

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

FÁBIO NUERNBERG

**CARACTERIZAÇÃO DE UM BIODIGESTOR DE DEJETOS DE GADO LEITEIRO
INSTALADO EM SÃO JOÃO DO SUL, SC**

Araranguá, SC

2019

FÁBIO NUERNBERG

**CARACTERIZAÇÃO DE UM BIODIGESTOR DE DEJETOS DE GADO
LEITEIRO INSTALADO EM SÃO JOÃO DO SUL, SC**

Trabalho de Conclusão de Curso,
apresentado à Universidade Federal de
Santa Catarina, como parte das
exigências para a obtenção do título de
Engenheiro(a) de Energia.

Araranguá, 11 de dezembro de 2019.

BANCA EXAMINADORA



Profa. Dra. Elaine Virmond (Orientadora)
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Dr. Claus Tröger Pich
Universidade Federal de Santa Catarina



Profa. Dra. Tatiana Gisset Pineda Vásquez
Universidade Federal de Santa Catarina

CARACTERIZAÇÃO DE UM BIODIGESTOR DE DEJETOS DE GADO LEITEIRO INSTALADO EM SÃO JOÃO DO SUL, SC

Fábio Nuernberg*

RESUMO

A região sul do Brasil é uma das maiores produtoras de leite atualmente, atividade que contém uma grande diversificação quanto ao seu sistema produtivo. A problemática associada à criação de bovinos leiteiros é a alta produção de dejetos, que necessitam de cuidados especiais para não afetarem negativamente o meio ambiente. Uma das alternativas para o tratamento de dejetos é a biodigestão, que promove a redução da carga orgânica presente no substrato, produz biogás e fertilizante orgânico. O biogás consiste em uma mistura gasosa (CH_4 , CO_2 , NH_3 , H_2S , outros) que pode ser utilizado de diversas formas dependendo da composição. O presente trabalho avaliou o desempenho de um biodigestor de dejetos de bovinos leiteiros de baixo custo de uma propriedade rural localizada em São João do Sul (SC). Para isso, foram caracterizados o substrato, o fertilizante orgânico e o biogás. No substrato e no fertilizante orgânico foram avaliados os teores de sólidos totais, voláteis e fixos para quantificar a redução do teor de sólidos voláteis, que representa a diminuição da carga orgânica presente no substrato. No substrato o teor de sólidos voláteis encontrado foi de $83,07 \pm 5,41\%$. Após o processo de biodigestão obteve-se uma concentração de $74,29 \pm 2,06\%$ no fertilizante orgânico, totalizando uma redução de $10,27\%$ da carga orgânica. Quanto ao biogás, avaliou-se a sua composição química, teor energético, vazão e perda de carga na tubulação e a influência da temperatura sobre a produção. O biogás produzido apresentou uma concentração média de CH_4 de $72,9 \pm 8,6\%$, um PCI de $26,10 \text{ MJ/m}^3$ e Índice de Wobbe de $25,72 \text{ MJ/m}^3$, demonstrando que há potencial para substituição do GLP. As análises realizadas com o biogás demonstraram uma diferença significativa na produção durante a primavera (estação mais quente) quando comparada ao inverno (estação mais fria). Além desses fatores, estimou-se a quantidade de dejetos produzidos e a produção de CH_4 diária dentro da propriedade. Segundo a estimativa, a quantidade de dejetos tratada atualmente é de apenas 11% , observando-se que seriam necessários mais oito biodigestores do mesmo modelo para tratar todos os dejetos produzidos. Já a produção de CH_4 poderia ser nove vezes maior. Contudo, apesar da baixa eficiência do biodigestor no tratamento dos dejetos nas condições avaliadas, o mesmo produz um biogás com bom teor de metano e produz um fertilizante orgânico utilizável na propriedade.

Palavras chave: Dejetos de bovinos leiteiros, biodigestão, biogás.

* Graduando do Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde – CTS, Campus Araranguá. E-mail: fabio.nuernberg@outlook.com

CHARACTERIZATION OF A BIODIGESTER OF DAIRY CATTLE MANURE INSTALLED IN SÃO JOÃO DO SUL, SC

Fábio Nuernberg*

ABSTRACT

The South region of Brazil is one of the biggest producers of milk nowadays, an activity that contains a big diversity in its production system. The problem associated with the breeding of dairy cattle is the high production of waste (manure + urine), which needs special care not to negatively affect the environment. One of the alternatives for waste treatment is biodigestion, which promotes the reduction of the organic load in the substrate, produces biogas and organic fertilizer. Biogas consists of a gas mixture (CH_4 , CO_2 , NH_3 , H_2S , others) that can be used in various appliances according to the composition. This work evaluated the performance of a low cost dairy cattle manure biodigester from a rural property located in São João do Sul (SC). For this, the substrate, organic fertilizer and biogas were characterized. In the substrate and organic fertilizer, total, volatile and fixed solids contents were evaluated to quantify the reduction of the volatile fraction, which represents the decrease of the organic load present in the substrate. Before processing, the volatile solids content was $83.07 \pm 5.41\%$. After the biodigestion process, a concentration of $74.29 \pm 2.06\%$ in the organic fertilizer was obtained, totaling a reduction of 10.27% of the organic load. To the biogas, chemical composition, energy content, flow and pressure drop in the pipeline and the influence of temperature on production were evaluated. The biogas produced presented an average CH_4 concentration of $72.9 \pm 8.6\%$, a LHV of 26.10 MJ/m^3 and Wobbe Index of 25.72 MJ/m^3 , demonstrating that there is potential for LPG replacement. The biogas analyzes showed a significant difference in production during spring (warmer season) compared to winter (colder season). In addition to these factors, it was estimated the amount of waste produced and the daily production of CH_4 within the property. According to the estimate, the amount of waste currently treated is only 11%, therefore, eight more biodigesters of the same model would be required to treat all the waste produced, while the production of CH_4 could be 9 times higher. However, despite the low efficiency of the biodigester in the treatment of the manure under the evaluated conditions, it produces a biogas with good methane content and an organic fertilizer to supply the property.

Keywords: Dairy cattle manure, biodigestion, biogas.

* Energy Engineering Bachelor Degree Student at the Federal University of Santa Catarina, Science, Technology and Health Center - CTS, Araranguá Campus. Email: fabio.nuernberg@outlook.com

1 INTRODUÇÃO

Segundo dados do Anuário Leite, produzido por Embrapa (2019), no mercado mundial em 2017, o Brasil subiu de quarto para o terceiro lugar em produção e produtividade de leite de vaca, totalizando uma produção de 33,5 bilhões de litros, 34,2% desses oriundos da região sul do país, o que a torna a região com maior produção atualmente.

A produção total e a composição do leite recebe interferência de diversos fatores, como o tipo de confinamento, alimentos ofertados, característica de raças e sanidade dos animais. Nos sistemas de produção tem-se duas divisões: sistema de produção extensivo e intensivo, sendo esse último subdividido em intensivo a pasto, intensivo semi confinado e intensivo confinado. As maiores produções de leite podem ser obtidas nos sistemas intensivos com animais confinados, semi confinados e a pasto, respectivamente (BONDAN, 2015).

Nos sistemas de produção intensivo em geral há a utilização de raças especializadas com dietas balanceadas, controle sanitário e uso de mão-de-obra. No sistema intensivo a pasto, o rebanho permanece em tempo integral em pastagens cultivadas, sendo disposta em locais fechados no momento de ordenha, gerando poucos gastos por não necessitar de uma infraestrutura mais complexa. Quanto ao sistema intensivo semi confinado, os animais permanecem um período do dia em pastagens cultivadas e outro período em áreas onde a água e o alimento ficam restritos. No sistema intensivo confinado, os animais ficam exclusivamente em áreas restritas, recebendo toda a alimentação em cochos, sendo caracterizados por alta produção de leite em larga escala (BONDAN, 2015).

Outra diferença entre os sistemas de produção é a capacidade de recuperação dos dejetos. O sistema intensivo confinado é o único que permite recuperação total dos dejetos produzidos. Nos outros tipos de confinamento desse sistema de produção, a recuperação dos dejetos acontece de forma parcial, já que apenas o que é excretado durante ou após o processo de ordenha pode ser recolhido. Já no sistema extensivo, o recolhimento dos dejetos é dificultado pois os animais permanecem em pastagens em tempo integral, excretando seus dejetos dispersamente (BONDAN, 2015).

De acordo com Hirano e Silva (2014), os dejetos produzidos na bovinocultura necessitam de cuidados especiais para não afetarem negativamente o meio ambiente. Entende-se por dejetos o montante de fezes, urina e restos alimentares. Segundo Embrapa (2019), o número total de vacas ordenhadas em 2017 na região sul foi de 3.644.297, com peso médio de 540 kg (MITO *et al.*, 2018). Segundo Campos (1997), a quantidade e a qualidade dos dejetos

produzidos por dia são influenciadas por vários fatores como alimentação, peso e idade do animal, quantidade de água ingerida, estação do ano, dentre outros. Porém, esse autor utilizou em sua pesquisa uma média da produção diária de dejetos de raças leiteiras de 8% a 11% do peso do animal. Utilizando a metodologia de Campos (1997), a produção de dejetos bovinos em 2017 na região sul foi de 151.602,7 a 216.471,8 toneladas.

Esses dejetos são frequentemente utilizados como adubo agrícola, porém, sem um tratamento específico têm grande potencial poluidor. Dessa forma, os dejetos podem provocar contaminação no solo por meio de fitotoxicidade, do ar por emissão de gases ácidos e de efeito estufa, da água por eutrofização dos lençóis freáticos e também de corpos aquáticos, por aumento da carga orgânica disponível, causando um desequilíbrio na quantidade de oxigênio provocando a morte de peixes e outros organismos. As fezes bovinas são ainda fonte de bactéria *Escherichia coli*, que transmite diversas doenças aos seres humanos. O descarte incorreto ou a falta de descarte dos dejetos, também aumenta a proliferação de insetos como moscas, que podem ser vetores de transmissão de doenças ao homem e aos animais (HIRANO; SILVA, 2014).

Uma das alternativas possíveis para tratar e ainda reduzir a quantidade de dejetos, é a biodigestão. De acordo com Kunz e colaboradores (2019), a biodigestão é um processo metabólico complexo que necessita um ambiente anaeróbico e depende da atividade conjunta de uma associação de microrganismos para transformar o material orgânico em produtos, o biogás e o fertilizante orgânico. O processo pode ser dividido em quatro fases, sendo: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.

A hidrólise consiste na degradação de compostos de cadeia complexa (matéria orgânica) como os lipídios, polissacarídeos e proteínas, em substâncias orgânicas mais simples (monômeros) e solúveis. Esse processo ocorre pela ação das enzimas extracelulares excretadas pelas bactérias hidrolíticas (KUNZ *et al.*, 2019).

Já a acidogênese é o processo que degrada os monômeros formados na etapa de hidrólise em ácidos orgânicos de cadeia curta, moléculas com um a cinco átomos de carbono em sua composição. Sua realização acontece por meio de bactérias anaeróbicas havendo assim a formação de diversos compostos, em maioria ácidos (KUNZ *et al.*, 2019).

Na etapa de acetogênese os compostos resultantes do processo de acidogênese são decompostos a ácidos com apenas um ou dois átomos de carbono (ácidos fórmico e acético), também ocorre a formação de hidrogênio e dióxido de carbono durante esse processo. A acetogênese é realizada por um grupo de bactérias acetogênicas, esse grupo de bactérias tem

uma relação de simbiose com as arqueas metanogênicas e as bactérias homoacetogênicas para conseguir realizar a formação de ácidos com cadeia curta (KUNZ *et al.*, 2019).

A última etapa da biodigestão é a metanogênese, nela os conteúdos de ácidos e hidrogênio gerados na acetogênese são convertidos em dióxido de carbono e metano pelas arqueas metanogênicas. As arqueas metanogênicas são divididas de acordo com sua via metabólica em acetoclástica convertendo acetato a metano e hidrogenotrófica convertendo hidrogênio e dióxido de carbono a metano. Sendo as arqueas acetoclásticas correspondente a 70% da formação de metano (KUNZ *et al.*, 2019).

