



Influência das variações térmicas e climáticas na produção de biogás

Sidnei Gregorio TAVARES^{1*}, Armin FEIDEN¹, Arlindo Fabrício CORREIA²,
Caroline Monique Tietz SOARES¹, Marcos Roberto Pires GREGOLIN³

¹ Centro de Ciências Agrárias, Universidade do Oeste Paranaense, Marechal Rondon, Paraná, Brasil.

² Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil.

³ Núcleo de Extensão em Desenvolvimento Territorial, Universidade Federal da Fronteira Sul, Chapecó, Santa Catarina, Brasil.

* E-mail: sidigt@yahoo.com.br

Recebido em fevereiro/2015; Aceito em julho/2016.

RESUMO: O experimento foi realizado na Estação Experimental, que pertence à UNIOESTE – *Campus* de Marechal Cândido Rondon, no período de 29 de Julho à 01 de Dezembro de 2013. O objetivo foi verificar a influência das variações térmicas e climáticas na produção de biogás. O biodigestor experimental de fluxo contínuo modelo BioKöhler, com capacidade útil de 19,56 m³, foi alimentado diariamente com dejetos de bovinos e com 30 kg de cama de aviário. Foram mensurados diariamente o volume e densidade dos dejetos de bovinos e o volume de biogás. As temperaturas internas foram registradas a cada 15 min e o restante das informações foram adquiridas da estação meteorológica que se encontra ao lado do biodigestor. Avaliando os resultados obtidos observou-se que há correlação positiva em todos os fatores avaliados. A temperatura externa e interna, a precipitação pluviométrica e a radiação solar interferem na produção de biogás, porém, a interferência da precipitação pluviométrica foi considerada não significativa, e a temperatura interna do biodigestor é o fator com maior influência na produção de biogás. Foi possível produzir diariamente, em média, 10 m³ de biogás com a adição diária de 36 kg de sólidos voláteis em um tempo de retenção hidráulico de 37 dias.

Palavras-chave: biodigestor, temperatura, dejetos.

Influence of termic and climate variations in biogas production

ABSTRACT: The experiment was conducted at the Experimental Station, which belongs to UNIOESTE - *Campus* Marechal Cândido Rondon, from July 29 to December 1st, 2013. The goal was to verify the influence of termic and climate variations in the production of biogas. The continuous flow biodigester BioKöhler model, with useful capacity of 19.56 m³, was daily fed with cattle manure and 30 kg of poultry litter. There were daily measured the volume and density of the manure of cattle and the volume of biogas. Internal temperatures were recorded every 15 minutes and the rest of the information was acquired from weather station which is next to the digester. Evaluating the results, it was observed that there is a positive correlation in all the evaluated factors. External and internal temperatures, pluviometric precipitation and solar radiation interfere in the production of biogas, but the interference of pluviometric precipitation was determined to be negligible and the temperature inside the biodigester is the factor with the greatest influence in the production of biogas. It was possible to produce daily average of 10 m³ of biogas with the daily addition of 36 kg of volatile solids in a hydraulic retention time of 37 days.

Keywords: biodigester, temperature, manure.

1. INTRODUÇÃO

Mesmo que as taxas de crescimento venham diminuindo desde o final da década de 1970, a população mundial duplicou desde esse tempo para 6,9 bilhões, e está projetada para aumentar consideravelmente nas próximas décadas (FAO, 2012). A expectativa é de ultrapassarmos nove bilhões de pessoas em 2050, sendo que com isso a demanda global por alimentos e energia também aumentarão, seguindo a lógica do crescimento populacional, ou seja, será necessário produzir mais energia e mais comida. Segundo Baron (2011), aproveitar a energia renovável e

de maneira descentralizada é essencial para o desenvolvimento humano e o futuro sustentável do Planeta. Devemos pensar e desenvolver tecnologias que melhorem a vida das pessoas em todos os continentes. As diferentes formas de produção da energia devem servir para que os indivíduos tenham acesso à energia, independentemente do local que residem e das condições socioeconômicas. Apesar dos avanços tecnológicos, uma parcela grande da população mundial não tem essa oportunidade devido às condições de pobreza que se encontram.

A necessidade de geração de fontes alternativas de energia é um fator crucial para alcançar a sustentabilidade ambiental.

Leite (1997) afirma que a questão energética assume o caráter de desafio para os países em desenvolvimento, quando se constata que os 850 milhões de habitantes das nações desenvolvidas de economia de mercado consomem mais da metade de energia do mundo, e que já atinge mais de oito bilhões de toneladas equivalentes de petróleo (tEP) por ano. Constata ainda que nos países em desenvolvimento como no Brasil, que ainda não atendeu às necessidades elementares de grande parte de sua população, o crescimento da demanda de energia tende a permanecer elevado.

A problemática econômica, estimulada pela alta do preço do petróleo, alertou o mundo diante desta questão grave que se apresentava ao cenário econômico mundial. Porém outra grande questão se deu por meio de um novo conceito de “Desenvolvimento Sustentável” dizendo que, segundo o relatório de Brundtland (1987): “*o atendimento às necessidades do presente não pode comprometer o atendimento às necessidades das gerações futuras*”. A comunidade científica mundial alertou o planeta apresentando indicadores sobre catástrofes ambientais, teoricamente causadas pela liberação na atmosfera dos gases de efeito estufa (GEE), que são lançados até hoje pela matriz energética baseada nos combustíveis fósseis. Outras fontes geradoras de GEE são dos dejetos que, quando não tratados corretamente, possuem elevado potencial poluidor, não só pela liberação de gases poluentes como também pelo excesso de matéria orgânica que, se entrar em contato com água dos rios, pode provocar desequilíbrios ecológicos gigantescos.

Ao final da década de 80, as Nações Unidas criaram o Protocolo de Quioto, impondo regulamentação aos países desenvolvidos, estabelecendo limites de emissão de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O). Diante desta problemática surge um movimento voltado para as fontes alternativas de energias renováveis, proporcionando o surgimento de novas formas de se obter energia de forma sustentável e limpa como a energia eólica, a energia solar, bioenergia, entre outras. Santos (2004) analisa que, de forma geral, a maioria dos sistemas de produção – energética, alimentar, industrial, por exemplo – é consumidor ativo de energia elétrica e afirma ainda que, como todo processo de produção, produz resíduo. Sendo que todo resíduo armazena alguma energia, e que alguns sistemas de produção podem reverter esses resíduos em energia, pode-se então baratear seu custo de produção e funcionar de forma energeticamente equilibrada.

Uma das opções para a produção de energia renovável que vem apresentando resultados favoráveis e já difundido em vários países é a utilização do biogás. Apesar de ser conhecido há muito tempo, só mais recentemente os processos de obtenção de biogás vêm se desenvolvendo, aprimorando ou se industrializando para fins energéticos. A ideia da produção de biogás nas propriedades rurais se associa ao atendimento dos objetivos citados na Agenda 21 (D.O.U., 1995): a) proporcionar maior conforto ao rural, permitindo-lhe dispor de um combustível prático e barato que tanto poderá ser usado para fins de calefação e iluminação, como ainda para acionar pequenos motores estacionários de combustão interna; b) contribuir para a economia do consumo de petróleo, pois o biogás é um combustível proveniente de fontes alternativas; c) produzir biofertilizante que é um resíduo rico em nutrientes que pode ser utilizado na fertilização do solo para aumentar a produtividade dos cultivos face ao seu baixo custo de obtenção; d) contribuir para a preservação do meio

ambiente pela produção de biogás, o que consiste na reciclagem de dejetos e resíduos orgânicos poluentes e diminuição do potencial poluidor dos dejetos.

