

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**PEDRO AUGUSTO KRIEGER**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE SUBSTRATOS DA AGROPECUÁRIA NA  
PRODUÇÃO DE BIOGÁS**

**MEDIANEIRA**

**2019**

**PEDRO AUGUSTO KRIEGER**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE SUBSTRATOS DA AGROPECUÁRIA NA  
PRODUÇÃO DE BIOGÁS**

**PERFORMANCE ANALYSIS OF AGRICULTURAL SUBSTRATES IN BIOGAS  
PRODUCTION**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Tecnologias Ambientais, do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais – PPGTAMB – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Orientador: Dr. Laercio Mantovani Frare  
Coorientador: Dr. Fábio Orssatto

**MEDIANEIRA**

**2019**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**PEDRO AUGUSTO KRIEGER**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE SUBSTRATOS DA AGROPECUÁRIA NA  
PRODUÇÃO DE BIOGÁS**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Tecnologias Ambientais, do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais – PPGTAMB – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Data de aprovação: 02/setembro/2019

---

Laercio Mantovani Frare  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Fabio Orssatto  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Rafael Arioli  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Leandro Fleck  
Doutorado  
Universidade Estadual do Mato Grosso do Sul

**MEDIANEIRA**

**2019**

## **Agradecimentos**

Àquele que nos guarda, que nos fortalece e nos guia, ainda que pelo vale das sombras, Deus.

Aos meus pais, Maria Lídia e Ramão Antônio, e à minha irmã, Gabriela, pelo apoio e incentivo. Sacrifícios.

Ao meu orientador, Dr. Laercio M. Frare, o qual tive o privilégio de dividir algumas conquistas ao longo dos anos. Pela paciência e conhecimento que poucos conseguem, de forma simples, contribuir para o desenvolvimento, não apenas científico, mas também pessoal. Ao meu coorientador Fabio Orsatto pelas contribuições.

A UTFPR pela oportunidade de conquistar essa etapa.

Ao meu amigo, Ellano Bragança (Pará), por me acolher em sua residência e me acompanhar nos dias de laboratório e visitas de campo.

A todos que de alguma forma contribuíram, o meu MUITO OBRIGADO.

*“Se enxerguei mais longe, foi  
porque me apoiei sobre os  
ombros de gigantes”*

*Isaac Newton*

## RESUMO

A produção de combustíveis a partir de dejetos de animais pode ser uma opção atrativa para reduzir a emissão de gases do efeito estufa (GEE). O biogás produzido pela decomposição anaeróbia de dejetos de animais é uma fonte de energia renovável que possui grande potencial de expansão na matriz energética em locais onde a principal atividade econômica é agropecuária, como é o caso da região Oeste do Estado do Paraná. O potencial de produção de biogás, em função do volume de dejetos fornece a capacidade de produção bioquímica metanogênica de biogás, por meio da mistura de diferentes substratos e é fundamental para avaliar a viabilidade técnica desta tecnologia de tratamento. O presente trabalho tem como objetivo avaliar o potencial de produção bioquímica metanogênica de diferentes resíduos de uma propriedade agrícola. Os resíduos foram fracionados em 7 grupos, cada um deles feito em quadruplicatas, sendo: Inóculo; Inóculo + Celulose; Inóculo + Soro; Inóculo + Bovino; Inóculo + Suíno; Inóculo + Suíno + Soro de Leite; Inóculo + Suíno+ Bovino, totalizando 28 reatores. Ao término do período de incubação, 58 dias, avaliou-se que o substrato Suíno + Soro de Leite atingiu o maior nível de produção de biogás em comparação aos demais substratos, alcançando um volume de 1693,58 mL<sub>N</sub> g SV<sup>-1</sup>.