Segundo Colbella (2006), esse processo reduz o potencial poluidor dos resíduos, produz biogás e possibilita o uso do efluente como fertilizante orgânico (biofertilizante ou digestato) de forma segura.

Por tratar-se de um processo biológico, a biodigestão é influenciada pelas condições do meio e do substrato onde se encontram os microrganismos envolvidos, dessa forma existem alguns fatores que afetam a biodigestão devido à sensibilidade das bactérias, tais como: temperatura, pH, nutrientes, toxicidade à digestão anaeróbia, inibidores do processo, pressão parcial de H₂, homogeneização e tempo de retenção hidráulica (LORA; VENTURINI, 2012).

Conforme Henn e colaboradores (2004), para ocorrer a biodigestão a temperatura precisa estar acima de 10 °C. Porém para ter um melhor desempenho nos biodigestores, a temperatura ideal é de 30 °C a 35 °C, como citado por Maurer e Winkler (1980) e por Nogueira (1986).

De acordo com Kunz e colaboradores (2019), as arqueas metanogênicas são muito sensíveis ao pH, então o valor de pH considerado ideal na biodigestão é de 6,7 a 7,5. Já Comastri Filho (1981) afirma que a faixa de operação dos biodigestores deve ser entre 6,0 e 8,0 sendo o valor ideal 7,0.

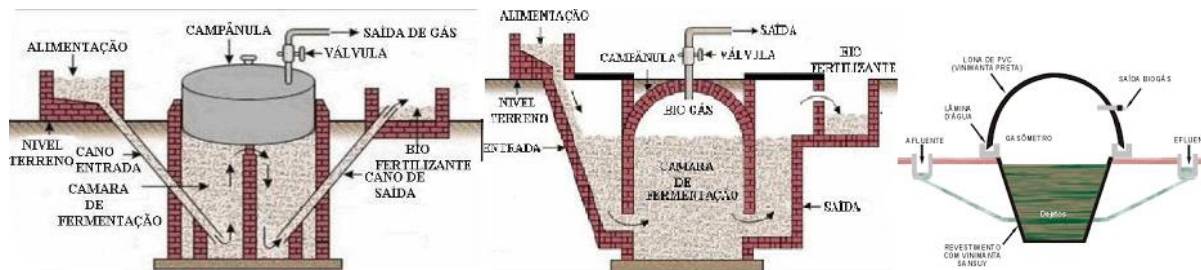
Conforme Reis (2012), os biodigestores anaeróbios podem ser definidos como uma câmara fechada alimentada com substratos orgânicos que na ausência de oxigênio são degradados pela ação de microrganismos. Os biodigestores são constituídos de um misturador (entrada), onde a matéria-prima e a água são misturadas; uma câmara, onde ocorre a fermentação anaeróbia; uma válvula, onde sai o biogás; e uma saída para que o fertilizante orgânico seja retirado (CASTANHO; ARRUDA, 2008). Os modelos mais conhecidos e utilizados no Brasil em propriedades rurais são o indiano, o chinês e o canadense, sendo cada um adaptado a uma realidade e uma necessidade de fertilizante orgânico e biogás. Podem ser operados de forma contínua (ou intermitente) ou descontínua (batelada) (CASTANHO; ARRUDA, 2008).

O biodigestor indiano caracteriza-se por ter pressão de operação constante e possuir um campanula móvel como gasômetro, a qual é mergulhada sobre a biomassa ou em selo d'água externo e uma parede central que divide o tanque de fermentação, com a função de forçar a circulação por todo interior do tanque (DEGANUTTI *et al.*, 2002).

Já o biodigestor chinês é característico por ter uma câmara cilíndrica fechada e impermeável, o biodigestor funciona como no princípio de prensa hidráulica, de modo que o aumento da pressão em seu interior fará com que o efluente vá para caixa de saída e gere fluxo no interior do biodigestor (DEGANUTTI *et al.*, 2002).

O biodigestor canadense é caracterizado por possuir base retangular de alvenaria com largura maior que profundidade e uma manta flexível como gasômetro, assim tem uma maior área de irradiação solar, possibilitando que tenha maiores temperaturas que os outros biodigestores (CASTANHO; ARRUDA 2008). Na Figura 1 estão ilustrados os três modelos mais utilizados no meio rural.

Figura 1 - Representação esquemática dos biodigestores indiano, chinês e canadense, respectivamente.



Fonte: Adaptado (SILVA, 2013; IENGEP, 2012).

Para avaliar o desempenho do processo de biodigestão e do biodigestor deve-se determinar a qualidade do substrato, do biogás e do fertilizante orgânico. No substrato devem ser analisados parâmetros químicos como pH, teor de sólidos (sólidos totais, sólidos voláteis, sólidos fixos). Em relação ao biogás é importante sua caracterização química, conteúdo energético, pressão e vazão de operação. A análise de sólidos no fertilizante orgânico também é importante para avaliar a redução de sólidos. Teores de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) também devem ser analisados para a utilização do fertilizante de forma correta (aplicação na agricultura).

A fração de sólidos que compõe o substrato pode ser dividida em uma parcela orgânica, a de Sólidos Voláteis (SV) e a uma parcela inorgânica, a de Sólidos Fixos (SF). A fração de Sólidos Totais (ST), por definição, corresponde ao material restante da evaporação da parcela

líquida de uma amostra. Os SF são o restante dos sólidos totais após a etapa de calcinação, etapa onde a amostra é levada a uma temperatura de 800 °C. E SV corresponde à diferença entre ST e SF (WILDER *et al.*, 1997).

Pode se dizer que o teor de sólidos voláteis está diretamente ligado à quantidade de biogás produzido, logo, quanto maior o teor de SV maior a produção de biogás (Konrad *et al.*, 2010). Complementarmente, o teor de sólidos totais é um parâmetro para determinar a quantidade de diluição necessária no substrato afluente ao biodigestor, em biodigestores indianos esse teor de sólidos na entrada do biodigestor deve ser inferior a 8% para garantia de fluxo e diminuição das chances de entupimento (DEGANUTTI *et al.*, 2002)

O biogás consiste em uma mistura gasosa composta majoritariamente por metano (CH₄) e o dióxido de carbono (CO₂). Em menores concentrações, também estão presentes amônia (NH₃), nitrogênio (N₂) e ácido sulfídrico (H₂S) (BRASIL, 2019).

O conteúdo energético do biogás é importante para sua utilização. Quanto maior a porcentagem de CH₄, maior é o seu poder calorífico. A partir do poder calorífico pode-se estimar a equivalência do biogás com outros gases combustíveis aplicáveis ao uso pretendido por meio do Índice de Wobbe (*I_w*), que representa o calor fornecido pela queima de gases combustíveis através de um orifício submetido a pressões constantes, à montante e à jusante desse orifício. A pressão do gás à montante do orifício é aquela fornecida ao queimador, e a pressão à jusante é a da câmara de combustão, normalmente à pressão atmosférica (FONSECA, 2009).

O biogás tem uma vasta gama de aplicações, porém cada forma de utilização requer níveis de pureza diferentes, ou seja, teor de metano e contaminantes. Há diversas formas de caracterizar o biogás, entretanto quanto mais detalhada em relação à composição e necessidade de precisão a análise torna-se onerosa, como relatado por Paim (2018). Como o custo relacionado à implantação do biodigestor é um fator determinante para a viabilidade do projeto, as análises de caracterização devem ser de baixo custo.

Dessa forma, o biogás pode ser utilizado para a geração de calor, combustível para motores e geradores e inserção do mesmo em redes de gás natural após purificação. Dentre as possibilidades de uso a mais simples e que requerem menor pureza destaca-se a geração de calor (BRASIL, 2010).

Após a degradação da matéria orgânica no interior do biodigestor e a produção de biogás, tem-se como coproduto o fertilizante orgânico, que é geralmente mais líquido que o substrato e a sua caracterização se dá em teores de ST, SF e SV; de concentrações de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), dentre outros parâmetros. Em um estudo realizado por Xavier e

Lucas Júnior (2011), obteve-se a composição do fertilizante orgânico oriundo de dejetos de vacas Holandesas em lactação, alimentadas com silagem de milho, pelo processo de biodigestão em batelada e contínuo em biodigestores com volume útil de 8 litros, sendo os valores médios demonstrados Tabela 1.

Tabela 1 – Composição média do fertilizante orgânico obtido no processo de biodigestão de dejetos de vacas em lactação.

Elemento	% em biodigestor contínuo	% em biodigestor batelada
Nitrogênio (N)	2,64	2,87
Fósforo (P)	1,71	2,16
Potássio (K)	2,03	2,01

Fonte: Adaptado Xavier e Lucas Júnior (2011).

Segundo Caldereiro (2015), o fertilizante orgânico é um produto bioestabilizado rico em matéria orgânica e nutrientes, e sua alta qualidade é associada à redução do teor carbono e ao aumento da quantidade de nitrogênio durante a biodigestão. A utilização de fertilizante orgânico em cultivos agrícolas pode promover aumento da concentração de nutrientes no solo, conservação da umidade e diminuição da erosão do solo, no entanto, recomendações técnicas especializadas devem ser seguidas.

Existem ainda alguns parâmetros técnicos utilizados para avaliar o processo de metanização, como carga orgânica aplicada (COA), taxa de degradação do substrato (n_{sub}), entre outros.

De acordo com Brasil (2016), a COA corresponde à massa de matéria orgânica (SV) disponível para o sistema de biodigestão, por unidade de tempo (kg/dia). É obtida por meio do produto entre a vazão mássica (Q) em kg/dia e a concentração de matéria orgânica (S_0) no substrato afluyente ao sistema de biodigestão, dada em SV (kg/kg), conforme Equação 1:

$$COA = Q \times S_0 \quad (1)$$

O volume útil de um biodigestor pode ser calculado através do volume de um cilindro vertical. A Equação 2 descreve o volume útil do biodigestor, onde Di é o diâmetro interno do biodigestor, Hs é a altura máxima do substrato e π é uma constante igual a 3,1415.

$$V_{\text{útil}} = \frac{\pi \times Di \times Hs}{4} \quad (2)$$

De acordo com Brasil (2016), o desempenho de uma planta de biogás pode ser avaliado com base na produtividade e no rendimento de biogás, bem como a taxa de degradação do substrato. A produtividade é determinada pela vazão de biogás ($Q_{biogás}$) em m³/dia em relação ao volume do biodigestor (V_R) em m³, sendo calculada conforme a Equação 3.

$$P_{biogás} = \frac{Q_{biogás}}{V_R} \quad (3)$$

O rendimento de biogás ($A_{biogás}$), por sua vez, expressa a vazão de biogás ($Q_{biogás}$) em m³/dia em relação à quantidade de matéria orgânica processada (COA) em kg/dia, calculado pela Equação 4 (BRASIL, 2016).

$$A_{biogás} = \frac{Q_{biogás}}{COA} \quad (4)$$

A taxa de degradação do substrato (η_{sub}) traduz a eficiência do aproveitamento da matéria orgânica disponível, podendo ser determinada com base na concentração de SV, a qual é calculada com base na Equação 5. A carga orgânica aplicada do afluente (COA_{in}) e a carga orgânica aplicada do efluente (COA_{out}) em kg/dia são obtidas por meio da vazão de substrato (kg/dia) multiplicado pela concentração de SV (kg/kg) presentes na entrada e saída do biodigestor (BRASIL, 2016).

$$\eta_{Sub} = \frac{COA_{in} - COA_{out}}{COA_{in}} \times 100 \quad (5)$$

De acordo com Brasil (2016), para estimar a geração de energia térmica de uma planta de biogás, devem-se levar em conta a vazão de biogás ($Q_{biogás}$), a concentração de CH₄ e o poder calorífico do biogás (PCI). A potência disponível (P_d) é calculada pela Equação 6.

$$P_d = Q_{biogás} \times C_{CH_4} \times PCI \quad (6)$$

Nesse contexto, o objetivo geral deste trabalho foi caracterizar esse biodigestor localizado em uma pequena propriedade rural em São João do Sul, SC, utilizado para o tratamento de dejetos bovinos e produção de biogás. Para isso, foram caracterizados o substrato, o fertilizante orgânico (digestato) e o biogás, e o desempenho do biodigestor foi avaliado. Este trabalho é complementar ao executado no âmbito do Projeto Biodigestor da Associação Técnica

Sem Fronteiras Brasil (TsF) e reportado por Batti (2018), Pereira (2018) e Paim (2018) dado que se trata de mesmo modelo de biodigestor, com mesmas dimensões e processando mesmo tipo de biomassa.