Segundo Galinkin e Bley (2009) para que ocorra o tratamento de resíduos sólidos e efluentes, subprodutos orgânicos da produção rural, torna-se necessário submetê-los a um processamento como, por exemplo, a biodigestão que é composta por uma fase anaeróbia – sem a presença de oxigênio ou concentrações muito reduzidas – nos chamados biodigestores, durante um determinado tempo de retenção hidráulica, objetivando-se obter a redução da carga orgânica bruta do efluente a partir da ação de micro-organismos especializados.

O biogás pode ser obtido pela digestão de resíduos agrícolas, ou até mesmo de excrementos de animais e de seres humanos. Segundo Souza (2005) o biogás, que é formado principalmente por metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), gás amônia (NH_3), sulfeto de hidrogênio (H_2S) e nitrogênio (N_2), tem sido usado com frequência, principalmente na Europa, em substituição ao gás natural que tem se tornado de difícil obtenção.

A digestão anaeróbia é um processo bioquímico complexo, composto por várias reações sequenciais, cada uma com sua população microbiana específica. Para a digestão anaeróbia de material orgânico complexo, como proteínas, carboidratos e lipídios, podem-se distinguir quatro etapas diferentes no processo global da conversão (FORESTI, 1994).

Na primeira etapa, a matéria orgânica complexa é degradada em compostos mais simples como açúcares, ácidos graxos e aminoácidos, sofrendo a ação dos micro-organismos hidrolíticos. Na segunda etapa as bactérias acidogênicas degradam os açúcares e ácidos em compostos mais simples como ácidos graxos de cadeia curta, ácido acético, H_2 e CO_2 . Na terceira etapa, estes produtos são transformados principalmente em ácido acético, H_2 e CO_2 , pela ação das bactérias acetogênicas. Por fim, na última etapa, as arqueas metanogênicas transformam esses substratos em CH_4 e CO_2 (HAMMER, 1996).

Segundo Oliveira (2009), a eficiência da digestão anaeróbia pode ser seriamente afetada por fatores que estão relacionados com o substrato, com as características do digestor ou com as condições de operação e ambientais, por exemplo: o tipo de biomassa, o modelo do biodigestor, a quantidade/volume de biomassa, manejo, perfil de micro-organismos, acidez e a temperatura.

Dos fatores físicos que afetam o crescimento microbiano, a temperatura é um dos mais importantes na seleção das espécies. Os micro-organismos não possuem meios de controlar a sua temperatura interna que é determinada pela temperatura ambiente externa (ISOLDI et al., 2001). Segundo Chernicharo (2007) a multiplicação microbiana geralmente está associada à três faixas de temperatura onde o crescimento é possível: psicrófila (entre 0 e 20°C), mesófila (entre 20 e 45°C) e a termófila (entre 45 e 70°C). Este mesmo autor afirma ainda que em cada uma dessas faixas são associados três valores de temperatura para caracterização da multiplicação dos micro-organismos: temperaturas máximas e mínimas que definem os limites da faixa de temperatura em que a multiplicação é possível e a temperatura ótima onde a multiplicação é máxima. A multiplicação microbiana em temperaturas próximas à mínima é baixa, mas aumenta exponencialmente com o acréscimo da temperatura, atingindo o máximo próximo à temperatura ótima, e caindo abruptamente com um aumento de alguns poucos graus.

De acordo com Singh (1994) existem basicamente duas faixas de temperatura que apresentam condições ótimas para a produção de biogás (metano). A primeira é a faixa mesofílica que está entre 20 – 40 °C e a temperatura ótima está entre 30 – 35 °C. E a segunda faixa é a termofílica que fica entre 50 – 60 °C. O autor ainda cita que os sistemas mesofílicos são muito sensíveis à variação da temperatura ambiente, podendo parar a produção de biogás no período de inverno em climas mais frios.

Bouallagui et al. (2004) reportam que a digestão anaeróbia em processos termofílicos produzem até 41% a mais de biogás que os processos mesofílicos e 144% a mais que os processos psicofílicos.

No Censo Agropecuário (IBGE, 2006) foram identificados 4.367.902 estabelecimentos de agricultura familiar, representando 84,4% do total dos estabelecimentos rurais dentro do país. Neste mesmo censo foi detectado que a agricultura familiar era responsável por 87% da produção nacional de mandioca, 70% da produção de feijão, 46% do milho, 38% do café, 34% do arroz, 58% do leite, 59% do plantel de suínos, 50% das aves, 30% dos bovinos e, ainda, 21% do trigo. Esses dados demonstram a força que possuem as pequenas propriedades tanto na questão social, por manter a população no campo e estimular uma distribuição de riquezas descentralizada, como também na produção de alimentos ao contribuir com a segurança alimentar do país. Porém há ainda uma grande dificuldade de auxiliar estas famílias e suas pequenas propriedades no que diz respeito à implantação de tecnologias como, por exemplo, a implantação de biodigestores, compostagens e suas respectivas técnicas de manejo, pois muitas destas ferramentas são fabricadas numa visão mais intensiva de produção, ou seja, para grandes propriedades que possuem um capital de giro maior para fazer investimentos.

Os agricultores familiares enfrentam a escassez de fontes energéticas para fins produtivos e residenciais. Na maioria das áreas rurais a disponibilidade dos combustíveis mais limpos para cocção é intermitente ou não existe, devido à falta de infraestrutura de distribuição e comercialização, além de ser relativamente mais oneroso que os combustíveis tradicionais disponíveis nessas áreas (SANGA, 2004).

Analisando esta realidade, o biodigestor Bioköhler, por ser uma tecnologia de baixo custo, devido aos materiais utilizados e a simplicidade de instalação, pode ser considerado como uma boa alternativa, na obtenção de energia limpa (biogás) e biofertilizante, por meio da fermentação anaeróbia, realizada em câmaras de biodigestão, além de contribuir para a redução da contaminação ambiental.

A Bioköhler é uma empresa de biodigestores que atua no ramo de instalação de biodigestores e indústria e comércio de equipamentos para utilização do biogás, além de assistência técnica, sendo que está localizada no município de Marechal Cândido Rondon – PR e está no ramo de produção de biodigestores e equipamentos acessórios desde de 2010.

A empresa fornece ainda serviços de instalação de equipamentos que utilizam o biogás como fonte de energia para aquecimento de frangos, impermeabilizações de lagoas, agitadores de 6 e 10 cv, biodigestores modelos canadense e convencional com flare (equipamento utilizado para queimar o biogás), biodigestor em fibra de vidro e o de mistura completa.

