

CARACTERIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA BIODIGESTÃO DE LODO DE ESGOTO

Camila Kelly de Queiroz – milakelly@gmail.com

Juliana Lobo Paes – juliana.lobop@yahoo.com.br

Pedro Luiz Belfort Gomes Fernandes – pedrobelfort18@gmail.com
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia

Resumo. Devido à crescente preocupação com a conservação dos recursos naturais e a redução de impactos, pode-se adotar biodigestores para destinação final de resíduos, e como consequência produção limpa de energia. Objetivou-se com esse trabalho a caracterização do lodo anaeróbico de Estação de Tratamento de Esgoto a fim de propor uma alternativa sustentável na destinação final desse efluente. Utilizou-se biodigestores de bancada modelo indiano em sistema de batelada, durante 138 dias. O processo de biodigestão teve sua eficiência avaliada por análises físico-químicas e microbiológica, no afluente e efluente. Com relação ao biogás, avaliou-se a produção, potencial energético e composição do biogás. No que diz respeito às análises físico-químicas, o pH manteve-se na faixa ideal durante todo o processo, a condutividade elétrica teve um aumento concomitante a redução de sólidos totais, o que comprovou a redução dos compostos orgânicos do substrato. A biodigestão anaeróbica acarretou em elevada produção de biogás e antecipação do pico de produção. Diante dos resultados obtidos, concluiu-se que a implementação de biodigestores em ETE pode ser considerada uma alternativa promissora de destinação final do lodo anaeróbico.

Palavras-chave: Energia limpa, Biodigestor, Tratamento de resíduos.

1. INTRODUÇÃO

Em vista de o Brasil ser considerado um país em desenvolvimento ainda enfrenta sérios problemas de saúde pública e saneamento básico. Dentre os maiores problemas de contaminação de água encontra-se o despejo ilegal de esgoto. De acordo com o último censo realizado pelo IBGE, em 2008, dos 5561 municípios brasileiros apenas 3069 possuíam coleta de esgoto sanitário, representando 55%, e destes que possuem coleta, apenas 1587 são tratados em Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) (IBGE, 2017). Com o passar dos anos a tendência é o crescimento populacional e, como consequência, a geração de efluentes que necessitam ser tratados.

O tratamento realizado nas ETE's normalmente é biológico e resulta em dois tipos de resíduo, o efluente líquido, devolvido para os rios ou baías seguindo os padrões de qualidade exigidos e o lodo (primário e secundário). O lodo é composto pelos sólidos gerados durante o processo de tratamento de esgotos, e possui alto teor de matéria orgânica. Devido ao aumento do número de estações e às exigências dos órgãos ambientais e de saúde pública, o lodo vem ganhando cada vez mais importância (Silva, 2014).

Entretanto a destinação do mesmo em sua maioria não ocorre de acordo com o previsto pela Política Nacional de Resíduos Sólidos. Isso ocorre devido a questões relacionadas ao condicionamento e estabilização do lodo gerado, grau de desidratação, formas de transporte, eventual reúso do lodo, eventuais impactos e riscos ambientais, e aspectos econômicos desta destinação final. A questão, portanto, não é simples e deve ser analisada sob uma ótica abrangente.

Dentre as alternativas de destinação e tratamento do lodo de esgoto pode-se incluir a utilização de biodigestores. Os biodigestores são alternativas de alta viabilidade financeira e ambiental, por serem considerados tecnologia de energia limpa (Khalid *et al.* 2011). O princípio de funcionamento dos mesmos consiste na biodigestão anaeróbica, onde ocorre a transformação da matéria orgânica em dois subprodutos: o biogás e o biofertilizante.

O biogás por ser proveniente da biodigestão anaeróbica, é considerado uma fonte de energia renovável, podendo ser utilizado na iluminação, aquecimento, refrigeração, na cozinha e até mesmo na alimentação de motores. Os compostos gasosos que fazem parte da sua composição são em sua maioria o metano, seguido pelo dióxido de carbono e pequenas quantidades de outros gases, como ácido sulfídrico (Ward *et al.* 2008).

Diante desses fatos os biodigestores são altamente viáveis financeiramente e até mesmo incentivados pelos governos, principalmente em propriedades rurais. Por terem a capacidade de reduzir as emissões de gás metano para atmosfera são considerados um Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), incentivado e estabelecido no Protocolo de Kyoto, em 1997. O interesse por essa redução também é financeiro, através da política de crédito de carbono (Argonese *et al.* 2007).

Com isso, objetivou-se com esse trabalho caracterizar o lodo de esgoto como substrato da biodigestão anaeróbica e seu potencial de produção de biogás.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), campus Seropédica - RJ, cujas coordenadas geográficas são: 22° 45' 33" S e 43° 41' 51". O clima da região é classificado como Aw segundo a classificação de Köppen e temperatura média anual de 24,5 °C (Carvalho & Antunes, 2006).

O sistema de biodigestão anaeróbica foi instalado no Laboratório de Eletrificação Rural e Energias Alternativas do Instituto de Tecnologia (IT) Departamento de Engenharia (DE) da UFRRJ. As análises físico-químicas do afluente e efluente foram realizadas nos Laboratórios de Eletrificação Rural e Energias Alternativas e Monitoramento Ambiental I – Águas e Efluentes do IT/ DE da UFRRJ.

Utilizaram-se três biodigestores modelo indiano de bancada (Fig. 1) abastecidos com lodo de esgoto coletado na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Penha localizada no Estado do Rio de Janeiro. A fim de evitar perda de biogás gerado devido ao precoce processo fermentativo o abastecimento do lodo de esgoto nos biodigestores ocorreu 24 h após sua coleta nos decantadores primários.