2 METODOLOGIA

2.1 OBJETO DE ESTUDO

Este trabalho foi realizado em um biodigestor instalado em uma unidade rural localizada em São João do Sul, Santa Catarina, com área de aproximadamente 18,5 ha, 7 ha irrigados com o fertilizante orgânico produzido no biodigestor. Essa unidade rural, além de ser residência dos proprietários do imóvel (casal de jovens agricultores), executa atividades de pastagem e plantação de milho para silagem, de forma a produzir os próprios insumos. A propriedade possui rebanho bovino leiteiro contendo 34 vacas (17 de raça Jersey e 17 de raça Holandês) com peso em média de 400 kg cada e produz 600 L/dia de leite comercializados pela cooperativa Coopersertão.

A alimentação dos animais é baseada em pastagem como a principal fonte volumosa, sendo adotada suplementação com silagem. Sendo assim, o sistema de produção da propriedade em estudo, de acordo com Assis e colaboradores (2005), é caracterizado como sistema de produção intensivo à pasto. Com o sistema de produção adotado na propriedade a produção de dejetos recuperáveis é baixa pois a maior parte dos dejetos ficam no pasto e nele são incorporados.

Os dejetos recuperáveis estão disponíveis na sala de espera para ordenha, localizada ao lado do biodigestor. Os animais frequentam esse local duas vezes ao dia e nele permanecem por cerca de 1-2 horas. O dejetos acumulados durante as duas ordenhas de cada dia é coletado manualmente e encaminhado uma porção ao biodigestor e outra à esterqueira (excedente), também utilizada como caixa de saída do biodigestor, que recebe o digestato (fertilizante orgânico).

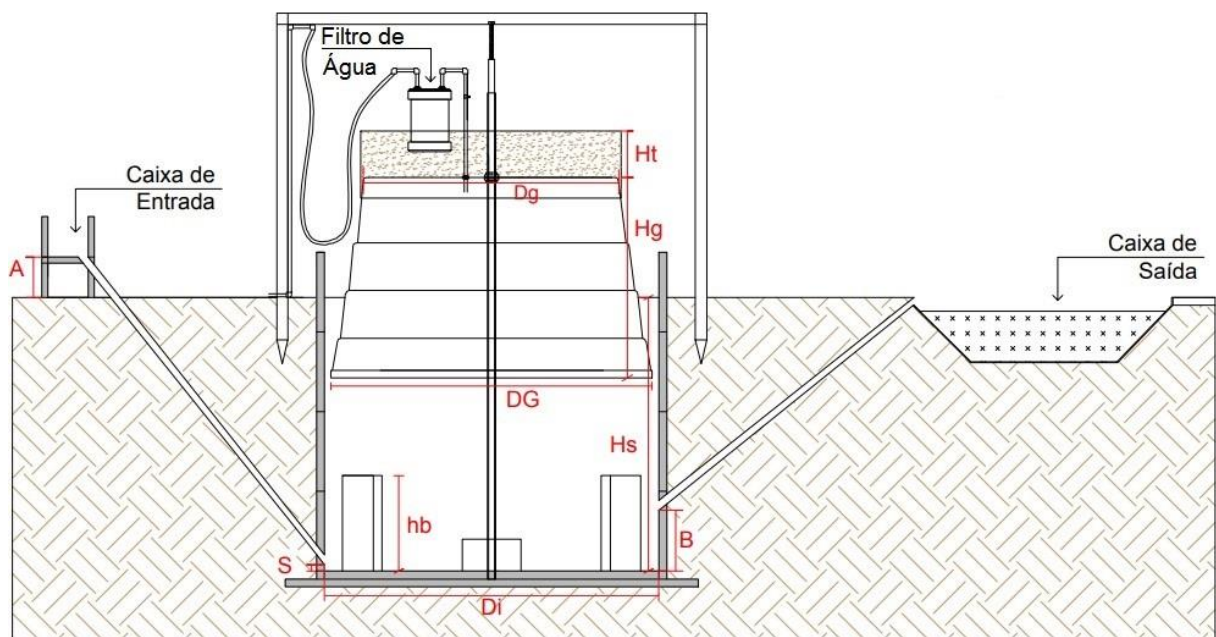
O biodigestor em questão foi construído a partir de uma recomendação da Cooperativa de Crédito Rural (CRESOL). O projeto utilizado consta em uma cartilha elaborada pela Diaconia Actaliança com o apoio da Caixa Econômica Federal “12 Passos para construir um biodigestor” (DIACONIA, 2013). A construção do mesmo foi realizada utilizando-se de materiais de baixo custo, e opera continuamente há dois anos (construído em 2017).

Os dados para realização deste trabalho foram obtidos em duas visitas à propriedade em estudo. Amostras de substrato e de fertilizante orgânico foram coletadas para posterior caracterização, parâmetros de operação do biodigestor e a composição do biogás foram determinados. As visitas ocorreram em 07/09/2019 e 29/10/2019 e essas datas enquadram-se, respectivamente, nas estações do ano inverno (temperaturas médias entre 13 °C a 22 °C) e primavera (temperaturas médias entre 16 °C a 25 °C), que foram escolhidas para verificar se há diferença significativa na composição do biogás devido à variação da temperatura ambiente e, conseqüentemente, da biodigestão.

O biodigestor selecionado como objeto de estudo é de modelo indiano, sendo composto por quatro componentes principais: um reservatório de biomassa (substrato), um reservatório de fertilizante orgânico, cúpula de gás (gasômetro) e tanque de fermentação.

Do reservatório de biomassa os dejetos são transferidos para o tanque de fermentação. No tanque de fermentação fica depositado o substrato a ser biodigerido, tendo em sua parte superior o acoplamento de um gasômetro móvel, de material impermeável e rígido que retém o biogás. O reservatório de fertilizante orgânico armazena esse coproduto líquido que sai do biodigestor. A Figura 2 ilustra esquematicamente o biodigestor em estudo e a Figura 3 consiste em uma imagem do biodigestor.

Figura 2– Esquema prático em corte do biodigestor do tipo indiano em estudo.



Fonte: O autor (2019).

As dimensões do biodigestor objeto de estudo, indicadas na Figura 2, são: $H_s = 2,00$ m (altura do nível do substrato); $DG = 2,00$ m (diâmetro maior do biodigestor); $Dg = 1,50$ m (diâmetro menor do gasômetro); $Di = 2,10$ m (diâmetro do tanque de fermentação); $Ht = 20$ cm (altura do contrapeso); $Hg = 1,35$ m (altura do gasômetro); $A = 30$ cm (altura da caixa de entrada); $S = 10$ cm (altura de entrada do tubo afluente); $B = 20$ cm (altura do tubo efluente); $hb = 60$ cm (altura dos batentes). O volume do gasômetro é de 3 m^3 , o volume do tanque de fermentação é $6,92 \text{ m}^3$, a caixa de entrada tem diâmetro $0,50$ m e altura $0,30$ m os totalizando um volume de $0,058 \text{ m}^3$, e a caixa de saída 8 m de comprimento, $4,50$ m de largura, $1,38$ m de profundidade totalizando volume aproximado de 50 m^3 .

Figura 3 – Imagem do biodigestor objeto de estudo.



Fonte: O autor (2019).

Para pressurizar o biogás para condução até o ponto de consumo, a parte superior do gasômetro foi envolta por uma cinta de alumínio com dimensões $4,8$ m de comprimento e $0,5$ m de largura. Esse espaço adicional na parte superior do gasômetro foi preenchido com terra para distribuir uniformemente o peso, o volume de terra inserido foi de $0,26 \text{ m}^3$ considerando uma altura de 15 cm de terra sobre a caixa e equivalente a 331 kg (considerando a densidade média da terra argilo-arenosa de 1250 kg/m^3 dada por Israelsen (1965). Dessa forma, aumenta-se a pressão do biogás no duto que o leva até o ponto de consumo (fogão doméstico).

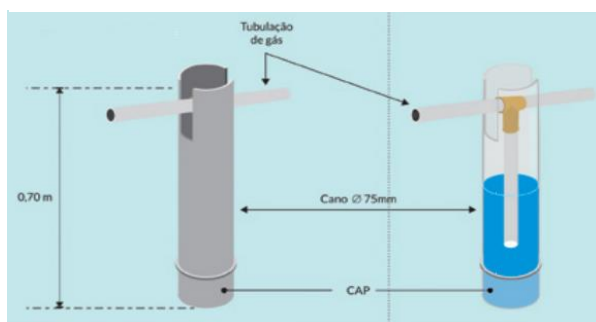
Para evitar que os componentes químicos presentes no biogás como amônia (NH_3) e gás sulfídrico (H_2S) provoquem danos aos equipamentos de queima, o biodigestor conta com um filtro de água localizado próximo à saída de biogás (ilustrado na Figura 2). O filtro é um recipiente fechado onde a entrada de biogás é submersa à água forçando a passagem do mesmo por ela, e o biogás é retirado na parte superior do recipiente por outra tubulação. A quantidade

de água presente no filtro é equivalente à metade do volume do filtro, quantidade essa que garante o fluxo de gás sendo filtrado. A desvantagem do uso desse filtro é a perda carga, o que implica considerável diminuição da pressão do biogás no duto de canalização até o ponto de consumo (DIACONIA, 2013; CANEVER, 2017; PEREIRA, 2018).

Após a passagem pelo filtro de água o biogás segue pela tubulação até o próximo filtro utilizado (de palha de aço). Entre os dois filtros há dois drenos na tubulação do biogás, utilizados para retirar a umidade remanescente no biogás, que pode condensar pela tubulação e acabar acumulando dentro da mesma prejudicando a sua condução. Os drenos estão instalados nos pontos mais baixos da tubulação, conforme recomendado na cartilha “12 passos para construir um biodigestor” (DIACONIA, 2013). O dreno consiste na instalação de um cano com diâmetro maior que a tubulação de gás, com aproximadamente 70 cm de comprimento. Com uma das extremidades tapada, é enterrado ortogonalmente em relação à tubulação de gás e preenchido metade de seu volume com água. Na tubulação uma conexão em T é instalada e um cano de 50 cm de mesma seção é adicionado e imerso na água, como é representado na Figura 4.

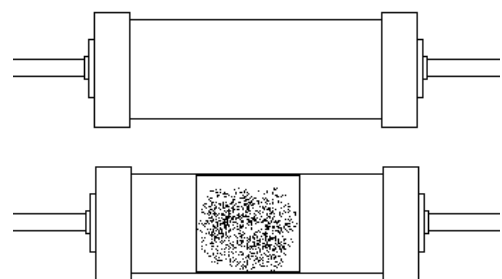
O segundo filtro utilizado é o filtro de palha de aço, a função desse filtro é remover qualquer resíduo de conteúdo corrosivo como o H_2S . O filtro foi construído pelo proprietário utilizando um pedaço de cano de diâmetro 100 mm e 25 cm de comprimento, 2 Cap (tampões) de diâmetro de 100 mm e duas flanges de $\frac{1}{2}$ polegada para conectar a tubulação de gás. Dentro desse cano de 100 mm é colocado $1 + \frac{1}{2}$ palha de aço de uso doméstico, aproximadamente 11,25 g. Segundo relato do proprietário a troca da palha de aço deve ser realizada entre 30 a 60 dias, conforme inspeção visual do estado da mesma pois nesse processo a palha de aço é oxidada. A representação esquemática do filtro de palha de aço pode ser vista na Figura 5.

Figura 4 – Representação esquemática dos drenos de umidade instalados na tubulação do biogás.