**Palavras-chave:** Potencial Bioquímico Metanogênico, Co-digestão, Soro de Leite, Substrato Suíno, Substrato Bovino.

## Abstract

Fuel production from animal waste can be an attractive option to reduce greenhouse gas (GHG) emissions. Biogas produced by anaerobic decomposition of animal waste is a renewable energy source that has great potential for expansion in the energy grid in places where the main economic activity is agriculture, such as the western region of Paraná State. The biogas production potential, as a function of the waste volume, provides the biochemical production capacity of biogas by mixing different substrates and is fundamental to evaluate the technical viability of this treatment technology. The present work aims to evaluate the potential of methanogenic production of different residues of a biogas desulphurization agricultural property through microbiological filtration. The residues were fractionated into 7 groups, each made in quadruplicates: Inoculum; Inoculum + Cellulose; Inoculum + Serum; Inoculum + Cattle; Inoculum + Swine; Inoculum + Swine + Serum; Inoculum + Swine + Cattle, totaling 28 reactors. At the end of the incubation period, 58 days, it can be seen that the Swine + Serum substrate reached the highest level of biogas production compared to the other substrates, reaching a volume of 1693,58 mL<sub>N</sub> gSV<sup>-1</sup>.

**Keywords:** Methanogenic Biochemical Potential, Co-Digestion, Whey, Swine Substrate, Cattle Substrate.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Gráfico 1 - Taxas relativas de crescimento de acordo com as faixas ótimas de temperatura.....	16
Gráfico 2 - Curvas típicas de frequência acumulada da produção de biogás.....	17
Gráfico 3 - Variação da concentração de H <sub>2</sub> S em função do tempo de acordo com a injeção de O <sub>2</sub> .....	19
Figura 1 - Localização da cidade de Entre Rios do Oeste no Estado do Paraná. ....	21
Fotografia 1 - Vsta aérea de parte da propriedade ilustrando a granja de suínos, o biodigestor e a lagoa de biofertilizante.....	22
Figura 2 - Fluxograma ilustrativo do processo de coleta, tratamento de efluentes, produção de biogás e consumo de energia gerada.....	22
Fotografia 2 - Caixa de mistura com a entrada dos efluentes da granja de suínos (A), dos soro de leite (B) e alimentação do biodigestor (C). ....	23
Fotografia 3 - Ilustração da disposição dos três tanques reservatórios de soro de leite. ....	24
Fotografia 4 - Vista em perspectiva do biodigestor e da lagoa de biofertilizante. ....	25
Figura 3 - Ilustração do sistema de purificação de biogás por injeção de ar atmosférico. ....	26
Fotografia 5 - Etapas da montagem dos reatores: (a) determinação da massa de inóculo e (b) injeção de N <sub>2</sub> para eliminação do ar no interior. ....	28
Fotografia 6 - Tampa de borracha e lacre de alumínio sobre os frascos de 250 mL.	29
Fotografia 7 - Ilustração da utilização do alicate recravador para fechar o frasco de penicilina. ....	29
Fotografia 8 - Visualização dos frascos, com identificação, em banho termostático.	31
Fotografia 9 - Coleta da amostra do biogás no biodigestor .....	32
Fotografia 10 - Verificação da pressão interna dos frascos antes da amostragem com o auxílio do manômetro digital .....	33
Fotografia 11 - Ilustração da coleta de amostras do biogás com o auxílio de manômetro digital e seringa de vidro. ....	34
Gráfico 4 - Produção acumulada de biogás do Inóculo. ....	40
Gráfico 5 - Produção acumulada de biogás da celulose microcristalina.....	41
Gráfico 6 - Produção acumulada de biogás de todos os substratos.....	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros e métodos utilizados para as análises do inóculo e dos substratos.....	27
Tabela 2 - Ensaio para determinação do PBM dos resíduos avaliados.....	28
Tabela 3 - Proporções teóricas das substâncias utilizadas para o preparo dos reatores .....	30
Tabela 4 - Composição do biogás padrão utilizado. ....	36
Tabela 5 - Concentração de ST, SF e SV do afluente e efluente do biodigestor. ....	37
Tabela 6 - Concentração de ST, %ST e % SV do inóculo, da celulose e dos substratos (bovino, suíno e soro de leite).....	38
Tabela 7 - Proporção real dos substratos para cada reator.....	39
Tabela 8 - Produção acumulada de biogás. ....	40
Tabela 9 - Tabela de Análise de variação (ANOVA) das produções médias de biogás. ....	42
Tabela 10 - Tabela de resultados das comparações múltiplas dos diferentes substratos.....	43
Tabela 11 - Leitura feita pelo analisador portátil .....	44
Tabela 12 - Resultado das análises de cromatografia .....	45