Diante do exposto, o objetivo da pesquisa foi avaliar como as variações climáticas (temperatura, índices de chuvas e radiação solar), podem interferir na temperatura interna do biodigestor e, conseqüentemente, na eficiência da produção de biogás nos biodigestores Bioköhler.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Coleta de dados

Os dados para a pesquisa foram coletados a partir do dia 29 de julho de 2013, sendo que o biodigestor já vinha sendo alimentado com a mesma carga orgânica média (e com os mesmos tipos de biomassa) desde março de 2013 e, justamente por isso, não houve necessidade de efetuar um período de adaptação do mesmo, pois o biodigestor já estava adaptado. E os dados coletados foram obtidos até o dia 1º de dezembro de 2013.

O local de pesquisa foi a Estação Experimental Prof. Dr. Antônio Carlos dos Santos Pessoa, situada na Linha Guará do município de Marechal Cândido Rondon - PR, pertencente ao Núcleo de Estações Experimentais da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – *Campus* de Marechal Cândido Rondon.

Nesta estação experimental encontra-se o biodigestor da marca Bioköhler (Figura 1), com câmara de biodigestão em fibra de vidro, formada pela união de duas caixas d'água de 10.000 litros cada, sendo a parte inferior uma caixa d'água convencional e a parte superior outra caixa d'água com a parte mais alta (topo) em um formato mais arredondado, contendo uma saída para manutenção, permitindo a abertura da mesma em caso de necessidade. Ambas as caixas têm seu material reforçado em função da pressão hidráulica do líquido e do gás. A câmara de biodigestão tem capacidade de 20 m³, com volume útil de 19,56 m³, instalada no sentido vertical e possui sistema de alimentação contínuo.

Uma das partes (caixa d' água inferior) é totalmente enterrada e a outra caixa d'água fica acima da superfície do solo. A canalização dos dejetos e do biogás é subterrânea para proteção contra o sol, chuva e de possíveis impactos que venham a danificá-la.

Na estação experimental há também um tambo leiteiro, com aproximadamente 24 vacas leiteiras e novilhas da raça holandesa e mais alguns bezerras, todos alimentados com pastagem, silagem, feno e ração, sendo que os dejetos oriundos da limpeza (com água não tratada) do tambo são canalizados por diferença hidráulica para um reservatório onde foram mensurados o volume e densidade, antes de entrarem no biodigestor. Estas medidas foram necessárias para saber quanto de matéria orgânica entrou no biodigestor. Além do dejetos de bovinos, era misturado 30 kg de cama de aviário. Esse processo era realizado diariamente no período da tarde, logo após a limpeza do tambo (aproximadamente as 17h00).



Figura 1. Biodigestor modelo Bioköhler na estação experimental (UNIOESTE).

Figure 1. Biodigestor Bioköhler model in experimental station (UNIOESTE).

Para analisar a densidade dos dejetos bovinos era utilizado um densímetro para massa específica, escala de 1,000 a 1,100 g mL⁻¹, aferido a 20 °C. O procedimento consistiu em homogeneizar os dejetos que estavam dentro do reservatório e posteriormente coletar uma amostra que era colocada dentro de um cilindro de PVC e, logo após, mergulhado o densímetro no dejetos de bovinos. Após estabilização do densímetro na biomassa era registrada a densidade. Este procedimento era realizado diariamente.

Para calcular o volume de dejetos bovinos adicionados diariamente era anotado o nível de entrada e de saída. A partir dos dados de nível era possível calcular o volume adicionado diariamente. O cálculo do volume era feito por meio da Eq. 1:

$$V = \pi \times r^2 \times p \quad (1)$$

em que: V o volume; $\pi = 3,1415926$; r o raio;(Caixa de entrada tem diâmetro de 1 metro, sendo o $r = 0,5$ metros); p a profundidade;(Diferença entre a medida inicial e após alimentar o biodigestor).

As coletas para análises de sólidos foram realizadas três vezes por semana, tanto na caixa de entrada (dejetos) como na saída do biodigestor (biofertilizante), sendo que as amostras foram acondicionadas em garrafas PET e armazenadas em um congelador para que posteriormente fossem feitas as análises no Laboratório da Fundação para o Desenvolvimento Científico e Tecnológico de Toledo (FUNTEC).

O método utilizado para determinação de sólidos foi o estabelecido pela APHA (2009), sendo o método 2540-B correspondente aos sólidos totais; e o 2540-E aos sólidos fixos e voláteis.

Quanto ao cálculo (Eq. 2) do tempo de retenção hidráulica (TRH), tem-se:

$$-TRH(m^3 d^{-1}) = \frac{\text{Vol. Bio.}}{\text{Vaz. Dia.}} \quad (2)$$

em que: Vol. Bio o volume do biodigestor (m³); Vaz. Dia a vazão média diária (m³).

Nos dias que foram coletadas as amostras, os cálculos para estimar a quantidade, em quilogramas (kg), foram efetuados como comentado anteriormente. Porém para os dias em que não foram coletadas amostras era feita estimativa relacionando a densidade do material.

Ao lado do biodigestor há uma pequena sala onde estão instalados alguns equipamentos como compressor, painel de controle e um registrador eletrônico de temperatura FieldLogger da marca Novus com precisão de ± 1 °C. Este registrador estava programado para coletar e armazenar as informações das temperaturas internas do biodigestor em intervalos de 15 minutos. Essa temperatura interna foi medida com o auxílio de três termopares, sendo o termopar superior posicionado a 80 cm abaixo do nível máximo da biomassa em fermentação, o intermediário ou médio a 2,50 m e o inferior a 4,20 m, conforme Figura 2.

Além dos dados do volume e densidade dos dejetos que alimentaram o biodigestor, e da temperatura interna do mesmo, foram utilizados os dados da temperatura externa (do ambiente natural), sendo que estes dados foram obtidos da Estação Climatológica Automática de Marechal Cândido Rondon – PR, Código A 820, que está localizada ao lado da Estação Experimental. Os dados utilizados foram: temperaturas máxima, média e mínima do ar, radiação solar e índice de chuvas.

O volume de biogás produzido foi mensurado diariamente, antes da alimentação do biodigestor por meio de um medidor de gás, que foi instalado na estação experimental, modelo G 0,6 fabricado pela LAO Indústria.

2.2. Análises estatísticas

Quanto às análises estatísticas, cada dia foi considerado um tratamento e cada semana um bloco, sendo que foi possível analisar 16 blocos com sete tratamentos em cada bloco. Os dados referentes às variáveis analisadas foram submetidos à