Fonte: Diaconia (2013)

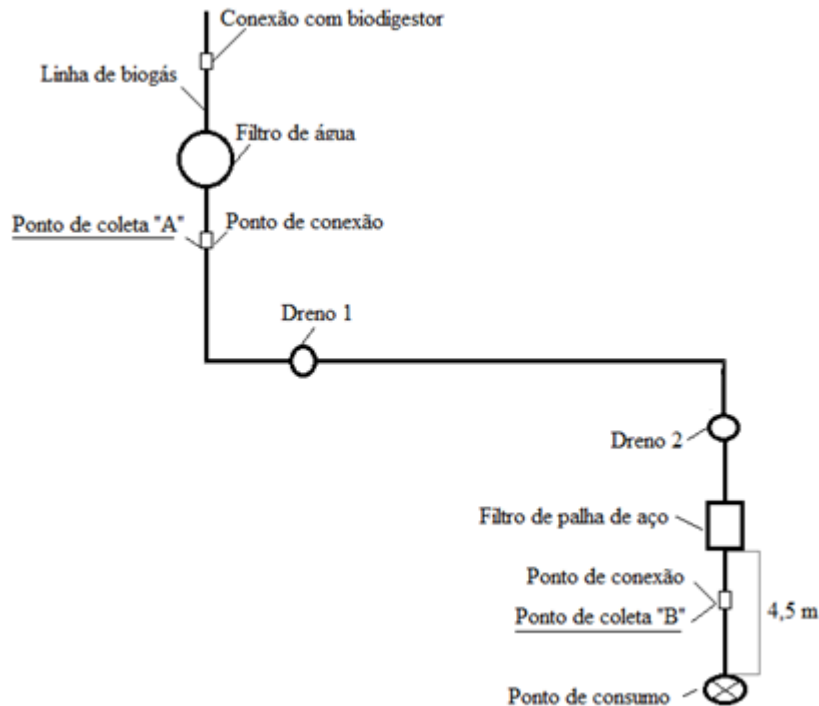
Figura 5 - Representação esquemática do filtro de palha de aço instalado na tubulação do biogás.



Fonte: O autor (2019)

O biogás gerado é consumido em um fogão doméstico de mesa de quatro queimadores localizado há 4,5 m do filtro de palha de aço, sendo que a tubulação que conduz o biogás do biodigestor até ele tem 55,4 m de comprimento total.

Figura 6 - Esquema prático da tubulação do biogás e pontos de coleta.



Fonte: O autor (2019).

O fogão instalado no ponto de consumo do biogás opera com uma pequena adaptação nos queimadores, que consiste em maior diâmetro do orifício de alimentação do biogás devido à pressão reduzida do biogás quando comparada à pressão típica do gás liquefeito de petróleo em botijões de 13 kg.

2.2 OPERAÇÃO DO BIODIGESTOR, PRODUÇÃO DE DEJETOS, BIOGÁS E DE FERTILIZANTE ORGÂNICO

O biodigestor em estudo é alimentado de forma intermitente, diariamente e apenas uma vez ao dia com um balde de aproximadamente 10 L de dejetos que são misturados a 10 L de água, seguindo a proporção de mistura dejetos e água de 1:1 em volume recomendada por Filho (1981) para garantir o fluxo normal de carga e descarga.

A estimativa da produção de dejetos seguiu a metodologia utilizada por Campos (1997), onde 8% a 11% do peso do animal corresponde à produção de dejetos por dia. Como o sistema de produção da propriedade é caracterizado como sistema intensivo à pasto, nem todos os dejetos produzidos são recuperáveis. Assim, para estimar a produção diária de dejetos bovinos leiteiros (*PDDDB*) na propriedade em estudo, utilizou-se a Equação 7, descrita por Mito e colaboradores (2018), onde estima-se a produção de dejetos em função do tempo de confinamento.

$$PDDDB = N \times TC \times PE \quad (7)$$

Onde *N* é o número de animais, *TC* o tempo de confinamento em horas e *PE* é produção específica de dejetos em kg/h. A produção específica de dejetos (*PE*) foi determinada considerando-se o peso médio dos animais, a média de produção de dejetos por animal e o período de um dia (24 horas) conforme Equação 8.

$$PE = \frac{\text{Peso médio animal} \times \text{Média produção dejetos por animal}}{24} \quad (8)$$

Para avaliar a produção diária de CH₄ utilizou-se da metodologia demonstrada no estudo de Mito e colaboradores (2018), na qual a produção diária de metano (*PrM*) é baseada na concentração de *SV* presentes em uma determinada quantidade de dejetos (*Q*) que são multiplicados por um fator de conversão de *SV* para m³ de CH₄ (*B₀*). A Equação 9 descreve a estimativa de produção de biogás utilizada.

$$PrM = SV \times Q \times B_0 \quad (9)$$

Onde *B₀* é a capacidade máxima teórica de produção de metano pelo dejetos em m³ de CH₄/kg de SV, *SV* é concentração de sólidos voláteis em kg de SV/kg de substrato e *Q* é quantidade de dejetos adicionada por dia ao biodigestor (kg/dia). O fator de conversão para dejetos bovinos leiteiros admitido de Mito e colaboradores (2018) foi *B₀* = 0,21 m³ de CH₄/kg de SV.

Para avaliar as perdas de carga, velocidade e vazão pela passagem do biogás pelos filtros de água e de palha de aço, bem como os efeitos da tubulação, utilizou-se um tubo de Pitot estático série 160 (Dwyer Instruments Inc.) de 156 cm de comprimento total e ponta em

L de 19,5 cm de comprimento, com diâmetro externo do tubo de 7,94 mm e da ponta de 3,18 mm, acoplado a um analisador de gases de combustão Greenline MK2 (Eurotron Italiana S.r.l) que determina a velocidade de gases em dutos a partir do diferencial de pressão medido por esse equipamento. Para isso, deve-se informar ao instrumento o tipo de combustível de referência dentre os que constam na sua base de dados (gás natural foi selecionado por ser o que mais se aproxima do biogás) e a densidade do combustível.

Três valores de densidade relativa do biogás foram considerados: 1,03 kg/m³ (para composição de 75% CH₄ e 25% de CO₂), 1,15 kg/m³ (para composição de 65% de CH₄ e 35% de CO₂) e 1,21 kg/m³ (para composição de 60% de CH₄ e 40% de CO₂), todos os valores em condições normalizadas de temperatura e pressão (T = 0 °C e P = 1 atm) conforme Zilotti (2012). O duto onde o tubo de Pitot foi inserido tem diâmetro interno de 15,87 mm e externo de 20,87 mm. As medidas foram realizadas em triplicata e em dois pontos diferentes: o primeiro ponto de análise foi após a passagem pelo filtro de água, localizado na parte superior do biodigestor, identificado como ponto A na Figura 6; e o segundo ponto de análise foi após o segundo filtro, o filtro de palha de aço, localizado há cerca de 4,5 m do ponto de uso identificado como ponto B na Figura 6.

A vazão de biogás foi determinada relacionando-se a velocidade média medida para as três densidades consideradas à área da seção transversal do duto, 0,198 mm², por meio da Equação 10 a seguir.

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (10)$$

A produção de fertilizante orgânico foi estimada em razão da alimentação do biodigestor, ou seja, a quantidade de dejetos que é adicionada por dia no biodigestor é igual à quantidade de fertilizante orgânico que sai do mesmo.

O fertilizante orgânico resultado da digestão dos dejetos é encaminhado para o tanque de armazenamento, de onde é bombeado para fertirrigação de pastagem na frequência de uma vez a cada dois meses, aproximadamente, dado que o volume acumulado nesse local varia com a ocorrência de chuvas por ser aberto.

2.3 CARACTERIZAÇÃO DO SUBSTRATO E DO DIGESTATO (FERTILIZANTE ORGÂNICO)

Amostras de dejetos bovinos frescos (Amostra 1), de dejetos bovinos diluídos na proporção de 1:1 em volume (Amostra 2) e do digestato ou fertilizante orgânico (Amostra 3) foram coletadas no dia 29/10/2019. A amostra de dejetos bovinos frescos foi coletada na sala de espera, consistindo em uma mistura de esterco e urina. A amostra de dejetos bovinos diluídos foi coletada na caixa de entrada do biodigestor (Figura 7), onde esse substrato é preparado previamente à alimentação do biodigestor. A amostra do digestato resultante foi coletada na caixa de saída do biodigestor (Figura 8). A temperatura do substrato foi determinada no momento da coleta das amostras de biogás, sendo considerada a temperatura ambiente.

Figura 7 – Caixa de entrada biodigestor.



Fonte: O autor (2019).

Figura 8 – Caixa saída biodigestor.



Fonte: O autor (2019).

As amostras foram devidamente acondicionadas e mantidas sob refrigeração até o momento da análise para determinação dos teores de sólidos totais (ST), sólidos fixos (SF) e sólidos voláteis (SV). A determinação desses parâmetros seguiu metodologia descrita por Wilder e colaboradores (1997) e foi realizada em triplicata.

Para determinar o teor de ST uma massa de amostra de aproximadamente 1 g foi pesada em balança de precisão analítica de 0,0001 g da marca Katashi utilizando-se um cadinho de porcelana previamente calcinado e tarado (B). Após a pesagem e anotação da massa inicial (C), a amostra foi levada para uma estufa de secagem de 100 L da marca Lucadema modelo 80/100 previamente aquecida até a temperatura de 105 °C e nela mantida por 2 h. Após esse período, a amostra foi mantida em um dessecador para resfriamento e, posteriormente pesada, a massa anotada (A), e novamente levada à estufa e nela mantida por outro período de tempo

(de 1 h). Esse procedimento foi repetido até se atingir massa constante da amostra seca. O teor de *ST* foi estimado pela Equação 11 (WILDER *et al.*, 1997).

$$ST = \frac{(A-B) \times 100}{(C-B)} \quad (11)$$

Complementarmente ao método de determinação dos sólidos totais (*ST*) descrito por Wilder e colaboradores (1997), foi utilizado uma balança determinadora de umidade, com sistema de aquecimento halógeno, com capacidade de 60 g e precisão 0,001 g, com faixa de temperatura de 50 °C a 200 °C, modelo MOC-63U da marca SHIMADZU, que permitiu a análise do teor de *ST* de forma mais rápida. O uso deste método teve o intuito de verificar a confiabilidade das análises executadas conforme previamente descrito, comparativamente.

Para determinar o teor de *SF* a amostra seca produzida na determinação de *ST* foi submetida à calcinação em forno mufla modelo 2000 G da marca Zezimaq previamente aquecido até 600 °C por cerca de duas horas. Após esfriar, a amostra foi pesada (*D*), e o teor de *SF* determinado pela Equação (12). Por fim, o teor de *SV* foi determinado pela Equação (13), sendo os *SV* a fração de massa que foi perdida no aquecimento (WILDER *et al.*, 1997) e correspondendo, aproximadamente, à fração de matéria orgânica passível de biodigestão.

$$SF = \frac{(D-B) \times 100}{A-B} \quad (12)$$

$$SV = \frac{(A-D) \times 100}{A-B} \quad (13)$$

Onde *SF* é o teor de sólidos fixos em porcentagem; *SV* é o teor de sólidos voláteis em porcentagem; *A* é a tara do recipiente somados a massa seca de amostra em gramas; *B* é a tara do recipiente em gramas; *D* é a tara do recipiente somados as cinzas em gramas.

Os resultados da caracterização dessas amostras foram utilizados para análise do desempenho da biodigestão, tal como descrito no item 2.5.

2.4 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO BIOGÁS

Tal como previamente descrito, a composição do biogás foi determinada em duas estações do ano: inverno (caracterizado por temperaturas menores) e primavera (caracterizada por temperaturas maiores que no inverno) para verificar se houve diferença significativa na

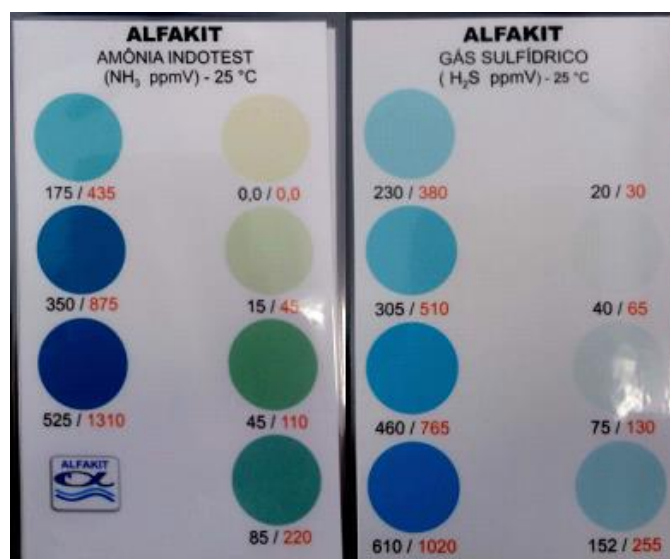
composição do biogás devido à variação da temperatura ambiente e, conseqüentemente, da biodigestão.