- (1) Manômetro de coluna d'água;
- (2) Gasômetro;
- (3) Câmara de contenção do "selo de água"

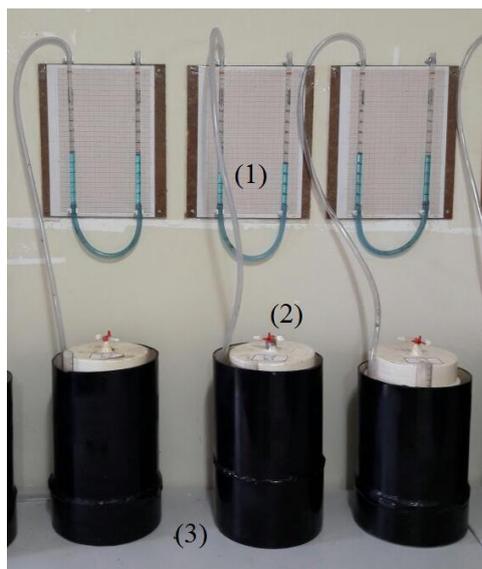


Figura 1 - Biodigestor modelo indiano de bancada.

O sistema de abastecimento ocorreu em batelada, ou seja, acondicionou-se o substrato, denominado como afluente, no biodigestor apenas no início do experimento. O tempo de retenção hidráulica (TRH) foi de 138 dias (17 semanas), com início em 29 de janeiro de 2016 e fim em 23 de maio de 2016. Realizou-se três leituras semanais durante o TRH para a avaliação da produção e caracterização do biogás. Além das medições de pressão e temperatura dos biodigestores.

A produção do biogás foi avaliada através do deslocamento do gasômetro. Para o funcionamento do mesmo, adotou-se o sistema flutuante. Por esse sistema, à medida que ocorreu a produção de biogás, houve deslocamento na direção vertical do gasômetro. Esse deslocamento foi medido por uma régua graduada fixa ao gasômetro.

O monitoramento da temperatura ambiente e interna dos biodigestores foi mensurado com termopar conectado a milivoltímetro com precisão de $\pm 0,1$ °C. Para a temperatura interna o termopar foi inserido na válvula de três vias fixada na parte superior da campânula após a caracterização do biogás. Adotou-se esse ponto para medir a temperatura, devido ao fato que na região superior do biodigestor ocorre a maior atividade microbiana (Tavares *et al.* 2016).

A caracterização físico-química do substrato de entrada (afluente) e saída (efluente) do biodigestor foi realizada quanto ao potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica (CE), sólidos totais (ST), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO), conforme recomenda a Legislação do CONAMA 375/06 para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. As análises foram realizadas de acordo com a metodologia descrita pela APHA (2005).

Para caracterização quanto à presença de agentes patogênicos e indicadores bacteriológicos realizou-se análises microbiológicas de Coliformes Termotolerantes. Os coliformes termotolerantes foram quantificados pela Técnica do Número Mais Provável (NMP) em tubos múltiplos conforme a Norma Técnica L5-406, recomendada pelo CONAMA 375/06.

O biogás gerado durante a biodigestão anaeróbica do inóculo de lodo de esgoto nos biodigestores foi analisado quanto a produção semanal e acumulada, potencial de produção e caracterização.

O volume de biogás produzido foi calculado através do produto do deslocamento vertical do gasômetro por sua área da seção transversal interna durante 17 semanas, ou seja, 138 dias. A correção do volume de biogás para as condições de 1 atm e 20 °C é efetuada com base no trabalho realizado por Aquino *et al.* (2007), no qual, pelo fator de compressibilidade, o biogás apresenta comportamento próximo ao ideal. Conforme descrito por Matos *et al.* (2017a),

para a correção do volume de biogás utilizou-se a expressão resultante da combinação das leis de Boyle e Gay-Lussac (Eq. 1).

$$\frac{V_0 \times P_0}{T_0} = \frac{V_1 \times P_1}{T_1} \quad (1)$$

Em que:

V_0 = volume de biogás corrigido, m^3 ;

P_0 = pressão corrigida do biogás, 10.322,72 mm de H_2O ;

T_0 = temperatura corrigida do biogás, 293,15 K;

V_1 = volume do gás no gasômetro, m^3 ;

P_1 = pressão do biogás no instante da leitura, mm de H_2O ; e

T_1 = temperatura do biogás, em K, no instante da leitura.

Considerando-se a pressão atmosférica de Seropédica igual a 10290,90 mm de coluna d'água e pressão média conferida nos manômetros em mm de H_2O , obteve-se, como resultado, a seguinte expressão para a correção do volume de biogás (Eq. 2).

$$V_0 = \frac{V_1}{T_1} \times 293,9283 \quad (2)$$

Os potenciais de produção de biogás foram calculados utilizando-se os dados de produção semanal e as quantidades de substrato e de ST adicionados (afluente) nos biodigestores. A caracterização do biogás foi realizada após cada leitura nos biodigestores, com a mensuração do Limite Inferior de Explosividade (% LIE) com calibração para o gás metano (CH_4) e concentrações de monóxido de carbono (ppm CO) e oxigênio (vol O_2) do biogás pelo Explosímetro Digital Portátil de 4 Gases da marca Instrutherm®.

Para a avaliação dos resultados referentes ao ensaio de biodigestão anaeróbia foi adotado delineamento inteiramente casualizado (DIC). Utilizou-se no experimento três biodigestores. A análise estatística das características físico-químicas (pH, CE, ST) do afluente e efluente dos substratos em diferentes doses foram submetidos à análise de variância seguido do teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade pelo programa estatístico SISVAR, versão 5.6.

2. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apresenta-se na Fig. 2, a temperatura média ambiente e no interior dos biodigestores utilizados na biodigestão anaeróbica do lodo de esgoto.