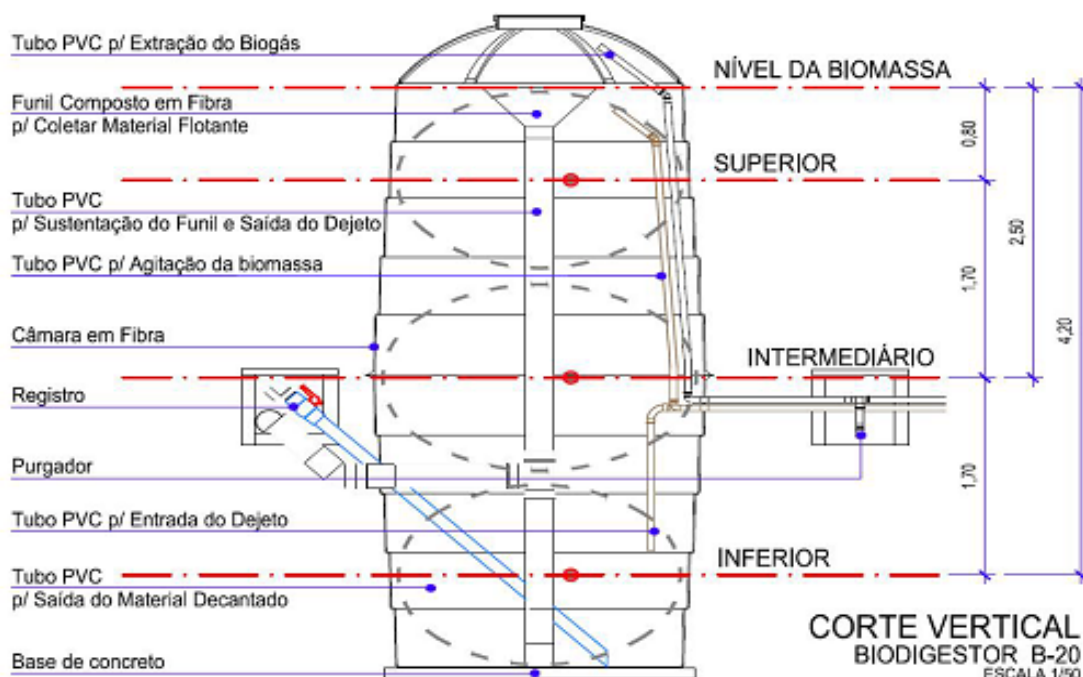


Figura 2. Região superior, intermediária e inferior da medição da temperatura interna do biodigestor (Tietz,2013).
Figure 2. Top, middle and lower Regions of measuring the internal temperature of the digester (Tietz, 2013).

análise de variância univariada e teste de médias (FERREIRA, E. B., CAVALCANTI, P. P., NOGUEIRA, D. A., 2013). Após a realização da análise de variância levou-se em consideração a significância dos fatores sobre as variáveis analisadas realizando-se a análise de correlação. Para verificar a incidência de correlação entre as variáveis foi aplicado o teste de correlação de Spearman para matriz de dados representativa à época de coleta (MENDIBURU, 2013). Todas as análises univariadas e de correlação foram efetuadas sob ambiente R (R CORE TEAM DEVELOPMENT, 2013) a 5% de significância de erro.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O tempo médio de retenção hidráulico (TRH) encontrado durante o período do experimento foi de trinta e sete (37) dias. Estimou-se que a carga orgânica total, adicionada diariamente, foi de aproximadamente 565 kg de matéria natural (dejetos de bovinos mais os 30 kg de cama de aviário), sendo que 52,6 kg correspondem aos sólidos totais e, destes 52,6 kg, 36 kg correspondem aos sólidos voláteis e o restante 16,6 kg de sólidos fixos, os 512,4 kg restantes correspondem a água (Figura 3). A composição dos 30 kg da cama de aves (Figura 4), que faz parte da carga orgânica total, foi de 20% de umidade, 50% de sólidos voláteis e 30% de cinzas ou sólidos fixos. Quanto à composição dos dejetos bovinos depende muito da diluição do mesmo e, justamente por isso, houve grande variação no período.

É importante salientar que houve um problema com o equipamento que media o volume diário de biogás produzido no período que corresponde de 16/09/2013 a 29/09/2013, portanto, este período não foi considerado para análise dos dados, como é possível perceber em alguns gráficos ou tabelas.

A produção média diária de biogás foi de 10,021 m³. A produção máxima chegou a 20,52 m³ e a mínima chegou a muito próximo de zero (Figuras 5). A temperatura do ar média diária foi de 21,3 °C. A temperatura média mínima diária foi de 15,6 °C, sendo que a temperatura mínima do ar, durante todo o experimento, foi de 0,7 °C. Já a temperatura máxima do ar encontrada foi de 36 °C (Figura 5), demonstrando a grande variabilidade térmica típica daquela região.

A maior incidência de radiação solar foi de 31.702,574 KJ/m², já a menor foi de 2.030,752 KJ/m², sendo que a média foi de 19.717,1106 KJ/m². A precipitação média diária no período foi

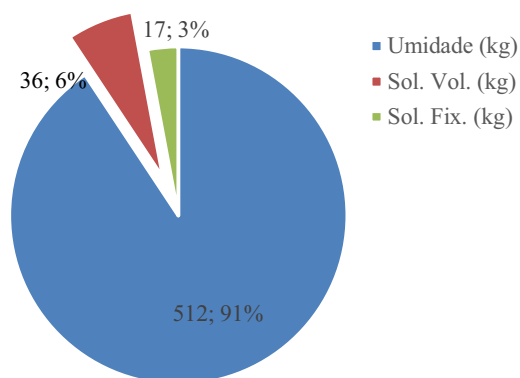


Figura 3. Composição da matéria natural média adicionada diariamente.

Figure 3. Average composition of natural material added daily.

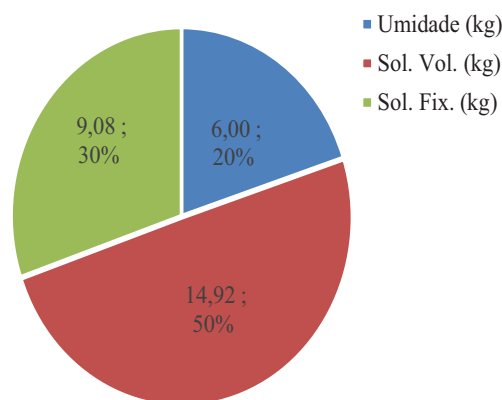


Figura 4. Composição da cama de aviário.

Figure 4. Composition of poultry litter.

de 3 mm, e a máxima chegou a 62,4 mm por dia, sendo que essa grande variação é normal, pois houve dias que não ocorreram precipitação nenhuma e outros dias com precipitação o dia todo.

Em relação ao monitoramento da temperatura observada no termopar posicionado na parte superior a temperatura máxima foi de 42,97 °C e a mínima foi de 8,44 °C, sendo que a temperatura média foi de 27,68 °C. No termopar posicionado na porção intermediária ou média a temperatura máxima foi de 36,89 °C e a mínima foi de 4,7 °C, sendo que a temperatura média foi de 24,31 °C. No termopar posicionado na porção inferior a temperatura máxima foi de 36,88 °C e a temperatura