Amostras do biogás foram coletadas em triplicata em dois pontos de coleta (indicados na Figura 6) e sua composição foi determinada. A primeira coleta ocorreu após o filtro de água instalado no próprio biodigestor, sobre o gasômetro (ponto de coleta A). O segundo ponto de coleta foi localizado há 4,5 m do ponto de uso que fica há 55,4 m do biodigestor (comprimento da tubulação), onde encontra-se instalado o filtro de palha de aço (ponto de coleta B).

Para a caracterização do biogás produzido no biodigestor em estudo foi utilizado um kit portátil para análise de biogás da Alfakit. Esse kit de análise permite ao usuário determinar a composição volumétrica (ppmV) do biogás em termos de gás sulfídrico (H_2S), amônia (NH_3), gás carbônico (CO_2) e metano (CH_4) (PAIM, 2018).

Para realizar essas análises o kit utiliza de métodos indicadores colorimétricos para determinação da concentração de H_2S (utilizando-se azul de metileno) e de NH_3 (utilizando-se indofenol) e volumétrico para determinação da concentração de CO_2 e de CH_4 (KUNZ, 2007). Na metodologia colorimétrica foram utilizadas cartelas disponíveis no kit de análise (ilustrados na Figura 9), aplicáveis à amostra de biogás na temperatura de 25 °C e 1 atm de pressão em base úmida, e os resultados são expressos em ppmV. Quando a temperatura no momento da análise era diferente de 25 °C, as concentrações de NH_3 e H_2S foram corrigidas, conforme o manual da Alfakit (KUNZ, 2007).

Figura 9 – Cartelas colorimétricas de referência para determinação das concentrações de NH_3 e H_2S pelo kit de análise do biogás da Alfakit.



Fonte: Paim (2018).

Para determinar a porcentagem de CO₂ e de CH₄, uma amostra de biogás foi adicionada a uma solução onde o gás carbônico é absorvido, alterando o volume da solução que, por meio de uma escala fixada no suporte analítico (Figura 10), possibilita leitura direta da porcentagem de CO₂ e, por diferença, a concentração CH₄ dado que esses dois gases são os componentes majoritários da mistura gasosa que é o biogás (KUNZ, 2007).

Figura 10 – Suporte de análise de CO₂ e CH₄ que compõem o kit de análise do biogás da Alfakit.



Fonte: Paim (2018).

Utilizou-se o *software Origin 6.1*, função *one-way ANOVA*, para analisar estatisticamente os resultados da caracterização química do biogás. Assumiu-se nível de significância de 0,05 nessa análise.

2.5 CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS

O biogás foi caracterizado energeticamente em termos de Poder Calorífico Inferior (PCI) e índice de Wobbe (*I_w*). O Poder Calorífico Inferior (*PCI*) do biogás foi estimado a partir da reação de combustão estequiométrica (Reação 1), tal como realizado por Paim (2018) a partir de Hilsdorf (2015), que está descrita na Equação 14.



$$PCI = hg \times \frac{G \times 1000}{22,4} \quad (14)$$

Onde PCI é o Poder Calorífico Inferior (kJ/m^3), G é o teor de metano no biogás em volume, hg é a entalpia de combustão do metano (kJ/mol), sendo essa igual -802 kJ/mol nas condições de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e 1 atm , tal como descrito por USP (2006).

O índice de Wobbe é definido pelo quociente entre o PCI e a raiz quadrada da densidade do gás e é expresso em (MJ/m^3) como descrito na Equação 15.

$$Iw = \frac{PCI}{\sqrt{\rho}} \quad (15)$$

Onde PCI é o Poder Calorífico Inferior (kJm^3) e ρ a densidade relativa do biogás (kg/m^3).

2.6 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO BIODIGESTOR

Para avaliar o desempenho na operação do biodigestor objeto em estudo foram identificados alguns parâmetros para possibilitar a comparação de dados e também a obtenção de informações até então desconhecidas nesse modelo de biodigestor. Assim, neste trabalho foram selecionados os parâmetros descritos a seguir.

A carga orgânica aplicada (COA) foi obtida por meio da Equação 1 reportada no item 1 deste trabalho. Tendo o valor de COA, foi possível identificar o rendimento do biogás dado em m^3/kg por meio da Equação 4.

A produtividade do biogás foi obtida por meio da Equação 3. A eficiência do aproveitamento da matéria orgânica disponível pode ser traduzida por meio da Equação 5, que demonstra a taxa de degradação do substrato. A potência disponível também foi analisada por meio da Equação 6.

3 RESULTADOS

3.1 PRODUÇÃO DE DEJETOS, DE BIOGÁS E DE FERTILIZANTE ORGÂNICO

A produção de dejetos foi estimada utilizando a relação de Campos (1997), citada no item 2.1 que descreve que cerca de 8% a 11% do peso do animal corresponde a produção de dejetos por dia. Considerando-se que as vacas da propriedade em estudo têm peso médio de

400 kg, a produção diária de dejetos (esterco + urina) estimada foi de 32-44 kg por animal por dia, totalizando uma produção de 1.088 kg a 1.496 kg diários.

A produção específica de dejetos (*PE*) foi estimada utilizando a Equação 8 descrita no tópico 2.2, e os valores utilizados na equação foram apresentados no tópico 2 que relata que o peso médio dos animais da propriedade é de 400 kg e tópico 2.2 que estima que 8% a 11% do peso do animal corresponde à produção de dejetos. Considerando-se a produção média de dejetos igual a 8% do peso do animal, a *PE* foi 1,33 kg/h e considerando-se 11%, a *PE* foi de 1,83 kg/h.

A fração de dejetos recuperáveis na propriedade foi estimada pela Equação 7 descrita no tópico 2.2, utilizando o *PE* estimado. Os resultados das estimativas da fração de dejetos recuperáveis entre as ordenhas pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2 - Estimativa da fração de dejetos recuperáveis para diferentes tempos de ordenha e produção específica.

Tempo por ordenha	Nº de ordenhas/dia	Estimativa dejetos com PE (8%)	Estimativa dejetos com PE (11%)
1 h	2	90,66 kg	124,66 kg
2 h	2	181,33 kg	249,33 kg

Fonte: O autor (2019).

Sabe-se que na propriedade a alimentação diária do biodigestor é de aproximadamente 10 kg ao dia somados a 10 kg de água, sendo utilizado a densidade do dejetos para este trabalho equivalente à da água (aproximadamente 1000 kg/m³), sendo assim, são tratados apenas 11% do valor total produzido durante as ordenhas, considerando o valor mínimo de 90,66 kg.

A produção diária CH₄ foi estimada tal como descrito na Equação 9. Os valores de concentração de SV foram obtidos da caracterização da amostra de dejetos diluído descrita no tópico 3.2, e a quantidade de dejetos inseridos no biodigestor foi a reportada no tópico 2.2. A produção estimada de CH₄ (*PrM*) com a rotina de alimentação no biodigestor é de 0,20 m³ de CH₄ equivalentes a 202 L de CH₄. Se a quantidade mínima de dejetos estimada (90,66 kg + 90,66 kg de água) fosse disposta no sistema de biodigestão, a produção estimada de CH₄ (*PrM*) seria de 1,83 m³, equivalentes 1831,4 L de CH₄, quantidade nove vezes maior que a estimada para rotina atual, porém, o biodigestor em estudo não suportaria toda esta quantidade de dejetos.

Os resultados da determinação do diferencial de pressão, da velocidade e da vazão do biogás, conforme descrito no tópico 2.2, podem ser observados na Tabela 3, em termos de média e desvio padrão (DP), onde ID A (primeira coluna) corresponde ao ponto de coleta

localizado após a passagem pelo filtro de água localizado na parte superior do biodigestor (identificado como ponto A na Figura 6) e ID B corresponde ao segundo ponto de coleta (B) localizado após o segundo filtro, o filtro de palha de aço, localizado há cerca de 4,5 m do ponto de consumo do biogás.

Tabela 3 – Resultados das determinações de diferencial de pressão, velocidade e vazão do biogás.

ID *	Densidade (kg/m ³)	Parâmetro	1	2	3	Média e DP	Vazão (m ³ /s)
A	1,03	ΔP (mmHg)	0,52	0,54	0,55	0,54 \pm 0,02	0,0020
		Velocidade (m/s)	10,1	10,3	10,4	10,27 \pm 0,15	
	1,15	ΔP (mmHg)	0,46	0,45	0,42	0,44 \pm 0,02	0,0017
		Velocidade (m/s)	8,9	8,8	8,4	8,70 \pm 0,26	
	1,21	ΔP (mmHg)	0,55	0,56	0,56	0,56 \pm 0,01	0,0019
		Velocidade (m/s)	9,7	9,7	9,6	9,67 \pm 0,06	
B	1,03	ΔP (mmHg)	0,18	0,19	0,2	0,19 \pm 0,01	0,0012
		Velocidade (m/s)	6	6,1	6,3	6,13 \pm 0,15	
	1,15	ΔP (mmHg)	0,17	0,19	0,19	0,18 \pm 0,01	0,0011
		Velocidade (m/s)	5,6	5,8	5,8	5,73 \pm 0,12	
	1,21	ΔP (mmHg)	0,19	0,17	0,16	0,17 \pm 0,02	0,0011
		Velocidade (m/s)	5,5	5,3	5,2	5,33 \pm 0,15	

*ID = identificação do ponto de medida/coleta indicado na Figura 6

Fonte: O autor (2019).

A partir dos resultados da Tabela 3 foi possível perceber a influência da passagem do biogás pelos filtros de água e de palha de aço e da distância entre o biodigestor e o ponto de uso. Observou-se uma redução de mais de 50% no diferencial de pressão entre o ponto A e o ponto B, caindo de uma média de 0,51 mmHg para 0,18 mmHg. Analogamente, as velocidades também obtiveram redução de 9,57 m/s para 5,73 m/s, reduzindo 60%, em média. A vazão de biogás também apresentou redução em média de 58%, passando de 0,0019 m³/s para 0,0011 m³/s ao passar pelos filtros.

Contudo, percebe-se que apesar da redução expressiva de pressão, velocidade e vazão, isso não impediu o uso final do biogás, pois o proprietário do biodigestor realizou a retirada de um redutor de pressão e vazão em dois dos quatro queimadores de seu fogão, que são necessários quando GLP é utilizado. A alteração realizada pode ser observada na Figura 11 e na Figura 12.

Figura 11 - Queimador sem bico injetor.



Fonte: O autor (2019).

Figura 12 - Bico injetor original.



Fonte: Tecnolar (2019).

Com isso, a vazão de biogás é suficiente para garantir o funcionamento normal, demonstrado na Figura 13.

Figura 13 - Chama do biogás produzido pelo objeto de estudo queimando no fogão doméstico.



Fonte: O autor (2019).

Como a produção de fertilizante orgânico nesse trabalho foi estimada considerando-se a alimentação do biodigestor, ou seja, a quantidade de dejetos adicionada por dia, sabendo-se que a alimentação do biodigestor é de 10 L de dejetos por dia somados a 10 L de água, a produção de fertilizante orgânico aproxima-se do valor do substrato adicionado, um total de 20 L/dia que são utilizados na fertirrigação do pasto, tal valor estimado pode ser variável devido ao fato do processo de biodigestão diminuir a densidade do substrato ao se tornar digestato.

Figura 14 - Tanque de fertilizante orgânico.



Fonte: o autor (2019).

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO SUBSTRATO E DO FERTILIZANTE ORGÂNICO

A análise do teor de sólidos totais (ST) nas amostras de substrato (Amostra 1 e Amostra 2) e digestato (Amostra 3) foi realizada em triplicata e, em virtude do espaço da mufla disponível, a análise do teor de sólidos voláteis (SV) e de sólidos fixos (SF) foi realizada em duplicata. Os dados obtidos, média e desvio padrão (DP), podem ser observados na Tabela 4. As amostras foram coletadas no dia 29 de outubro à temperatura ambiente de 28 °C.