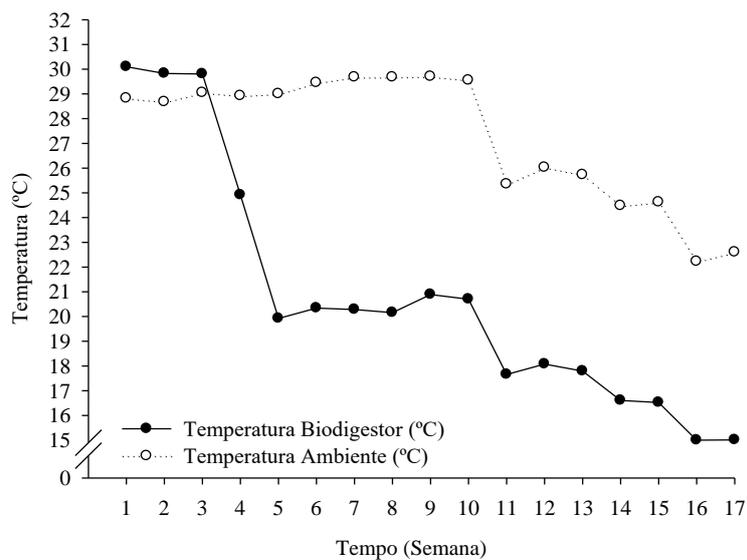


Figura 2 - Variação semanal média da temperatura interna e externa ao biodigestor.

Ao longo do experimento, a temperatura ambiente variou em torno de 29 °C até a 10ª semana, seguido de redução para 22 °C na 17ª semana. No entanto, a temperatura interna no biodigestor apresentou grande amplitude térmica com

variação de 15 a 30 °C (Fig. 2). Pode-se observar que as temperaturas internas dos biodigestores acompanharam as variações da temperatura externa aos mesmos, porém tais temperaturas se mostraram inferiores à temperatura ambiente (Fig. 2). Tal desempenho foi observado por Giacobbo *et al.* (2013), ao avaliar a influência das variações térmicas e climáticas na produção de biogás nos biodigestores. Ainda na Fig. 2, também é possível observar que a temperatura ambiente e as temperaturas para o tratamento, mantiveram-se oscilando na faixa mesofílica. De acordo com Salam *et al.* (2011), essa faixa é considerada ideal para que o processo de biodigestão ocorra de forma satisfatória (Fig. 2).

Apresentam-se na Tab. 1, os valores médios dos resultados das análises físico químicas do afluente e efluente.

Tabela 1 - Valores médios de potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica (CE) e sólidos totais (ST) no afluente (A) e efluente (E).

| Parâmetro | Afluente | Efluente |
|---------------------------|----------|----------|
| pH | 6,06 A | 7,78 A |
| CE (ds cm ⁻¹) | 0,19 A | 0,58 B |
| ST (%) | 5,53 A | 1,55 B |

Letras maiúsculas distintas na mesma linha representam diferenças significativas entre as médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Embora não foi verificado diferença significativa entre os valores médios de pH no afluente e efluente, a biodigestão anaeróbica proporcionou aumento, tendendo a alcalinidade (Tab. 1). No caso da biodigestão anaeróbica dos dejetos, em que as bactérias metanogênicas são os principais microorganismos presentes no processo, a faixa ideal de pH deve ser próximo da neutralidade. No entanto, estudos confirmam que é possível estabilizar o processo em um intervalo maior, entre 6 a 8, sem comprometer o desenvolvimento das bactérias metanogênicas (Quadros *et al.* 2010; Sánchez-Hernández *et al.* 2013). Segundo Matos *et al.* (2017b) a alcalinização do substrato decorrente ao processo de biodigestão anaeróbica é um fenômeno esperado, pois há transformação dos ácidos contidos nos afluentes em produtos gasosos. O aumento nos valores de pH sem interferir na produção de biogás ocorreu na biodigestão anaeróbica de dejetos de bovinos leiteiro (Matos *et al.*, 2017a) e na codigestão entre dejetos de caprinos e ovinos em reator contínuo com gasômetro em PVC flexível (Quadros *et al.* 2010).

No que tange a utilização do efluente de lodo de esgoto como biofertilizante, resultados de pH foram aceitáveis para a aplicação na irrigação (Ayers *et al.* 1999). De acordo com o limite de tolerância proposto por esses autores, os valores de pH ideal da qualidade da água na irrigação devem variar entre 6,5 a 8,4. Os valores de pH resultantes da biodigestão anaeróbica de 8,73 do lodo de esgoto, 7,90 de dejetos de bovino (Koszel & Lorencowicz, 2015) e de 7,50 da codigestão entre dejetos de caprinos e ovinos (Quadros *et al.* 2010), ou seja, na faixa do pH do efluente do lodo de esgoto, indicam a possibilidade da utilização desses efluentes como biofertilizante. Segundo Koszel & Lorencowicz (2015), a utilização do efluente de lodo de esgoto como biofertilizante acarretou ligeiro aumento no pH solo, sendo favorável ao desenvolvimento da planta.

No que diz respeito à condutividade elétrica, ocorreu aumento significativo ao comparar o afluente com o efluente (Tab. 1). Segundo Silva *et al.* (2012) a condutividade elétrica está relacionada com a quantidade de íons dissolvidos durante a fase líquida, e seu aumento pode ser explicado pela digestão de compostos mais complexa em mais simples, como por exemplo os íons. Ainda segundo esses autores, a biodigestão anaeróbica da vinhaça apresentou maiores valores de condutividade elétrica no efluente em relação ao afluente.

Na avaliação da qualidade da água de irrigação proposto por Ayers *et al.* (1999), os valores obtidos para o efluente encontram-se inferiores ao limite de tolerância (< 0,7 dS m⁻¹). De acordo com Matos *et al.* (2017b) valores de condutividade elétrica próximo a 0,6 dS cm⁻¹ não comprometem a qualidade biofertilizante produzido no que diz respeito à segurança quanto a sua aplicação no solo relacionado à salinidade.

A aplicação da água de irrigação salina juntamente com biofertilizante de dejetos de bovinos com CE (0,80 ds cm⁻¹) acima ao obtido no presente efluente (Tab. 1) atenuou a redução da área foliar, matéria seca da parte aérea, matéria seca total e comprimento da raiz do amendoimzeiro (Sousa *et al.* 2014). Valores elevados de CE no efluente podem acarretar aumento da salinidade, comprometendo sua aplicação em conjunto com sistema de irrigação, porém, desde que controlado e não indiscriminado, como biofertilizante, não há efeitos negativos (Silva *et al.* 2012).