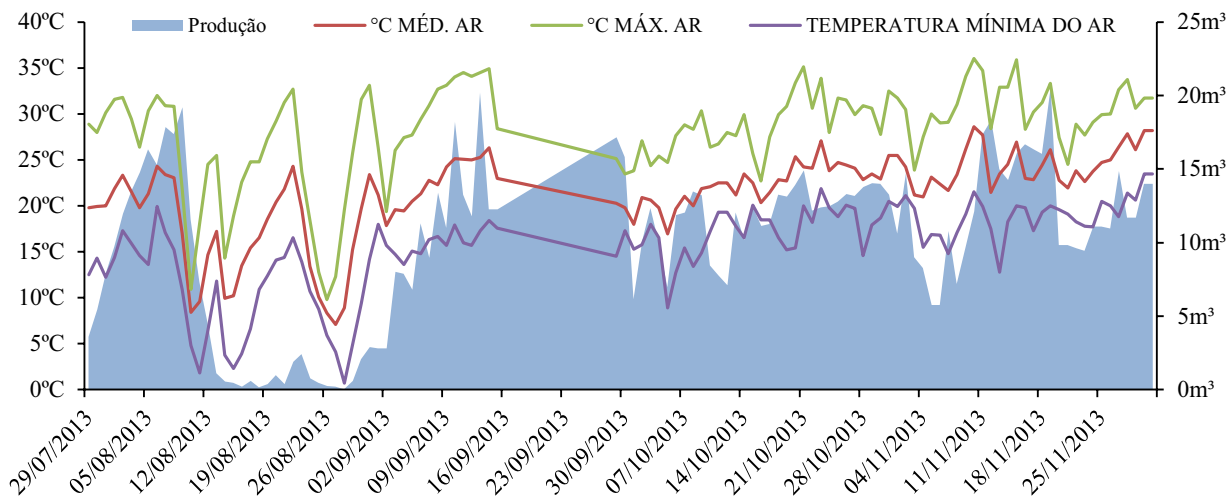


Figura 5. Volume de biogás produzido em m³ e temperaturas mínimas, máximas e média do ar durante o período do experimento.

Figure 5. Biogas volume produced in m³ and minimum temperatures, maximum and average air during the experimental period.

mínima foi de 5,54 °C, sendo que a temperatura média foi de 24,51 °C (Figura 6). Estas variações das temperaturas internas do biodigestor ocorreram devido, principalmente, às variações das temperaturas externas ao biodigestor como também devido às variações das taxas de radiação e precipitação, como veremos na tabela de correlações de Spearman (Tabela 1) a seguir. Outro dado interessante que foi possível verificar é que não há muita variação das temperaturas médias nas regiões média e inferior do biodigestor, mas na porção superior a temperatura média permaneceu aproximadamente 3 °C acima das demais regiões, sendo que essa informação pode embasar a afirmação de que na região superior do biodigestor é onde ocorre a maior atividade microbiana em relação às outras regiões (Figura 6).

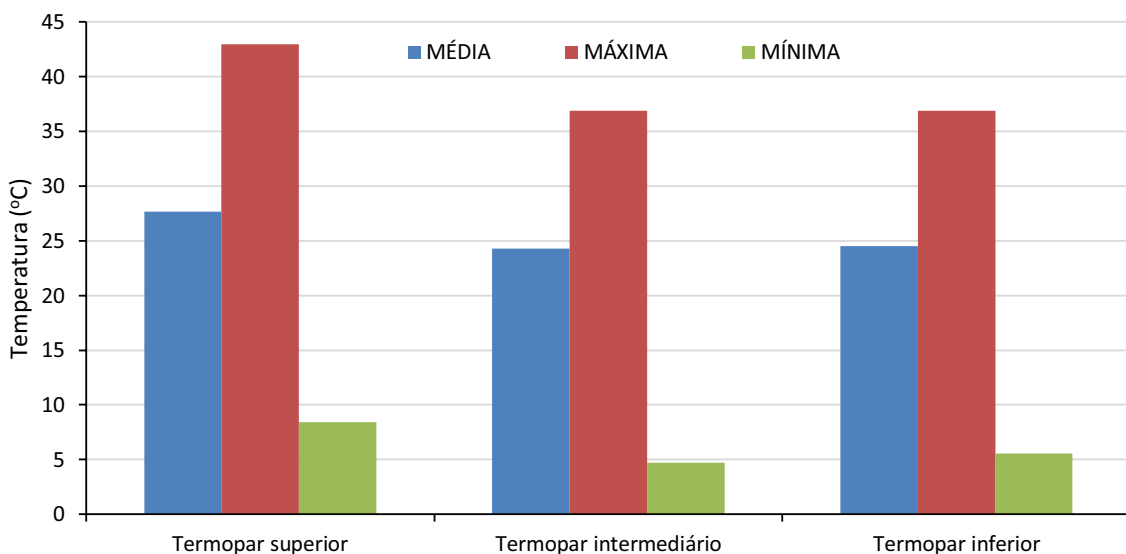
Foram feitas análises estatísticas para determinar a correlação dos fatores envolvidos com a produção de biogás (Tabela 1). Foi possível perceber que há correlação positiva em todos os fatores, porém, para a precipitação e alimentação (que inclui a adição de matéria natural, sólidos totais e sólidos voláteis) a correlação não foi significativa. Esperava-se que houvesse influência significativa quanto à incidência de chuva na produção de biogás, mas essa hipótese foi eliminada pela análise de correlação de Spearman e esperava-se que não houvesse influência significativa da alimentação, mesmo porque o objetivo da alimentação diária era de ser a mais homogênea possível, para que não houvesse influência da alimentação na produção de biogás. É possível perceber que tanto a temperatura do ar como a temperatura interna do biodigestor possuem correlação positiva alta em relação à produção de biogás. A radiação influencia significativamente na produção de biogás, porém não tanto quanto aos fatores citados anteriormente.

Considerando as correlações de Spearman, foi possível determinar as variáveis mais importantes para efetuar uma análise mais aprofundada de cada uma, sendo elas: Temperatura média, máxima e mínima do ar e temperaturas médias, máximas e mínimas dos termopares superior, intermediário e inferior. Devido à baixa correlação da alimentação (representada pelos valores de matéria natural, sólidos voláteis e totais), da precipitação e também da correlação média da radiação em relação a produção, estas variáveis não foram analisadas de forma mais aprofundada.

Por meio da análise estatística univariada (Tabela 2), pelo teste de Tukey, foi possível perceber a diferenciação estatística dentro de cada bloco, sendo que cada bloco se refere a uma semana. A semana que obteve maior produção diária média de biogás foi a semana do bloco 14, porém não houve diferença estatística entre os blocos 2, 7, 10, 11, 12, 15 e 16, variando de 16,28 m³ por dia à 12,19 m³ por dia, mesmo porque a diferença máxima de produção entre a semana correspondente ao bloco 14 e a semana correspondente ao bloco 10 não passou de 4,1 m³ de biogás por dia, valor esse considerado baixo em relação à diferença de produção dos outros blocos que produziram menos de 10 m³ por dia.

Ao observar, principalmente os blocos com os piores resultados de produção de biogás, é possível perceber que há diferenças estatísticas também nas variáveis que influenciam a produção de biogás. Essa constatação é visível ao analisar, principalmente, os blocos 3, 4 e 5. Porém, dentre todos os blocos, o bloco (13) se destaca por possuir produção baixa, mas sem nenhum motivo aparente. Este bloco refere-se à semana dos dias 04/11/13 a 10/11/13, período em que a temperatura média mínima do termopar posicionado na região média chegou próximo de 20 °C, demonstrando a possível influência da faixa mínima ideal de temperatura para o ideal desempenho dos micro-organismos no processo de degradação da matéria orgânica, porém essa mesma hipótese não se enquadra nos casos dos blocos 9, 8, 6 e 1, pois estes tiveram temperaturas mínimas, no termopar posicionado na região média, menores em comparação ao bloco 13 e mesmo assim produziram mais biogás. Esta situação demonstra que houve outro fator desconhecido influenciando na redução da produção como, por exemplo, a variação do pH do substrato (variável não analisada neste experimento), sendo que o pH é um fator que também pode afetar na multiplicação bacteriana.

