILLELA JR., L. V. E.; ARAÚJO, J. A. C.; BARBOSA, J. C.; PEREZ, L. R. B. Substrato e solução nutritiva desenvolvidos a partir de efluente de biodigestor para cultivo do meloeiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.11, n.2, p.152-158. 2007.