Tabela 4 – Resultados da análise de sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV) e sólidos fixos (SF) das amostras de dejetos fresco, dejetos diluído 1:1 e digestato.

Identificação	Parâmetro	Repetição			Média e DP
		1	2	3	
Amostra 1 (dejetos fresco)	ST (%)	15,25	14,49	14,86	14,87 ± 0,38
	SV (%)	82,79	82,84	-	82,81 ± 0,04
	SF (%)	17,21	17,16	-	17,19 ± 0,04
Amostra 2 (dejetos diluído 1:1)	ST (%)	5,52	5,70	5,79	5,67 ± 0,14
	SV (%)	86,89	79,24	-	83,07 ± 5,41
	SF (%)	13,11	20,76	-	16,93 ± 5,41
	ST (%)	1,36	1,48	1,61	1,48 ± 0,13

Amostra 3 (digestato)	SV (%)	75,74	72,83	-	74,29 ± 2,06
	SF (%)	24,26	27,17	-	25,71 ± 2,06

Fonte: O autor (2019).

Em análise complementar realizada em balança determinadora de umidade, o teor de sólidos totais foi determinado para as três amostras (dejeito fresco – Amostra 1, dejeito diluído 1:1 – Amostra 2, digestato – Amostra 3) e a análise foi realizada somente uma vez para cada amostra. Os resultados obtidos para as amostras foram: 13,13%, 5,72% e 1,51% para dejeito fresco, diluído 1:1 e digestato, respectivamente. A análise complementar demonstrou proximidade entre os valores, confirmando a equivalência entre os dois métodos.

O teor de ST para o dejeito fresco foi de aproximadamente $14,87 \pm 0,38\%$, valor muito próximo do resultado encontrado por Brasil (2018), que obteve média de 12,9% para o dejeito bovino leiteiro com peso de aproximadamente de 450 kg.

Batti (2018) realizou um estudo semelhante e encontrou valores de ST entre 17,67% e 8,66% para dejetos frescos e 1,97% para fertilizante orgânico. Apesar de os resultados não estarem na média encontrada na literatura, ainda são consideráveis. Batti (2018) justifica que a alteração é devida à diluição do mesmo e principalmente ao manejo dos dejetos.

Com a diluição percebe-se que à medida que o dejeito é diluído, o teor de ST diminui, o que explica a porcentagem menor de ST nas amostras de dejeito diluído e fertilizante orgânico. Deganutti e colaboradores (2002) recomendam para biodigestores do tipo indiano um teor de ST no substrato inferior a 8%, como o teor de ST obtido na amostra diluída foi 5,67% o teor está dentro do recomendado.

No presente estudo o teor médio de SV para as amostras de dejeito fresco e diluído foi de $82,81 \pm 0,04\%$ e $83,07 \pm 5,41\%$, respectivamente. Como esperado, ambos os valores foram muito próximos por se tratar da mesma amostra, apenas feita a diluição em uma delas. Esses valores estão em concordância com a literatura, visto que Brasil (2018) reportou um valor de 80% de SV. Já Comastri Filho (1981) verificou que a concentração de sólidos voláteis no esterco bovino varia entre 80% a 85%.

A análise do teor de sólidos voláteis das amostras torna-se indispensável para avaliar o potencial da produção de biogás já que corresponde aproximadamente à fração que sofre fermentação no processo de biodigestão. Havendo a redução de sólidos voláteis, isso indica que a fração orgânica da biomassa está sendo degradada durante o processo de biodigestão (JUNQUEIRA, 2014), e o grau de conversão da matéria orgânica define a eficiência do processo.

O teor médio de ST obtido na amostra de digestato analisada foi de $1,48 \pm 0,13\%$, valor próximo ao encontrado por Batti (2018), cujo estudo foi realizado no mesmo modelo de biodigestor e para o mesmo tipo de substrato. O teor médio de SV encontrado no digestato foi de $74,29 \pm 2,06\%$, valor inferior ao encontrado na entrada do biodigestor ($83,07 \pm 5,41\%$), o que caracteriza pequena redução da concentração de sólidos voláteis e, por consequência, baixo grau de conversão da carga orgânica.

Amaral e colaboradores (2004), analisaram a biodigestão de dejetos de bovinos leiteiros em biodigestores indiano e chinês e obtiveram percentuais de 26,42% a 39,19% de redução de SV em relação à entrada (afluente) do biodigestor indiano.

Matos (2016), também avaliou a biodigestão anaeróbia de resíduos de gado leiteiro para estimar a produção de biogás e fertilizante orgânico em biodigestores de bancada com o princípio de funcionamento de um biodigestor indiano. Em seu estudo encontrou um potencial de redução de SV de 25% a 27%. Ressaltando que seus biodigestores não tiveram controle de temperatura e, por isso, ficaram expostos à sua variação.

Fernandes (2016), analisou as características físico-químicas e microbiológicas da biodigestão de dejetos bovinos leiteiros e suínos em biodigestores em escala piloto seguindo o princípio do biodigestor indiano. Em seu estudo obteve um percentual de redução de sólidos voláteis no dejetos bovino leiteiro de 18,18% a 19,13%.

Os valores de redução de sólidos voláteis encontrados por Amaral e colaboradores (2004), Matos (2016) e Fernandes (2016), ficaram entre 18,18% a 39,19%, podendo ser devido aos dejetos terem em sua composição matéria orgânica com compostos de baixa biodegradabilidade (recalcitrantes), os quais dificilmente são processados por microrganismos como relatado em Brasil (2016).

O biodigestor em estudo apresentou uma redução no teor de SV de 10,28% estando abaixo dos níveis encontrados na literatura por Amaral e colaboradores (2004), Matos (2016) e Fernandes (2016). Acredita-se que esse valor está abaixo dos níveis encontrados na literatura devido às características construtivas do biodigestor que não favorecem o fluxo de matéria orgânica dentro do mesmo. Nos modelos do tipo indiano é comum haver uma parede divisória no tanque de fermentação para forçar um fluxo de matéria orgânica no interior do biodigestor, como descrito por Deganutti e colaboradores (2002) e ilustrado na Figura 1, porém, a construção do biodigestor objeto de estudo seguiu a cartilha de construção “12 passos para construir um biodigestor” elaborada por Diaconia (2013) onde não consta a implementação dessa parede, o que ocasiona a saída de matéria orgânica pouco digerida do biodigestor.

Outro aspecto que confirma a baixa redução no teor de SV é a ocorrência de fermentação no tanque de fertilizante reportado, que aconteceu devido à baixa redução de SV do biodigestor e a deposição do restante da matéria orgânica disponível após a lavagem da sala de ordenha, que não é alimentada ao biodigestor.

3.3 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO BIOGÁS

A primeira análise do biogás ocorreu no inverno, com temperatura média de 18,5 °C, e a segunda na primavera, com temperatura média 27 °C, sendo realizada em triplicata, tal como descrito no item 2.4. De acordo com a temperatura nos dias de análise foram utilizadas tabelas para correção da concentração em função da temperatura nas análises de NH₃ e H₂S. Já os resultados das análises de CO₂ e CH₄ permaneceram reportados à temperatura ambiente, que em um mesmo dia teve variação devido ao tempo de execução das análises que foi em torno de 2 h para cada ponto amostral. No inverno, as amostras identificadas como “A” foram analisadas sob uma temperatura de 16 °C, enquanto as amostras “B” a 21 °C. Já na primavera, a temperatura registrada para as amostras “A” foi de 26 °C, e para as amostras “B”, 28 °C.

A Tabela 5 apresenta os resultados (média e desvio padrão) da análise do biogás coletado imediatamente após o filtro de água (ponto A da Figura 6) – amostras A1, A2 e A3 – e do biogás coletado após passagem pelo filtro de água e pelo filtro de palha de aço (ponto B da Figura 6) – amostras B1, B2 e B3.

Tabela 5 – Resultados da caracterização química do biogás.

Identificação	Amostra	NH ₃	H ₂ S	CH ₄	CO ₂
		[ppmV] a 25 °C	[ppmV] a 25 °C	[%] T _{amb}	[%] T _{amb}
T _A = 16 °C	A1	0	750	67,5	32,5
	A2	0	750	65	35
	A3	0	750	67,5	32,5
	Média e desvio padrão	0 ± 0	750 ± 0	66,7 ± 1,4	33,3 ± 1,4
Inverno	B1	0	122,5	77,5	22,5
	B2	0	120	65	35
	B3	0	60	60	40
	Média e desvio padrão	0 ± 0	100,8 ± 35,4	67,5 ± 9,0	32,5 ± 9,0
T _A = 26 °C	A1	0	152	75	25
	A2	0	152	70	30
	A3	0	230	77,5	22,5

Primavera	Média e desvio padrão	0 ± 0	178 ± 96,3	74,2 ± 3,8	25,8 ± 3,8
T_B = 28 °C	B1	15	235	75	25
	B2	0	235	80	20
	B3	0	310	80	20
	Média e desvio padrão	5 ± 8,7	260 ± 43,3	78,3 ± 2,9	21,7 ± 2,9

Fonte: o autor (2019).

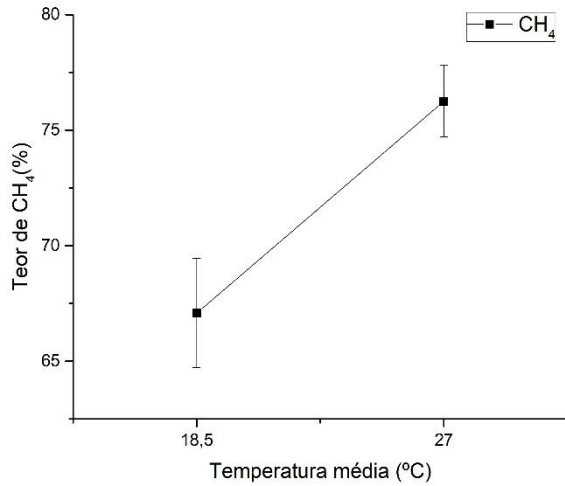
As temperaturas médias durante as análises foram de 18,5 °C no primeiro dia de análise e 27 °C no segundo dia. Conforme citado por Nogueira (1986), a faixa ideal para operação de um biodigestor deve ser entre 30 °C a 35 °C, entretanto, acima de 10 °C já ocorre o processo de biodigestão, tendo produção de biogás.

Observa-se que nas amostras B1, B2 e B3 coletadas na primavera, onde a temperatura encontrou-se mais próxima do valor considerado ideal citado por Nogueira (1986), a produção de CH₄ foi maior. Segundo Van Haandel e Lettinga (1994), em temperaturas mais altas a velocidade das reações biológicas dos microrganismos é maior, resultando em uma operação mais eficiente e um tempo de detenção hidráulica reduzido. Entretanto, em temperaturas mais baixas o processo de biodigestão também ocorre, porém, a eficiência diminui consideravelmente, como pode ser observado nas amostras obtidas no inverno, quando a temperatura se encontrava abaixo do valor considerado ideal, em média de 18,5 °C.

A concentração de CH₄ analisada nos dois dias de coleta apresentou uma diferença significativa quando comparadas todas as análises realizadas em cada estação (inverno e primavera), ou seja, os pontos amostrais A e B de uma estação comparados aos pontos A e B da outra estação (F = 10,52174 e p = 0,00881) para significância <0,05. Dessa forma, acredita-se que essa variação se deu pela alteração de temperatura, pois na primavera o biodigestor encontrava-se em operação em temperatura próxima à faixa considerada ideal. Da mesma forma, a concentração de CO₂ apresentou uma diferença significativa (F = 10,51174 e p = 0,00881) entre as diferentes estações, reduzindo sua concentração à medida que a temperatura

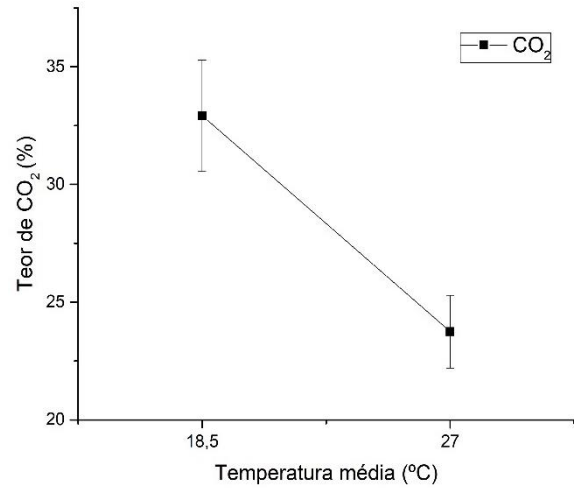
e a concentração de CH_4 aumentaram. Os gráficos de variância de concentração obtidas em cada estação para cada componente foram representados na Figura 15 e na Figura 16.