Contudo, analisando os blocos que tiveram baixa produção de biogás (3, 4 e 5), foi possível observar o efeito da temperatura média do ar, e das temperaturas nas três diferentes regiões internas do biodigestor, demonstrando que temperaturas internas abaixo de 20 °C reduzem a produção de biogás consideravelmente. Porém, se analisarmos o bloco 2, é possível detectar que durante aquela semana as temperaturas, tanto do ambiente externo como do ambiente interno, se assemelham



*Nível de significância à 1%.

Figura 6. Temperaturas médias, máximas e mínimas nos termopares localizados na parte superior, intermediária e inferior.
Figure 6. Average, maximum and minimum temperatures in thermocouples located at the top, middle and bottom.

Tabela 1. Correlações de Spearman e significância entre cada variável e a produção de biogás.
Table 1. Spearman correlations and significance of each variable and the production of biogas.

Variável	Correlação	Nível de significância*
Temperatura média do ar	0,62	Significativo
Temperatura máxima do ar	0,56	Significativo
Temperatura mínima do ar	0,54	Significativo
Radiação	0,27	Significativo
Precipitação	0,11	Não significativo
Temperatura média do termopar inferior	0,65	Significativo
Temperatura máxima do termopar inferior	0,60	Significativo
Temperatura mínima do termopar inferior	0,57	Significativo
Temperatura média do termopar intermediário	0,65	Significativo
Temperatura máxima do termopar intermediário	0,61	Significativo
Temperatura mínima do termopar intermediário	0,58	Significativo
Temperatura média do termopar superior	0,62	Significativo
Temperatura máxima do termopar superior	0,67	Significativo
Temperatura mínima do termopar superior	0,50	Significativo
Matéria natural	0,10	Não significativo
Sólidos totais	0,04	Não significativo
Sólidos voláteis	0,03	Não significativo

*Nível de significância à 1%.

Tabela 2. Análise da produção de biogás, temperatura média do ar e temperaturas médias dos termopares superior, intermediário e inferior; temperatura mínima do termopar inferior, temperatura média, máxima e mínima do termopar médio ou intermediário, temperaturas média, máxima e mínima do termopar superior.

Table 2. Analysis of biogas production, average air temperature and average temperatures of higher thermocouples, intermediate and lower; minimum temperature of the lower thermocouple, average temperature, maximum and minimum average or intermediate thermocouple, average temperature, maximum and minimum top thermocouple.

Sem.	Produção	Difer.	°C AR Méd.	Difer.	°C AR Máx.	Difer.	°C AR Mín.	Difer.	Radiação	Difer.	°C Term. I Méd.	Difer.	°C Term. I Max	Difer.
1	9,56 cd		20,89 abc		29,46 abc		14,457 bcd		16395,02 bc		23,60 abcd		29,20857 abcde	
2	15,00 ab		18,16 cde		24,99 bc		11,90 def		13732,76 c		21,17 de		26,23143 cde	
3	1,07 e		13,94 e		22,20 c		6,53 f		17792,11 abc		16,91 e		22,92286 e	
4	1,05 e		18,33 cde		25,04 bc		12,97 cde		14758,83 c		21,34 de		26,16714 de	
5	1,27 e		14,84 de		22,63 c		8,17 ef		16240,24 bc		17,63 e		22,93 e	
6	8,45 d		20,56 bcd		27,64 abc		15,27 bcd		17401,28 abc		23,40 bcd		28,39857 abcde	
7	14,14 abcd		24,86 abc		33,36 a		16,94 abcd		20999,24 abc		27,34 abc		33,59429 a	
8	9,63 cd		19,40 bcde		25,21 abc		14,93 bcd		15200,25 c		22,98 cd		26,57571 bcde	
9	10,59 bcd		21,60 abc		28,01 abc		16,76 abcd		17788,69 abc		24,61 abcd		28,92714 abcde	
10	12,19 abcd		22,66 abc		28,56 abc		17,24 abcd		19120,19 abc		25,89 abcd		30,13571 abcd	
11	13,02 abcd		24,64 abc		31,53 ab		19,79 ab		21540,92 abc		28,20 ab		32,84286 ab	
12	12,78 abcd		23,67 abc		29,70 abc		18,91 ab		20995,54 abc		27,11 abc		31,51571 abcd	
13	8,78 d		23,73 abc		30,96 ab		17,39 abcd		28847,87 a		27,36 abc		32,69429 abc	
14	16,28 a		24,27 abc		31,90 ab		17,94 abcd		27591,21 ab		28,58 a		33,68143 a	
15	12,34 abcd		23,61 abc		28,87 abc		18,83 ab		23363,11 abc		27,78 abc		31,87286 abcd	
16	12,60 abcd		26,63 abc		31,46 ab		21,19 a		24684,36 abc		28,37 ab		33,03 Ab	

Sem.	°C Term. I Mín.	Difer.	°C Term. M Méd.	Difer.	°C Term. M Máx.	Difer.	°C Term. M Mín.	Difer.	°C Term. S Méd.	Difer.	°C Term. S Máx.	Difer.	°C Term. S Mín.	Difer.
1	18,60 bcd		23,45 abc		29,25714 abcd		18,28143 bcd		23,75143 fg		30,76571 efg		13,99714 fgh	
2	16,25 def		20,93571 cd		26,11429 cd		15,92429 def		26,37143 cde		31,81 efg		17,94429 defg	
3	11,66 f		16,42571 d		22,67714 d		10,87857 f		22,15857 g		28,75143 gh		12,81857 h	
4	17,06 cde		21,11429 cd		26,09429 cd		16,78429 cde		24,77571 ef		30,08714 fgh		16,02 efgh	
5	12,76 ef		17,07143 d		22,72429 d		12,07429 ef		21,2 g		27,28143 h		13,14429 gh	
6	19,56 abcd		23,29714 abc		28,47714 abcd		19,29143 abcd		24,91714 ef		31,33286 efg		16,88714 efgh	
7	21,71 abc		27,38286 ab		33,74286 a		21,58429 abc		28,61714 bc		35,79286 cd		18,63857 cdef	
8	19,45 abcd		22,74 bc		26,43571 bcd		19,18286 abcd		25,99 def		30,93143 efg		16,5 efgh	
9	20,91 abcd		24,45429 abc		28,92 abcd		20,66571 abcd		27,11714 cde		32,53714 ef		19,81714 bcde	
10	22,00 abc		25,74 abc		30,18 abc		21,76714 abc		27,66714 cd		33,10143 de		17,51 defgh	
11	24,08 a		28,16286 a		32,94857 ab		23,93286 a		30,53571 ab		36,49429 bc		22,30143 abcd	
12	23,24 ab		26,99429 ab		31,43286 abc		23,06 ab		31,26286 a		36,92286 bc		24,00143 ab	
13	22,36 ab		27,15143 ab		32,57714 abc		22,04714 abc		30,55 ab		37,54571 abc		23,02429 abc	
14	23,94 a		28,41286 a		33,61857 a		23,68714 ab		32,98 a		40,30714 a		24,48 ab	
15	24,02 a		27,54857 ab		31,88857 abc		23,69571 ab		32,73571 a		38,81571 ab		24,45429 ab	
16	24,52 a		28,17714 a		33,05286 ab		24,23429 a		32,58714 a		38,94286 ab		25,22 a	