Observam-se que os valores médios de ST no afluente e efluente apresentaram diferença estatística com reduções acentuadas, em média 72% (Tab. 1). Essa redução representa eficiência da biodigestão anaeróbica do lodo de esgoto em biodigestores modelo indiano na degradação da matéria orgânica. O resultado obtido neste trabalho foi elevado quando comparado com a redução dos sólidos totais de 27 a 50% para codigestão entre manipueira e dejetos de ovinos em biodigestor modelo indiano (Silva *et al.* 2012).

Apresentam-se na Tab. 2 a demanda bioquímica de oxigênio e demanda química de oxigênio no afluente e efluente do lodo de esgoto, e suas respectivas reduções.

Tabela 2 - Valores de uma única amostragem de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO) no afluente e efluente do lodo de esgoto.

| Parâmetro | Afluente | Efluente | Redução (%) |
|---------------------------|-----------|-----------|-------------|
| DBO (mg L ⁻¹) | 25.269,08 | 14.091,00 | 44 |
| DQO (mg L ⁻¹) | 57.213,00 | 36.860,00 | 36 |

A demanda bioquímica do oxigênio (DBO) e a demanda química de oxigênio (DQO) são parâmetros relacionados à contaminação das águas. A DBO indica o potencial poluidor das águas residuais, em que as bactérias aeróbicas consomem o oxigênio usado para degradar a matéria orgânica biodegradável. A DQO é um parâmetro indicador de contaminação, quantificando o oxigênio necessário para oxidar a matéria orgânica degradável, bem como os restos de materiais fibrosos e outros (Soria *et al.* 2001).

A DBO do afluente do lodo de esgoto apresentou valor superior, enquanto que a DQO similar quando comparado com os resultados obtidos na avaliação da utilização de inóculo em biodigestores indianos com dejetos de bovinos sob sistema de produção convencional e orgânico (Alves, 2017). Em termos de redução de DBO e DQO, observa-se que valores superiores para o lodo de esgoto ao comparar com o tratamento controle e 40% de inóculo.

Com relação a caracterização microbiológica, não foi possível determinar com exatidão o Número Mais Provável (NMP), uma vez que as amostras apresentaram valores superiores a $1,6 \times 10^3$ NMP 100 mL⁻¹ de substrato para o afluente e inferiores $0,8 \times 10^3$ NMP 100 mL⁻¹ de substrato para o efluente. Matos *et al.* (2017a) relataram que após o processo de biodigestão anaeróbia dos dejetos de bovinos, as concentrações de coliformes termotolerantes estavam muito aquém do limite estabelecido pela legislação. No entanto, observa-se elevada redução da carga microbiana após o processo de biodigestão anaeróbica. As reduções de coliformes termotolerantes, indicadores de poluição ambiental, demonstram a eficiência do processo de biodigestão anaeróbia na remoção de microrganismos indicadores de poluição fecal (Orrico Júnior *et al.* 2010).

No que tange sua disposição final, embora o efluente apresente redução no teor de coliformes termotolerantes, para sua utilização deve-se alcançar valores absolutos característicos para cada finalidade. De acordo com a Resolução CONAMA 375/2006, o efluente de lodo de esgoto, associado ao valor do pH (Tab. 1), apresenta valores absolutos de coliformes termotolerantes inferiores a 200 coliformes termotolerantes 100 mL⁻¹ de efluente, podendo ser utilizado para a irrigação de hortaliças consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e ingeridas cruas sem remoção de película, bem como para a irrigação de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto.

Em suma, a caracterização físico-química e microbiológica do lodo de esgoto apresentou valores dentro ou próximos das faixas reportadas por outros autores, significando que o lodo anaeróbio da ETE da Penha possui potencial de utilização em biodigestores.

Apresenta-se na Fig. 2 a produção de biogás oriunda da biodigestão de lodo de esgoto com TRH de 17 semanas (138 dias).

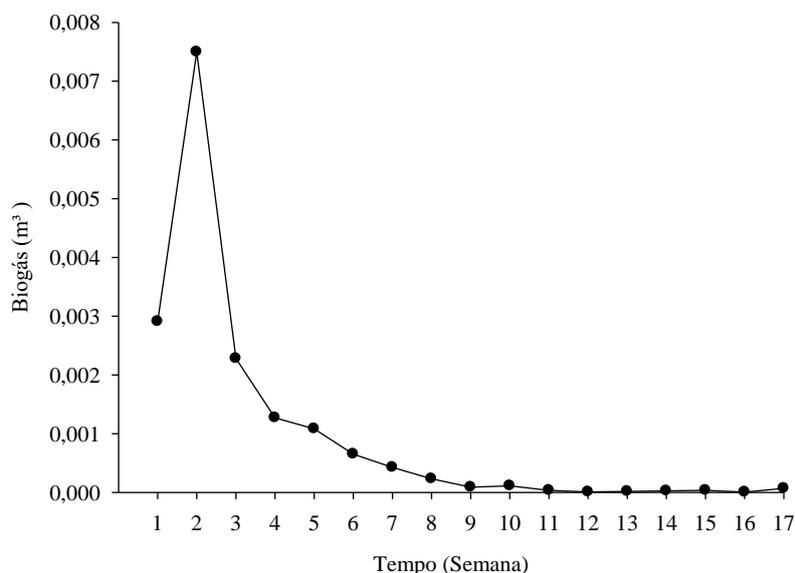


Figura 2 - Produção volumétrica semanal (m³) de biogás.

Observa-se que na primeira semana de biodigestão anaeróbica houve a produção de 0,003 m³ de biogás. Após uma semana, atingiu-se o pico de produção com aumento de 63% de biogás. Em seguida, houve queda na produção de biogás até a 11^a semana, mantendo-se constante e próxima a zero até o final do experimento.