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1</b>	<b>Produção de resíduos agrícolas no Paraná.....</b>	<b>12</b>
<b>2.2</b>	<b>Biodigestores como alternativas para tratamento de resíduos.....</b>	<b>12</b>
<b>2.3</b>	<b>Biogás.....</b>	<b>13</b>
<b>2.4</b>	<b>Codigestão .....</b>	<b>14</b>
<b>2.5</b>	<b>Potencial Metanogênico Bioquímico .....</b>	<b>15</b>
<b>2.6</b>	<b>Processo de dessulfurização microbiológica.....</b>	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>20</b>
<b>3.1</b>	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>20</b>
<b>3.2</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>20</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>21</b>
<b>4.1</b>	<b>Caracterização da área de estudo.....</b>	<b>21</b>
<b>4.2</b>	<b>Sistema de purificação de biogás.....</b>	<b>25</b>
<b>4.3</b>	<b>Coleta dos resíduos .....</b>	<b>26</b>
<b>4.4</b>	<b>Análises físico-químicas.....</b>	<b>27</b>
<b>4.5</b>	<b>Potencial bioquímico de metano (PBM) .....</b>	<b>27</b>
<b>4.6</b>	<b>Caracterização do biogás produzido na propriedade.....</b>	<b>32</b>
<b>4.7</b>	<b>Produção de biogás nos reatores.....</b>	<b>32</b>
<b>4.7.1</b>	<b>Caracterização Do Biogás Produzido Nos Reatores.....</b>	<b>35</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>37</b>
<b>5.1</b>	<b>Análises Físico-Químicas Do Substrato Coletado Na Propriedade.....</b>	<b>37</b>
<b>5.2</b>	<b>Análises físico-químicas do substrato utilizado para o PBM.....</b>	<b>38</b>
<b>5.3</b>	<b>Análises da produção do biogás dos reatores PBM.....</b>	<b>39</b>
<b>5.4</b>	<b>Análises do biogás realizadas na propriedade.....</b>	<b>43</b>
<b>5.5</b>	<b>Análises cromatográficas do biogás produzido no laboratório .....</b>	<b>44</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>46</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>47</b>
	<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>52</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A produção de combustíveis a partir de dejetos de animais pode ser uma opção atrativa para reduzir a emissão de gases do efeito estufa (GEE). Além disso, a grande demanda energética faz com que os países tendam a buscar formas para suprir as suas necessidades de uma forma mais dinâmica introduzindo, principalmente, fontes renováveis afim de evitar grande dependência de uma única fonte de energética.

O combustível produzido pela decomposição de dejetos de animais é uma das fontes renováveis que possui grande potencial de crescimento na matriz energética de regiões em que a principal atividade econômica provém da agropecuária, como é o caso da região Oeste do Estado do Paraná. A atividade pecuária gera uma grande quantidade de dejetos, sendo esses materiais um problema para os solos, corpos hídricos e qualidade do ar se não forem corretamente tratados.

Normalmente em uma mesma propriedade agrícola podem haver mais de um tipo de resíduo que podem ser utilizados na geração de biogás. Na região de estudo, os resíduos mais comuns são os efluentes da suinocultura, as camas de aviários, os dejetos bovinos e os subprodutos da industrialização de leite. Portanto, muitas vezes pode acontecer a mistura desses resíduos ou por necessidade da propriedade ou por serem complementares na produção de biogás.