Figura 15 - Variância da concentração de CH_4 .



Fonte: O autor (2019).

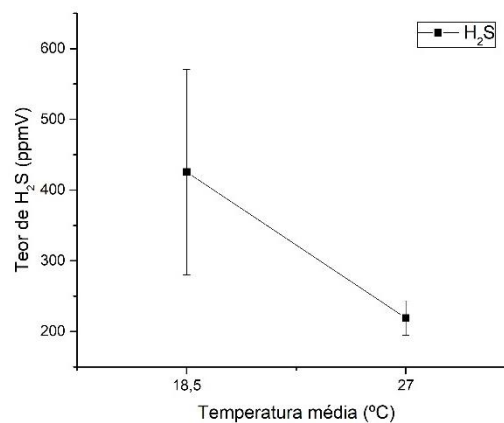
Figura 16 - Variância da concentração de CO_2 .



Fonte: O autor (2019).

As concentrações de H_2S obtidas nos dois dias não diferiram significativamente entre si (valor de $F = 1,95891$ e valor de $p = 0,19188$), não sofrendo influência da temperatura, tal como demonstrado na Figura 17.

Figura 17 – Variância da concentração de H_2S entre as amostras de biogás analisadas.



Fonte: O autor (2019).

Como as concentrações de H_2S apresentaram uma grande variação, acredita-se que seja devido à análise utilizada não ser um método preciso dado que é utilizada faixas amplas de valores de concentração (Figura 9 – cartela colorimétrica), podendo ter incorrido em

interpretações erradas durante a análise colorimétrica. Apesar de os valores não apresentarem um padrão, ainda estão dentro da faixa limite de 0 a 10000 ppmV apresentada em um estudo de composição de biogás proveniente da digestão anaeróbia realizado por Canever (2017). Contudo, sugere-se um novo estudo com outros métodos analíticos para obter uma concentração mais precisa.

A concentração de NH_3 obtida nesse trabalho foi de majoritariamente nula. De acordo com Canever (2017), esse valor não deve ser superior a 100 ppmV. Esse valor é explicado devido à alta solubilidade de NH_3 em água, assim, ao passar pelo filtro de água os traços de amônia contidos no biogás ficaram retidos na mesma.

Considerando os resultados obtidos da análise do biogás apresentados na Tabela 5, verificou-se que a concentração de metano está em conformidade com os estudos realizados por Lins, Mito e Fernandes (2015), que avaliaram a composição média do biogás obtido na biodigestão de diferentes tipos de biomassa, e em análise de dejetos da bovinocultura leiteira encontraram uma composição de 59,6% de CH_4 , 39,1% de CO_2 e 329,3 ppmV de H_2S .

Machado e colaboradores (2009), analisaram a produção de biogás proveniente de dejetos bovinos leiteiros da raça Holandesa, obtendo composição média 70,48% de CH_4 . Paim (2018), realizando um estudo em um biodigestor semelhante ao estudado, encontrou um valor médio da concentração de CH_4 de 71,0%, estando em conformidade com a literatura, que indica faixa de concentração ideal de 50% a 80% e sendo considerado um bom valor energético dado que sendo o metano o componente de mais energético, deseja-se uma maior porcentagem do mesmo no biogás para maior poder calorífico e maior potencial de aplicação. Dessa forma, o biogás analisado neste trabalho está próximo dos valores médios da literatura.

3.4 CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS

Para obter o valor do PCI, utilizou-se concentração de metano de 72,9% (valor médio entre as amostras do tipo B obtidos no item 3.2) pois corresponde à medição mais próxima do ponto de uso (Ponto B). A partir da Equação 14 encontrou-se PCI de 26,10 MJ/m³, equivalentes a 6.238,95 kcal/m³ (T = 25 °C e P = 1atm). Oliveira (2009) afirma que o PCI pode variar de 5.000 kcal/m³ a 7.000 kcal/m³ em função da porcentagem de metano presente no biogás. Com a retirada de todo o CO_2 é possível atingir até 12.000 kcal/m³. Lima e Passamani (2012), demonstraram em seu estudo uma relação entre a variação da concentração de metano (de 10% a 99%) e o PCI, que varia de 856,06 kcal/Nm³ a 8.475,23 kcal/Nm³. Em uma concentração de 75% de CH_4 , valor mais aproximado à média encontrada no biogás em estudo, obtiveram um

PCI de 6.420,59 kcal/Nm³. Apesar dos valores encontrados na literatura estarem em condições normalizadas (temperatura de 0 °C, pressão de 1 atm e umidade relativa igual a 0%) o valor obtido no presente estudo se aproxima muito dos valores encontrados na literatura. Já Paim (2018), avaliando o biogás produzido de dejetos bovinos leiteiros em biodigestor semelhante obteve um PCI de 25,42 MJ/m³ equivalente a 6.075,53 kcal/m³. Comparando ao PCI do GLP, que é de 11.100 kcal/kg, percebe-se que o biogás analisado neste estudo apresenta um PCI 43,7% menor, sendo assim, necessita-se de uma maior quantidade de biogás para suprir a demanda atendida pelo GLP.

Para calcular o índice de Wobbe utilizou-se a Equação 15 descrita no tópico 2.5, utilizando o PCI calculado por meio da Equação 14 e densidade do biogás de 1,03 kg/m³ (75% de CH₄ e 25% de CO₂ à T = 0 °C e P = 1 atm, conforme Zigotti (2012)) por ser muito próximo da média encontrada neste trabalho. Dessa forma, obteve-se um índice de Wobbe com valor de 25,72 MJ/m³. Gases combustíveis com mesmo índice de Wobbe apresentarão o mesmo desempenho energético, conferindo a mesma taxa de transferência de calor ou potência energética. Comparativamente, observa-se na Tabela 6 as características do gás liquefeito de petróleo (GLP), que é o mais utilizado em residências e também é utilizado como gás *backup* na propriedade onde o biodigestor em estudo foi instalado.

Tabela 6 - Características do gás liquefeito de petróleo (GLP).

Gás	Designação	Composição em volume (%)	Índice de Wobbe (MJ/m ³)	Densidade relativa de massa (ar = 1)
Gás liquefeito de petróleo	G30	C ₄ H ₁₀ (100)	87,54	2,0788
	G31	C ₃ H ₈ (100)	76,84	1,5497
	G32	C ₃ H ₆ (100)	72,86	1,4760

Fonte: adaptado (ABNT, 2003).

No GLP o índice de Wobbe é cerca de 2,8 a 3,4 vezes maior que o índice de Wobbe encontrado no biogás avaliado nesse trabalho. O ponto negativo dessa diferença no índice de Wobbe entre esses dois gases combustíveis é que equipamentos de queima estão ajustados apenas para o valor energético do GLP, sendo assim a utilização do biogás fica dependente de alterações nos equipamentos de queima, como substituição de injetores, regulador de pressão, registros, outros componentes do circuito de gás e regulação de admissão de ar primário, para

se manter inalterado o desempenho do aparelho (ABNT, 2003). No fogão utilizado na propriedade somente a alteração no bico injetor foi necessária, como explicado no item 3.1 e demonstrado na Figura 11 e na Figura 12.

3.5 PARÂMETROS DE DESEMPENHO DO BIODIGESTOR

A carga orgânica aplicada (COA) foi encontrada empregando-se a Equação 1 descrita no tópico 1, e foi obtida a partir da quantidade média de SV presente nas amostras analisadas do dejetto afluente (dejetto diluído 1:1) ao biodigestor. A carga orgânica aplicada foi de 0,94 kg de SV/dia.

A produtividade de biogás foi estimada utilizando a Equação 3 descrita no tópico 1. Para obter o valor diário de vazão, foi estimado 30 minutos de uso de biogás por dia (1800 s) multiplicado pelo valor de vazão ($Q = 0,0011 \text{ m}^3/\text{s}$) obtido no item 2.1, assim o valor diário de vazão ($Q_{\text{diário}}$) é de $1,98 \text{ m}^3/\text{dia}$. Já o volume útil do biodigestor determinado foi de $6,93 \text{ m}^3$ (Equação 2). Sendo assim, a produtividade do biogás obtida foi de $0,29 \text{ m}^3$ de biogás/ m^3 de biodigestor por dia, equivalentes à $0,21 \text{ m}^3$ de CH_4/m^3 de biodigestor, valor muito superior de produtividade dado que a estimativa de produção de CH_4 realizada no tópico 2.2 com a quantidade de dejetos tratados atualmente foi de $0,20 \text{ m}^3$ de CH_4 por dia, logo a produtividade de biogás estimada seria de $0,03 \text{ m}^3$ de CH_4/m^3 de biodigestor por dia.

O rendimento do biogás foi calculado por meio da Equação 4. A partir da razão entre a vazão do biogás estimado para 30 minutos de uso diário ($Q_{\text{diário}} = 1,98 \text{ m}^3/\text{dia}$) e a carga orgânica aplicada ($COA = 0,94 \text{ kg de SV/dia}$), obteve-se rendimento de biogás de $2,10 \text{ m}^3/\text{kg}$ de SV aplicado. A fim de comparação o valor de produtividade foi multiplicado pelo teor médio de CH_4 (72,9%) no biogás, para obter a produtividade de CH_4 por kg de SV. O valor de rendimento obtido foi de $1,53 \text{ m}^3$ de CH_4/kg de SV aplicado. Valor de rendimento muito elevado quando comparado ao fator de conversão (B_0) utilizado para estimativa da produção de CH_4 no tópico 2.2, que foi de $0,21 \text{ m}^3$ de CH_4/kg de SV.

Para realizar o cálculo da taxa de degradação do substrato descrito na Equação 5, além da carga orgânica aplicada no afluente (COA_{in}), foi necessário estimar também a carga orgânica presente no efluente (COA_{out}). Os dados da COA_{in} e COA_{out} foram retirados da caracterização de dejetos no tópico 2.2. Obteve-se dessa forma, uma taxa de degradação do substrato de 76,65%.

O potencial de energia térmica gerada pelo biogás foi estimado pela Equação 6. A partir da vazão do biogás ($Q = 0,0011 \text{ m}^3/\text{s}$), da concentração de CH_4 ($72,9\% = 0,729$) e do PCI ($26,10 \text{ MJ/m}^3$) obteve-se uma potência disponível de 20,93 kW por dia.

Os parâmetros de desempenho utilizados foram adaptados para os dados obtidos no presente trabalho devido ao fato de as metodologias serem baseadas na operação contínua do biodigestor, e não intermitente como é executado na propriedade. Dessa forma, os parâmetros mais adequados para este estudo foram a *COA* e taxa de degradação do substrato.

Ressalta-se que a taxa de degradação do substrato de 76,65% é elevada quando comparada à redução do teor de sólidos voláteis apresentado no tópico 3.2, que foi de 10,27%, devido às características construtivas do biodigestor como citado no tópico 3.2 que não favorecem o fluxo de matéria no seu interior. Assim o digestato sai do biodigestor com menor conteúdo de ST, porém, com baixa redução de matéria orgânica (SV). Assim, para tratar a quantidade de dejetos inserida no biodigestor diariamente (10 litros + 10 litros de água) e obter uma boa redução dos SV são necessárias melhorias construtivas para que o processo de biodigestão seja mais eficiente.

Já para tratar a quantidade mínima de dejetos estimada (90,66 kg) com a mesma alimentação diária seriam necessários no mínimo mais oito biodigestores do mesmo modelo e volume, com a referida eficiência, ou outro biodigestor com maior capacidade (deste ou de outro modelo). Porém, para validar tais estimativas em estudo e para uma determinação precisa, recomenda-se quantificar a produção de dejetos recuperáveis na propriedade e aprofundar os estudos realizados neste trabalho.