Ao comparar o perfil de produção do lodo de esgoto proveniente da ETE com outros substratos, pode-se comprovar a eficiência da utilização desse biodigestante. Matos *et al.* (2017a) relatou que o pico principal de produção de biogás dos dejetos de bovino sob sistema orgânico de produção ocorreu na 9^a semana, após 56 dias de biodigestão,

enquanto que, nos dejetos de bovino sob sistema convencional, ocorreu somente após 14 semanas de biodigestão anaeróbica (98 dias). Assim, sistemas de manejo que visem a antecipação e aumento de biogás, tais como biodigestão anaeróbica de diferentes substratos adicionada por inóculo e a codigestão, pode-se sugerir a utilização do lodo de esgoto.

No que tange o efeito da temperatura sobre o processo de produção de biogás, verificou-se que a semana em que ocorreu o maior pico de produção de biogás (Fig. 2) foi a mesma em que o interior dos biodigestores atingiram suas temperaturas mais elevadas, confirmando a interferência da temperatura na eficiência do processo de biodigestão.

Com relação a produção acumulada de biogás, observa-se na Fig. 3, que na biodigestão anaeróbica do lodo de esgoto não ocorre a etapa de bioestabilização do material como comumente relatada em diversos trabalhos (Paes *et al.* 2017). Provavelmente, essa etapa inicial de adaptação e multiplicação de carga microbiana, conhecida como fase lenta (fase lag), não ocorre devido ao fato desse substrato ser proveniente de decomposição biológica acarretando em comunidade bacteriana estabilizada composta por microrganismos fermentadores, acetogênicos e metanogênicos que auxiliam o processo de degradação biológica da matéria orgânica. Conforme observado na produção semanal de biogás (Fig. 2), a estabilização do processo, ou seja, a produção de biogás praticamente constante ao longo do período de biodigestão anaeróbica, ocorreu a partir da 11ª (Fig. 3). Esse comportamento foi relatado por Maamri *et al.* (2014), em que caracterizou a estabilização do processo como fase estacionária de crescimento microbiano.

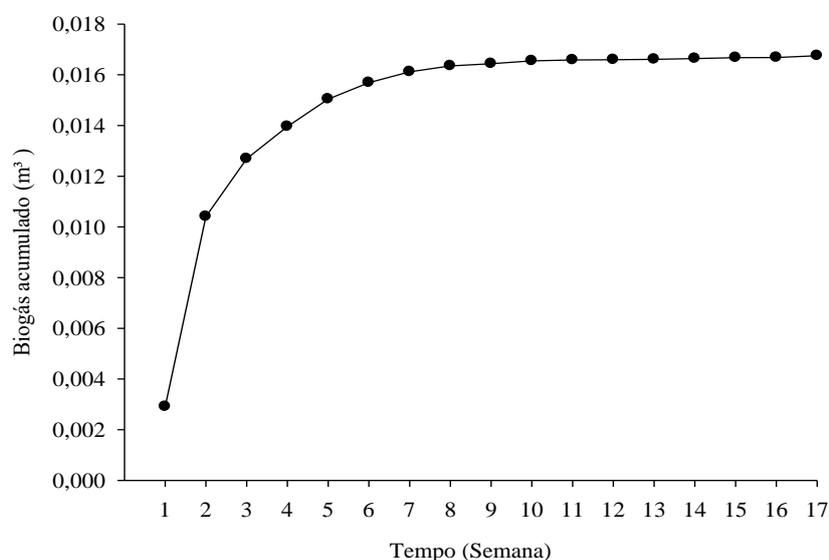


Figura 3 - Produção acumulada (m³) de biogás.

Confrontando a produção semanal com a acumulada de biogás, pode-se inferir que a maior parte da degradação do substrato ocorreu entre a primeira e terceira semana, sugerindo que os biodigestores devem ser preferencialmente executados em período próximo ao mencionado para rendimento energético ótimo. Provavelmente, a produção de inóculo advindo da terceira semana seria um excelente recurso para a antecipação do ponto de partida de substrato advindos de resíduos agrícolas.

Segundo Malinowsky (2016), a utilização de lodo de esgoto como inóculo na biodigestão de resíduo sólido urbano garantiu a produção de biogás até o momento final do experimento. Caneiro *et al.* (2005) e Andrade *et al.* (2015), concluíram que a adição de lodo de esgoto como inóculo favorece o aumento na produção de biogás devido a sua alta concentração de matéria orgânica. A recomendação de lodo de esgoto como inóculo é feita devida à rápida produção de biogás, auxiliando na antecipação da produção de biogás.

O potencial de produção de biogás está relacionado com a matéria orgânica disponível no substrato em termos de ST e DQO (Córdoba *et al.* 2016). Dessa forma, o total de biogás produzido e o potencial energético em decorrência das reduções de ST, DBO e DQO e a análise microbiológica confirmam a eficiência da adoção de biodigestores em ETE como mais uma etapa de tratamento biológico do esgoto.

No pico de produção de biogás ($\text{m}^3 \text{ ton}_{\text{substrato}}^{-1}$), para a quantidade de lodo de esgoto produzido por ano (150.000 ton ao ano) em uma ETE e equivalência de um metro cúbico de gás com eletricidade (1,47 kWh) (Barrera, 1993; Pedroza *et al.* 2010), o potencial energético de biogás em biodigestores seria de $9,863 \text{ m}^3 \text{ ton}_{\text{substrato}}^{-1}$. Assim, na segunda semana de biodigestão a produção de biogás seria equivalente a 2.112,7 kW. A adoção de biodigestores para a geração de energia elétrica produziria em torno de $176,1 \text{ kWh mês}^{-1}$, o que possibilita converter em iluminação para toda ETE e arredores.