Sem: semana; Produção: vazão diária de biogás; Difer: diferenciações estatísticas; °C AR Méd, Máx e Min: Temperatura média, máxima e mínima do ar; Radiação: incidência de raios solares; °C Term I Med, Máx e Min: temperatura média, máxima e mínima do termopar inferior; °C Term M Méd, Máx e Min: Temperatura média, máxima e mínima do termopar médio ou intermediário; °C Term S Med, Máx e Min: temperatura média, máxima e mínima do termopar superior.

com as temperaturas do bloco 4, com a única diferença que o a semana do bloco 2 produziu quase 15 m³ de biogás e a semana

do bloco 4 produziu pouco mais de 1 m³ de biogás. Uma explicação para essa diferença pode estar relacionada com as

temperaturas que antecedem a semana analisada, por exemplo: a semana do bloco 2 teve uma semana anterior com temperaturas mais adequadas para a multiplicação de micro-organismos se for comparado com a semana que antecede a semana do bloco 4 (temperaturas abaixo do limite da fase mesófila). Esta situação pode esclarecer que a produção de biogás não é afetada tão rapidamente com a diminuição da temperatura para o limite inferior da fase mesófila.

Comparando a produção de biogás com a temperatura mínima do ar e a temperatura mínima do termopar situado na região intermediária (Figura 7) fica visível o impacto na produção quando há uma queda significativa da temperatura. No período de 12/08/13 a 09/09/13 (corresponde aos blocos 3, 4, 5 e 6) é possível observar que quando a temperatura do ar baixa de 15 °C para menos de 5 °C há uma queda brusca na produção de biogás, beirando a zero.

Segundo Singh (1994) e Tietz (2013), a faixa ideal para otimizar a digestão anaeróbia dentro da faixa mesofílica é entre 30 a 35 °C, sendo que durante todo o experimento foram poucos os momentos em que a temperatura interna do biodigestor esteve dentro destes limites, porém, como comentado anteriormente, foi possível manter, durante grande parte do experimento, temperaturas médias dentro do limite aceitável para a produção de biogás.

Analisando a Figuras 8, que mostra o comportamento da temperatura no intervalo de um dia nas três regiões do biodigestor, observou-se que o comportamento das temperaturas na região média ou intermediária e da região inferior foram muito similares, ou seja, as duas regiões possuem as mesmas oscilações e praticamente as mesmas temperaturas, porém a região superior foi diferente das outras duas regiões abaixo.

Outra constatação é a de que parece haver uma troca de calor ou uma movimentação de biomassa ou os dois casos, dentro do biodigestor. Esse processo de variação de temperatura começa a ocorrer justamente quando o dia amanhece, sendo que a temperatura da parte superior começa a cair e as temperaturas da parte intermediária e inferior começam a subir. Enquanto a temperatura das partes inferior e intermediária continuam a subir até o fim da tarde, a temperatura da parte superior atinge estabilidade até logo após o meio dia e volta a aumentar. Quando a noite chega o processo se inverte, sendo que, enquanto as temperaturas das partes intermediária e inferior voltam a cair, a temperatura da parte superior aumenta até atingir certa estabilidade, até voltar a ocorrer o mesmo processo ao iniciar um novo dia. Este comportamento reflete o comportamento das variações de temperatura do ambiente externo, demonstrando a grande influência deste no ambiente interno do biodigestor. Porém, é preciso salientar que este processo não ocorre

294

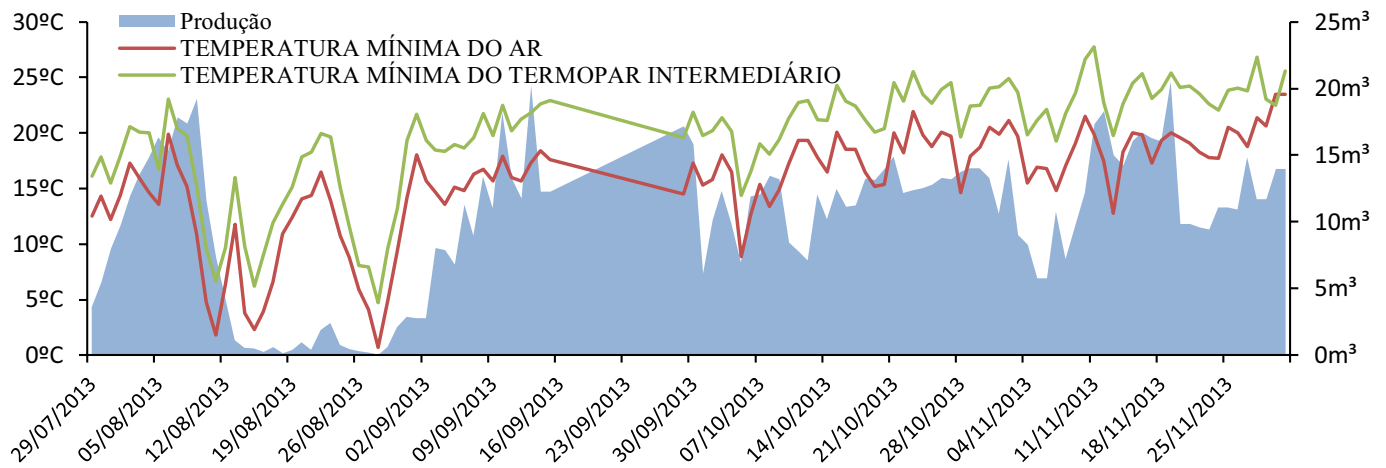


Figura 7. Produção de biogás, temperatura mínima do ar e temperatura mínima do termopar intermediário.

Figure 7. Biogas production, minimum air temperature and temperature of the intermediate thermocouple.

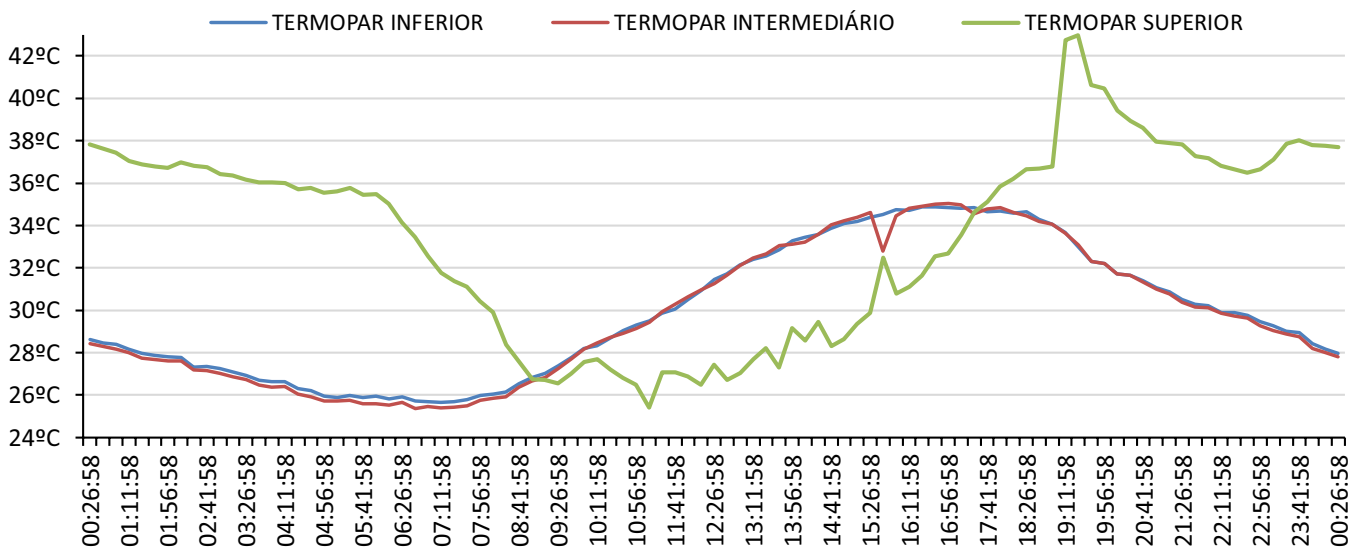


Figura 8. Comportamento das temperaturas internas do biodigestor no dia 19/11/13.