4 CONCLUSÃO

Avaliando-se os resultados da caracterização das amostras de dejetos fresco, dejetos diluído e fertilizante orgânico obteve-se uma redução em torno de 10% no teor de SV quando comparado o dejetos fresco com o fertilizante orgânico, comprovando que a fração orgânica da biomassa foi degradada no interior do biodigestor. Apesar de apresentar redução na carga orgânica, quando comparado com literatura, o desempenho do biodigestor nesse quesito demonstrou-se inferior. Esse fato pode ser consequência das características construtivas do mesmo, que não apresenta a parede divisória no tanque de fermentação.

A partir da avaliação da quantidade total de dejetos produzidos na propriedade, estimou-se que apenas 11% dos dejetos são tratados via biodigestão. Dessa forma, concluiu-se

que seriam necessários mais oito biodigestores do mesmo modelo para tratar de forma correta o total de dejetos produzidos, conseqüentemente, há potencial para aumentar a produção de biogás. Sugere-se, para confirmação dessa estimativa, uma quantificação dos dejetos no local de estudo para uma análise mais precisa da real necessidade da utilização de mais biodigestores e posterior proposição para complementação do sistema de biodigestão atual.

Atualmente o biodigestor tem uma produção de CH₄ estimada em 202 L/dia. Caso houvesse a possibilidade de tratar todos os dejetos produzidos pelos animais da propriedade e disponíveis para biodigestão, essa quantidade seria até nove vezes maior, totalizando 1.831,4 L/dia de CH₄, comprovando novamente a necessidade de maior capacidade de biodigestão.

A caracterização química do biogás em diferentes estações climáticas apresentou uma diferença significativa na concentração de CH₄, tendo no inverno uma concentração média de 67,08±5,79% (T=18,5 °C) e na primavera de 76,25±3,79% (T=27 °C), o que indica que em temperaturas maiores ocorre produção de biogás com maior conteúdo energético. A concentração média de CH₄ das duas análises foi de 72,9±8,6%, estando dentro da faixa ideal citada pela literatura, assim, tem-se biogás com maior poder calorífico. Apesar de o PCI do biogás estar dentro da faixa ideal recomendada pela literatura, o mesmo é 43,7% menor que o PCI do GLP, representando um desempenho inferior em sua combustão. Ao avaliar a vazão e a pressão do biogás, ao passar pelas tubulações e filtros, percebeu-se que da saída do biodigestor até o ponto de uso a pressão reduziu em mais de 50%, necessitando de uma adaptação no ponto de uso do biogás para permitir sua utilização.

Apesar de alguns parâmetros o biodigestor não demonstrar alta eficiência, o mesmo produz biogás com uma boa composição química, sendo possível sua utilização quase que de forma intermitente, com poucas alterações de fogões domésticos.

Há também a possibilidade de converter o biogás em bioeletricidade para suprir total ou parcialmente a demanda da propriedade rural em questão, especialmente considerando-se o potencial demonstrado para aumentar a produção atual de biogás. No entanto, uma análise mais ampla deve ser realizada nesse contexto, constituindo objeto de estudo de trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, Cecília Maria Costa do *et al.* Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de retenção hidráulica. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 6, p.1897-1902, dez. 2004.
- ASSIS, Airdem Gonçalvez de *et al.* **Sistemas de produção de leite no brasil**: Circular técnica. 85. ed. Juiz de Fora: Embrapa, 2005. 6 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13723**: Aparelho doméstico de cocção a gás. Parte 1: Desempenho e segurança. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 58 p.
- BATTI, Julia Cesino Bez. **Digestão anaeróbia de esterco de vaca leiteira: um estudo do uso de cinzas de casca de arroz para aumentar a produção de biogás**. TCC (Graduação). Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC. Araranguá, SC, Brasil. 2018.
- BONDAN, Carlos. **Fatores que afetam a composição do leite bovino em rebanho sob controle leiteiro: enfoque epidemiológico e metabólico**. 2015. 106 f. Tese (Doutorado) - Curso de Medicina Veterinária, Programa de Pós-Graduação em Ciências Veterinárias, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- BRASIL. Cibiogás. Centro Internacional de Energias Renováveis. **Sobre o biogás**. 2019. Disponível em: <<https://cibiogas.org/>>. Acesso em: 30 de ago. 2019.
- _____. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Pecuária de baixa emissão de carbono**: Tecnologias de produção mais limpa e aproveitamento econômico dos resíduos da produção de bovinos de corte e leite em sistemas confinados. Secretaria de Mobilidade Social, do Produtor Rural e Cooperativismo. 2018.
- _____. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. **Conceitos para o licenciamento ambiental de usinas de biogás / Probiogás**; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); autores, Felipe Correa de Souza Pereira Gomes [*et al.*]. – Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2016. 147 p.
- BRASIL. PROBIOGÁS. **Guia Prático do Biogás**. 2010. Acesso em: 18 nov. 2019
- CALDEREIRO, Gisele Maria Brod. **Caracterização da digestão de resíduos agroindustriais em biodigestor de fluxo contínuo operado em escala real**. 2015. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, Universidade Tecnológica do Paraná, Medianeira, 2015.
- CAMPOS, Aloísio Torres de. **Análise da viabilidade da reciclagem de dejetos de bovinos com tratamento biológico, em sistema intensivo de produção de leite**. 1997. 141 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1997.
- CANEVER, Victor Bruno. **Estudo de filtragem do biogás para fins energéticos utilizando como método de filtragem lavador de gases de baixo custo**. 2017. 66 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017.
- CASTANHO, Diego Solak; ARRUDA, Heder Jobbins de. **BIODIGESTORES. VI Semana de Tecnologia em Alimentos**, Ponta Grossa, Paraná, maio 2008.

COLBELLA, Anderson. **Viabilidade do uso do biogás da bovinocultura e suinocultura para geração de energia elétrica e irrigação em propriedades rurais**. 2006. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2006.

COMASTRI FILHO, José Anibal. **Biogás independência energética do pantanal mato-grossense**. Corumbá, 1981. 53p. ilustr. (EMBRAPA. UEPAE de Corumbá. Circular Técnica, 9).

DEGANUTTI, Roberto *et al.* **Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada**. In: Encontro De Energia No Meio Rural, 4, 2002, Campinas. Acesso em: 20 abr. 2019.

DIACONIA. **12 passos para construir um biodigestor**. Fundo Socioambiental CAIXA. ed. Recife: 2013.

EMBRAPA (Brasil). **Anuário Leite 2019**. 2019. Disponível em: <embrapa.br/gado-de-leite>. Acesso em: 20 set. 2019.

FERNANDES, Álvaro José. **Variáveis microbiológicas e físico-químicas em biodigestores anaeróbios escala piloto alimentados com dejetos de bovinos leiteiros e suínos**. 2016. 66 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Tecnologia do Leite e Derivados, Universidade Federal Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2016.

FONSECA, André Ribeiro da. **Eficiência energética e a queima de combustíveis limpos**. 2009. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal, 2009.

HENN, Alan *et al.* Planejamento ambiental e adequação à legislação ambiental de uma pequena propriedade suinícola com relação à geração, tratamento e destino dos dejetos suínos em Braço do Norte/SC. In: **XXIX Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental**, San Juan, 2004.

HILSDORF, Jorge Wilson. **Química tecnológica**. 1. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2015. 340 p.

HIRANO, Marcio Yukio; SILVA, Celso Luiz da. Análise da viabilidade do uso de biogás gerado a partir de dejetos bovinos em microturbinas para fins de geração, cogeração e triagem de energia. **X Fórum Ambiental da Alta Paulista**, Bauru, v. 10, n. 1, p.28-41, 2014.

ISRAELSEN, Orson W.; HANSEN, Vaughn E. **Princípios y aplicaciones del riego**. 2.ed. Barcelona: Editorial Reverte, 1965. 400p.

JUNQUEIRA, Sérgio Luís Coelho Diniz. **Geração de energia através de biogás proveniente de esterco bovino: estudo de caso na fazenda aterrado**. 2014. 46 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

KONRAD, Odorico *et al.* Avaliação da produção de biogás e geração de metano a partir do lodo de estação de tratamento de efluentes e glicerina residual. **Revista Destaque Acadêmicos**, Lajeado, v. 4, n. 2, p.49-55, 2010.

KUNZ, Airton *et al.* **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Concórdia: Sbera, 2019. 209 p.

KUNZ, Airton. Pesquisador Embrapa. **Manual de análise alfakit**. Brasil: Alfakit Ltda, 2007. 28 p.

LIMA, Ana Carolina Guedes; PASSAMANI, Fernanda Caliman. **Avaliação do potencial energético do biogás produzido no reator UASB da ETE-UFES**. 2012. 106 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

LINS, L.P; MITO, J.Y.L..; FERNANDES, D.M.. Composição média do biogás de diferentes tipos de biomassa. In: **Simpósio Internacional Sobre Gerenciamento De Resíduos Agropecuários E Agroindustriais**, 5, 2015, Rio de Janeiro. Cibiogás, 2015. p. 1 - 5.

LORA, Electro Eduardo Silva; VENTURINI, Osvaldo José. **Biocombustíveis**. 1ª. ed. São Paulo: **Interciência**, 2012, 2 volumes, 1200 p.

Machado, R. C. *et al.* Produção de biogás utilizando dejetos de bovinos leiteiros com diferentes tempos de armazenamento com exposição ao ar. In: **Simpósio Internacional Sobre Gerenciamento De Resíduos De Animais**, 1, 2009, Florianópolis. Anais. Florianópolis: Siger, 2009. p. 229 - 234.

MATOS, Camila Ferreira. **Produção de biogás e biofertilizante a partir de dejetos de bovinos, sob sistema orgânico e convencional de produção**. 2016. 52 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2016.

MAURER, Max; WINKLER, Jean. P. **Biogas Theoretische Grundlagen, Bau und Betrieb von Anlagen**. Karlsruhe: Verlag C.F. Müller, 1980. 142 p.

MITO, Jéssica Yuki de Lima *et al.* **Metodologia para estimar o potencial de biogás e biometano a partir de plantéis suínos e bovinos no Brasil**. 2018. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/>>. Acesso em: 22 nov. 2019.

NOGUEIRA, L. A. H. **Biodigestão**: a alternativa energética. São Paulo: Nobel, 1986. 93 p.

OLIVEIRA, Rafael Deléo e. **Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbia de dejetos em abatedouro e as possibilidades no mercado de carbono**. 2009. 98 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

PAIM, Juliana Vitória. **Aplicação do biogás produzido a partir de dejetos de gado leiteiro como fonte alternativa de energia em uma queijaria**. 2018. 36 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2018.

PEREIRA, Gustavo Silveira. **Implantação de um biodigestor de baixo custo em uma propriedade com criação de gado leiteiro**. 2018. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2018.

REIS, Alexsandro dos Santos. **Tratamento de resíduos sólidos orgânicos em biodigestor anaeróbio**. 2012. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal do Pernambuco, Caruaru, 2012.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Laboratório de Química Ambiental, Combustão e Energia. 2006. Disponível em:<http://www.usp.br/qambiental/combustao_energia.html>. Acesso em: 7 ago. 2019.

VAN HAANDEL, A.C; LETTINGA, G. **Tratamento anaeróbio de esgotos**: um manual para regiões de clima quente. Editora Eptgraf, 1994. 208 p.

WILDER, B. H. *et al.* 2540 SOLIDS. In: **standard methods for the examination of water and wastewater**. 1997. [s.l: s.n.]. p. 55–61.

XAVIER, Cristiane de Almeida Neves; LUCAS JÚNIOR, Jorge de. Qualidade de biofertilizantes obtidos na digestão anaeróbia de dejetos de vacas em lactação confinadas que receberam diferentes dietas. **II Simpósio Internacional Sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais**, Foz do Iguaçu, mar. 2011.

ZILOTTI, Hércio Alexandre Rodrigues. **Potencial de produção de biogás em uma estação de tratamento de esgoto de cascavel para a geração de energia elétrica**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestre em Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Paraná, 2012.