O biogás foi avaliado qualitativamente de acordo com o índice de explosividade, concentração de monóxido de carbono e concentração de oxigênio. Os gases apresentam índice de explosividade que é determinado pelo LIE (Limite Inferior de Explosividade) (Silva *et al.* 2009). O valor dado pelo LIE quantifica a concentração mínima de gás, que

quando em contato com o ar atmosférico, a partir de uma fonte de ignição, pode ocorrer a queima do produto (AVATEC, 2016).

O explosímetro, aparelho detector dos gases, informa o limite inferior de explosividade (LIE) entre 0 e 100%, sendo para o metano, o valor é de 5%. Sendo assim, quando no visor do explosímetro mostrar 100%, conclui-se que naquele momento há 5% de metano existente na mistura do biogás (Silva *et al.* 2009). Na Fig. 4, pode-se observar a produção de gases na 1ª semana, porém, apenas na 2ª semana o LIE atinge 100%. Isto é, na 2ª semana há 5% de metano presente na mistura de biogás. Entre a 2ª e 10ª semana, observa-se que o LIE variou entre 95 e 100%, seguido de uma constante queda, coincidindo com o período em que a produção de biogás se torna constante e próxima de zero.

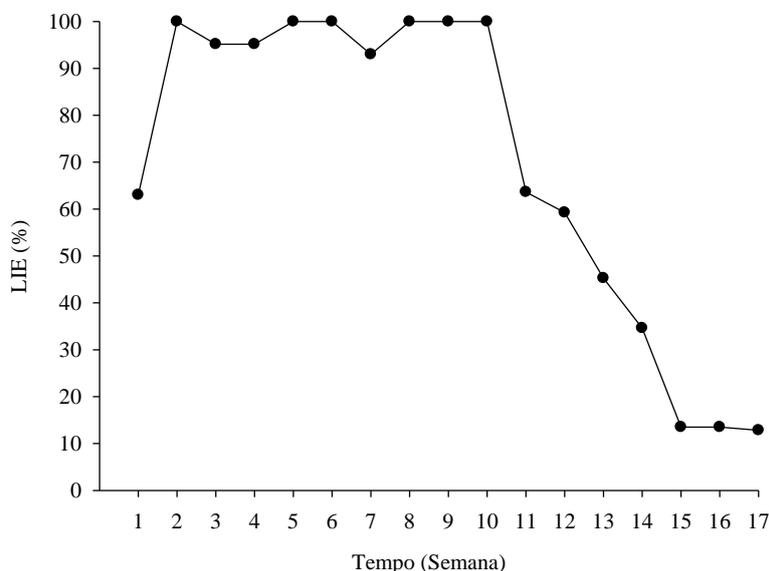


Figura 4 - Limite Inferior de Inflamabilidade do biogás.

Na Fig. 5, observa-se que a concentração de monóxido de carbono no início do experimento chegou a valor extremamente alto, atingindo 110 ppm na 2ª semana, seguido de queda com produção nula a partir da 15ª semana. Segundo Yorgos (2012), o monóxido de carbono é considerado um gás tóxico causador de grandes riscos à saúde em função da concentração e do tempo de exposição. Efeitos sobre o sistema nervoso também podem ocorrer após exposição a altos níveis de concentração do mesmo no ar (Pecora, 2006). De acordo com a NR-15 em seu Anexo N°. 11, o limite de tolerância para monóxido de carbono é de 39 ppm por um período de 48 h por semana. Assim, observa-se na Fig. 5 que partir da 5ª semana a concentração de monóxido de carbono passa a se enquadrar no limite de tolerância.

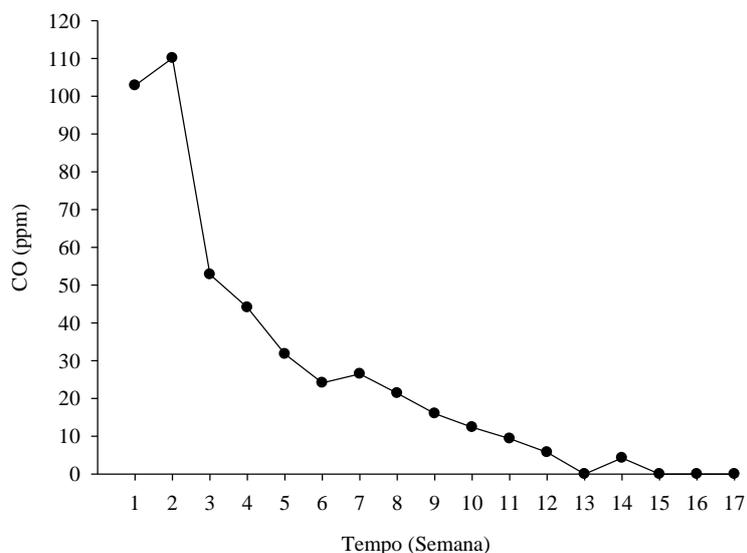


Figura 5 - Monóxido de carbono produzido em biodigestor indiano abastecido com lodo de esgoto.

Observa-se na Fig. 6, queda na concentração de oxigênio na 1ª semana da biogestão anaeróbica, mantendo-se com valores baixos até a 10ª semana. Este perfil de concentração de oxigênio indica eficiência no processo de biodigestão anaeróbica no que tange a hemerticidade do sistema e consumo desse componente para a produção de metano.

No início do processo de biodigestão anaeróbica, a maior parte do oxigênio dissolvido no substrato é liberado para o meio e consumido pelas bactérias aeróbias presentes, viabilizando assim, o posterior desenvolvimento e multiplicação das bactérias anaeróbias (Otononi *et al.* 2016). Dessa forma, como o lodo de esgoto possui comunidade microbiana estabilizada no início do processo de biodigestão anaeróbica o oxigênio liberado foi imediatamente consumido, permitindo a atuação das bactérias anaeróbias. Apenas na 10ª semana, quando a produção de biogás se encontra bem próxima de zero, a concentração de oxigênio começa a aumentar, indicando assim uma redução da comunidade anaeróbia (Fig. 2). As bactérias metanogênicas, responsáveis pela produção do metano, são essencialmente anaeróbias, ou seja, é necessário que o oxigênio seja consumido durante o processo, para que haja a produção de metano nos biodigestores (Barbosa & Langer, 2011).