Figure 8. Performance of internal temperatures of the biodigester on 11/19/13.

sempre, sendo que há alguns casos que não há essa inversão de temperaturas, mas, na maioria das vezes, o processo ocorreu da mesma forma como comentado anteriormente.

4. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados é possível concluir que há influência de vários fatores na produção de biogás. Foi possível observar que, durante todo o experimento, não houve redução da produção de biogás decorrente de excesso de temperatura interna, demonstrando que é possível produzir biogás normalmente com temperaturas internas acima de 40 °C. Por outro lado, houve drásticas reduções de produção de biogás quando houve queda da temperatura interna, influenciada pela queda da temperatura ambiente, abaixo de 20 °C.

Conclui-se também que é possível produzir aproximadamente 10 m³ de biogás por dia em um biodigestor modelo Bioköhler alimentado diariamente com 36 kg de sólidos voláteis.

5. AGRADECIMENTOS

A CAPES, Fundação Araucária e PTI (Parque Tecnológico Itaipu) pelo suporte financeiro por meio de bolsas de estudos.

A UNIOESTE, em específico ao programa de pós-graduação em Desenvolvimento rural sustentável pela disponibilidade de recursos humanos, técnicos e científicos.

6. REFERÊNCIAS

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION-APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21th ed. Washington/DC:2009. Disponível em: http://www.mwa.co.th/download/file_upload/SMWW_1000-3000.pdf. Acesso em 10 de novembro de 2014.
- ASSAD, M. L. L.; ALMEIDA, J. Agricultura e sustentabilidade: contextos, desafios e cenários. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, n. 29, p.15-30. 2004.
- BARON, S. **Projeto Alto Uruguai: Transformando um Problema em Solução**. In.: 3º Seminário Bioenergia: Desafios e Oportunidades de Negócios. São Paulo. 2011.
- Ministério de Minas e Energia – MME, Empresa de Pesquisa Energética – EPE. **Balço Energético Nacional 2012 – Ano Base 2011**. Brasil, 2012.
- BOUALLAGUI H.; HAOUARI O.; TOUHAMI Y.; BEN CHEIKH R.; MAROUANI L.; HAMDI M. Effect of temperature on the performance of an anaerobic tubular reactor treating fruit and vegetable waste. **Process Biochemistry**, Londres, v. 39, n. 12, p. 2143-2148, 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procbio.2003.11.022>
- BRUNDTLAND, G. H.; **Report of world commission on environmental and development: Our common future**. 318 p. Oslo, 1987. Disponível em: <https://ambiente.files.wordpress.com/2011/03/brundtland-report-our-common-future.pdf>. Acesso em: 20 de Março de 2015.
- CHERNICHARO, C.A.L.; **Reatores Anaeróbios: Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias**, 2ª ed. Belo Horizonte. UFMG, 2007. 380 p.
- DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO. **Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento: Agenda 21**. Brasília, 1995. Tradução do Ministério das Relações Exteriores. Disponível em: <http://www.onu.org.br/rio20/img/2012/01/agenda21.pdf>. Acesso em: 20 de Março de 2015.
- FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. **ExpDes. pt: Experimental Designs package (Portuguese)**. R package version 1.1.2. 2013.
- FORESTI, E. **Fundamentos do processo de digestão anaeróbia**. In.: Seminário Latino americano. 1994. Montevideo. Anais... Montevideo. p.97-110. 1994.
- GALINKIN, M.; BLEY, C. **Agroenergia da biomassa residual: perspectivas energéticas, socioeconômicas e ambientais**. 2 ed. rev. Foz do Iguaçu/Brasília: Itaipu Binacional, Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação, TechnoPolitik Editora, 140 p. 2009.
- GREENPEACE; Conselho Europeu de Energias Renováveis (EREC). **Revolução energética: perspectivas para uma energia global sustentável**. São Paulo – SP. 2007.
- HAMMER, J. M.; HAMMER JR., J. M. **Water and Wastewater Technology**. 3. ed. Englewood Cliffs, Nova Jersey: Prentice-Hall, 1996.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Agricultura familiar. 2009. Disponível em: <http://saladeimprensa.ibge.gov.br/noticias?view=noticia&id=1&busca=1&idnoticia=1466>. Acesso em: 14 de Junho de 2013.
- ISOLDI, L. A.; KOETZ, P. R.; FARIA, O. L. V.; ISOLDI, L. Parâmetros de operação do reator UASB em um sistema combinado reator-UASB reator aeróbio. **Revista Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental**, v. 6. 2001.
- LEITE, A. D. **A energia do Brasil**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1997.
- MENDIBURU, F. de. **Agricolae: Statistical procedures for agricultural research**. R package version 1.1-4. <http://CRAN.R-project.org/package=agricolae>. 2013.
- OLIVEIRA, A. B. M. **Biodigestão anaeróbia de efluente de abatedouro avícola**. 2011. 57f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Universidade Federal da Grande Dourados, Faculdade de Ciências Agrárias, Dourados, 2011.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>. 2013.
- SANGA, G. A. **Avaliação de impactos de tecnologias limpas e substituição de combustíveis para cocção em residências urbanas na Tanzânia**. 2004. Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Estadual de Campinas (Dissertação - Mestrado em Planejamento de sistemas Energéticos). Campinas. 2004.
- SANTOS, T. M. B.; LUCAS JUNIOR, J. de. Balço energético em galpão de frangos de corte. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 2, p. 25-36, 2004.
- SINGH R.; ANAND R. C. Comparative performances of Indian small solid-state and conventional anaerobic digesters. **Bioresource Technology**, Essex, v. 47, p. 235-238, 1994. [http://dx.doi.org/10.1016/0960-8524\(94\)90186-4](http://dx.doi.org/10.1016/0960-8524(94)90186-4)
- SOUZA, C. F., LUCAS JUNIOR, J. de; 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**, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 530-539, 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-69162005000200027>
- TIETZ, C. M. **Influência da temperatura na produção de biogás a partir de dejetos da bovinocultura de leite**. 2013. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Biocombustíveis) – Universidade Federal do Paraná, Palotina, 2013.
- UNITED NATIONS. **Kyoto Protocol to the united nations framework convention on climate change**. 1998.