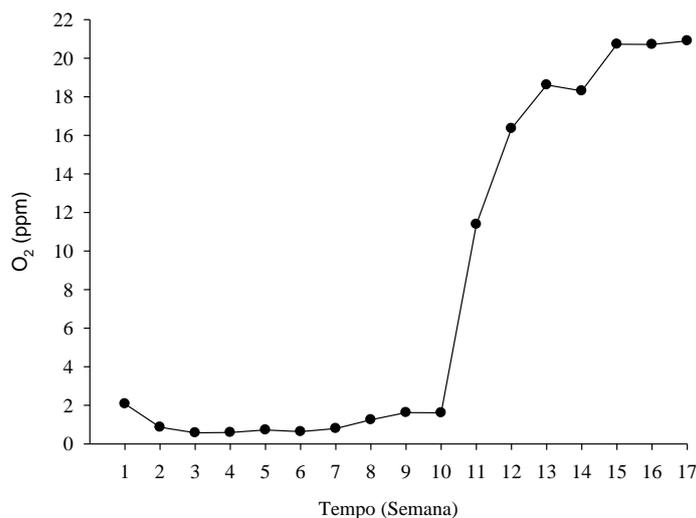


Figura 6 - Oxigênio produzido em biodigestor indiano abastecido com lodo de esgoto.

3. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que o processo de biodigestão anaeróbia do lodo de esgoto proveniente das Estações de Tratamento de Esgoto demonstrou ser uma alternativa promissora de destinação, com produção elevada de biogás e antecipação do pico de produção na utilização de diferentes substratos.

Agradecimentos

À Estação de Tratamento de Esgoto da Penha – RJ da Companhia Estadual de Água e Esgoto (Nova CEDAE) por fornecer o substrato para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Andrade, R. W. N.; Bento, A. B. F.; Silva, J. M.; Rocha, E. M. R., 2015. Avaliação de lodo anaeróbio da ETE de João Pessoa - PB como potencial inóculo para partida de digestores anaeróbios de resíduos sólidos orgânicos. In: VI Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, Porto Alegre.
- APHA; AWWA; WPCF, 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21th Edition. Washington. American Public Health Association, American Water Woks Association, Water Environment Federation.
- Argonese A. R.; Campos A. T.; Welter R. A., 2007. Potencial de redução de emissão de equivalente de carbono de uma unidade suinícola com biodigestor, Revista Engenharia Agrícola, vol. 27, n.3, pp.648-657.
- AVATEC. Limite Inferior de Explosividade. Disponível em: <http://www.avatec.com.br/manual_periculo_inflamaveis018.htm>. Acesso em: 18 de Junho de 2017.
- Ayers, R.S.; Westcot, D.W., 1999. FAO. A qualidade da água na agricultura, Estudos FAO irrigação e drenagem, Organização das Nações Unidas para a Agricultura e alimentação, Campina Grande – PB: UFPB, n.29, pp. 218.
- Barbosa, G; Langer M., 2011. Unoesc & Ciência – ACSA, Joaçaba, vol. 2, n. 1, pp. 87-96.
- Barrera, P., 1993. Biodigestores - Energia, Fertilidade e Saneamento para Zona Rural, São Paulo, Editora Ícone.
- Carneiro, P. H.; Souto, G. D. de B.; Povinelly, J., 2005. Digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos em sistema de duas fases utilizando mistura de percolado de aterro sanitário e lodo anaeróbio como inóculo. In: XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Campo Grande.

- Carvalho, T.; Antunes, M.N., 2006. Créditos de carbono e geração de energia com uso de biodigestores no tratamento de dejetos suínos, *Revista Acadêmica Ciência Animal*, vol.4, n.3, pp. 23-32.
- CONAMA 375/06. Resolução CONAMA 375, de 29 de agosto de 2006. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf>>. Acessado em: 27 de maio de 2017.
- CONAMA 430/11. Resolução CONAMA 430, de 26 de junho de 2011. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>. Acessado em: 27 de maio de 2017.
- Córdoba, VOL.; Fernández, M.; Santella, E., 2016. The effect of diferente inoculums on anaerobic digestion of swine wastewater, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 4, pp. 115-122.
- Giacobbo, G.; Zenatti, D. C.; Feiden, A.; Blanco, M. F. de J.; Tietz, C. M.; Weber, R., 2013. Influência da variabilidade da temperatura ambiente na co-digestão anaeróbia de dejetos de bovinocultura de leite e cama de aviário, *Acta Iguazu*, vol. 2, pp. 55-69.
- IBGE. Esgotamento sanitário. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/defaulttabpdf_esgot_san.shtm>. Acessado em: 08 de janeiro de 2017.
- Khalid, A.; Arshad, M.; Anjum, M.; Mahmood, T.; Dawson, L., 2011. The anaerobic digestion of solid organic waste, *Waste Management*, vol. 31, n. 8, pp. 1737-1744.
- Koszel, M.; Lorencowics, E., 2015. Agricultural use of biogas digestate as a replacement fertilizers, *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, vol.7, pp. 119-124.
- Lopes, W. S.; Leite, VOL. D.; Prasad, S., 2004. Influence of inoculum on performance of anaerobic reactors for treating municipal solid waste, *Bioresource Technology*, vol. 94, pp. 261-266.
- Maamri, S.; Amrani, M., 2014. Biogas production from waste activated sludge using cattle dung inoculums: effect of total solid contents and kinetics study, *Energy Procedia*, vol. 50, pp. 352 – 359.
- Malinowsky, C., 2016. Tratamento dos resíduos sólidos orgânicos da ufsc através de biodigestor anaeróbio, *Dissertação de Mestrado, PPGEA, UFSC, Florianópolis*.
- Matos, C. F.; Paes, J. L.; Pinheiro, E. F. M.; Campos, D. V. B., 2017a. Produção de biogás a partir de dejetos de bovinos de leite, sob sistema orgânico e convencional de produção, *Revista engenharia agrícola*, vol. 37, n. 6, pp. xxx.
- Matos, C. F.; Pinheiro, E. F. M.; Paes, J. L.; Lima, E.; Campos, D. V. B., 2017b. Avaliação do potencial de uso de biofertilizante de esterco bovino resultante do sistema de manejo orgânico e convencional da produção de leite, *Revista Virtual de Química*, vol. 9, n. 5, pp. xxx.
- Orrico Júnior, M. A. P.; Orrico, A. C. A.; Lucas Júnior, J. de., 2010. Influência da relação volumoso: concentrado e do tempo de retenção hidráulica sob a biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos, *Engenharia Agrícola*, vol.30, n.3, pp.386-394.
- Otoboni A.M.M.B; Xavier D.O.; Giannoni J.A.; Travaglini M.; Nunes M.M.; Jorge P.S.; Pardo R.B.; Moreira J.P., 2016. *Unimar Ciências*, vol. 25, n. 1-2, pp. 14-19.
- Paes J.L.; Matos C. F.; Fernandes P.L.B.G.; Bruggianesi G.; Queiroz C. K. de, 2017. Estudo da biodigestão anaeróbica de dejetos de suíno submetidos a diferentes tempos de retenção hidráulica. In: *XLVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola*, Maceió.
- Pecora, V., 2006. Implementação de uma Unidade Demonstrativa de Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás de Tratamento do Esgoto Residencial da USP: estudo de caso, *Dissertação de Mestrado, PIPGE, USP, São Paulo*.
- Pedroza, M. M., Vieira, G. E. G., Sousa, J. F., Pickler, A. C., Leal, E. R. M., Milhomen, C.C., 2010. Produção e Tratamento de Lodo de Esgoto – Uma Revisão, *Revista Liberato*, vol. 11, n.16, pp.89-XX.
- Quadros, D. G. de; Oliver, A. de P. M.; Regis, U.; Valladares, R.; Souza, P. H. F. de; Ferreira, E. de J., 2010. Biodigestão anaeróbia de dejetos de caprinos e ovinos em reator contínuo de PVC flexível, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol.14, pp.326–332.
- Sánchez-Hernández, E.P.; Weiland, P.; Borjab, R., 2013. The effect of biogas sparging on cow manure characteristics and its subsequent anaerobic biodegradation, *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 83, pp. 10-16.
- Silva, W. T. L. da; Novaes, A. P. de; Kuroki, VOL.; Martelli, L. F. de A.; Magnoni Júnior, L., 2012. Avaliação físico-química de efluente gerado em biodigestor anaeróbio para fins de avaliação de eficiência e aplicação como fertilizante agrícola, *Quim. Nova*, vol. 35, pp. 35-40.
- Silva, L. L.; Alves, M. S.; Silva, VOL. C.; Rocha, A. L., 2009. Princípios de termoelétricas em pequenas propriedades rurais. In: *International Workshop Advances In Cleaner Production*, São Paulo.
- Soria F., M. de J.; Cerrato, R. F.; Barra, J. E.; González, G. A.; Santos, J. T.; Gómez, J. B.; Pérez, G. P., 2001. Producción de biofertilizantes mediante biodigestión de excreta líquida de cerdo, *Terra Latinoamericana*, vol. 19, pp. 353-362.
- Sousa, G. G. de; Lima, F. A.; Gomes, K. R.; Viana, T. VOL. de A.; Costa, F. R. B.; Azevedo, B. M. de; Martins, L. F., 2014. Irrigação com água salina na cultura do amendoim em solo com biofertilizante bovino. *Nativa*, vol. 2, pp. 89-94.
- Tavares, S. G.; Feiden, A.; Correia, A. F.; Soares, C. M. T.; Gregolin, M. R. P., 2016. Influência das variações térmicas e climáticas na produção de biogás, *Nativa*, vol.4, pp.287-295.
- Ward, A.J., Hobbs, P.J., Holliman, P.J., Jones, D.L., 2008. Optimization of the anaerobic digestion of agricultural resources, *Bioresource Technology*, v.99, n.17, pp.7928–7940.

- Xavier, C. de S. A. N.; Lucas Júnior, J. de., 2010. Parâmetros de dimensionamento para biodigestor batelada operados com dejetos de vacas leiteiras com e sem uso de inóculo, Engenharia. Agrícola, vol. 30, n.2, pp. 212-223.
- Yorgos, R., 2012. Detecção de Gases. Técnicas de Medição em Espaços Confinados. Disponível em: <<http://www.yorgos.com.br/noticia/materias>>. Acesso em: 01 de junho de 2017.

CHARACTERIZATION OF BIOGAS PRODUCTION FROM BIODIGESTION OF SEWAGE SLUDGE

Abstract. *With the increasing concern about conservation of environmental resources and the reduction of the impacts, began a search for another ways of energy production. Among technologies that could be adopted for clean energy production, there are biodigesters. The aim of this senior thesis is the characterization of the anaerobic sludge of Sewage Treatment Station of Penha - RJ in order to propose a sustainable alternative for the final destination of the sewage sludge. In the experiment, workbench Indian models biodigesters were used in batch system during 138 days. The anaerobic digestion process had its efficiency evaluated by correlating physical-chemical and microbiological analysis. On biogas, were evaluated the production, the energetic potential and the composition. In regard to the physical-chemical analysis, pH levels kept within the ideal range during the process, electric conductivity increased at the same time total solid decreased, confirming the organic compounds reduction. The anaerobic biodigestion lead to elevated biogas production and the anticipation of the highest production rates. According to the results obtained, it can be concluded that the implementation of biodigesters in Sewage Treatment Station could be considered a promising alternative for the final destination of anaerobic sludge.*

Key words: *clean energy, biodigester, waste treatment.*