A aplicação efetiva do biogás na geração de energia depende, diretamente, da eficiência de processos de purificação do biogás, de forma a reduzir e/ou eliminar compostos indesejáveis, cuja presença e concentração variam de acordo com o resíduo utilizado. Entre as principais impurezas que demandam remoção estão o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), o sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ) e a amônia ( $\text{NH}_3$ ).

O sulfeto de hidrogênio, mesmo em baixas concentrações, reage com a maioria dos metais, principalmente na presença de umidade e temperatura ambiente, o que torna imprescindível uma etapa de dessulfurização para evitar danos aos equipamentos e à saúde das pessoas próximas ao sistema de tratamento. Esta etapa de dessulfurização deve ser eficiente e economicamente viável não onerando o processo produtivo.

Portanto, neste trabalho, busca-se estudar a produção de biogás a partir da mistura de diversos resíduos produzidos em uma propriedade localizada no Oeste do Paraná e avaliar o processo de dessulfurização por meio da microaeração.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Produção de resíduos agrícolas no Paraná**

De acordo com o IBGE, no 1º trimestre de 2019 foram abatidos 11,31 milhões de suínos, e 7,89 milhões de bovinos em todo território nacional. De acordo com o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2019) para essas criações foi estimada uma geração de 1,7 bilhões de toneladas/ano de dejetos, sendo a maior parte gerada pelos bovinos de corte.

O Brasil embarcou 58,1 mil toneladas de suínos em maio de 2019, aumento de 35% comparativamente a 2018. O Paraná exportou 11,1 mil toneladas de suínos para o mundo em abril, com valor de US\$ 23 milhões. O Estado é o segundo maior produtor e o terceiro maior exportador de suínos do Brasil, segundo o Departamento de Economia Rural (Deral), da Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento.

Em 2018, registrou-se uma das maiores produções de carne bovina no Paraná. De acordo com o IBGE, o Estado produziu quase 350 mil toneladas da proteína vermelha, com um aumento de 12% em relação ao ano anterior, em volume e no número de abates.

A pecuária leiteira do Paraná é a que mais cresceu ao longo das últimas duas décadas. Atualmente, a atividade está presente nos 399 municípios do Paraná e gera cerca de R\$ 5,7 bilhões por ano no Valor Bruto de Produção (VBP). A média produzida por vaca pulou de 1,4 mil para 3 mil litros de leite por ano: aumento de 111%, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE), com base no rebanho geral.

### **2.2 Biodigestores como alternativas para tratamento de resíduos**

As principais técnicas empregadas para o tratamento de efluentes, consistem no tratamento primário, barreiras físicas que separam as partes sólidas de difícil degradação, o tratamento secundário, onde a degradação da matéria orgânica ocorre a partir do tratamento biológico em condições aeróbicas, anaeróbicas ou anóxicas (KUMMER, 2011).

Conforme Chernicharo (1997), uma alternativa que se mostrou ser eficiente para o tratamento de resíduos orgânicos é a biodigestão anaeróbia. A biodigestão anaeróbia, ainda segundo o autor citado, pode ser considerada como um conjunto de diversos microrganismos que atuam de forma integrada na conversão da matéria orgânica complexa em metano, gás carbônico, água, gás sulfúrico e amônia, além de novas células bacterianas.

Um biodigestor é composto por uma entrada, onde o efluente é concentrado, e por uma saída, onde o efluente é removido contendo concentrações menores de matéria orgânica. Entre os resultados da decomposição, destaca-se o biogás que pode ser utilizado como fonte energética. Além disso, um outro produto gerado é o digestato, que em estado sólido e pastoso passa a assumir condições de biofertilizante a partir de seu tratamento e beneficiamento (SILVA, 2015).

Existem diferentes modelos de biodigestores, cada variação foi adaptada de acordo com a realidade e necessidade de biogás, como por exemplo, o modelo indiano. É um tipo que tem como característica uma campânula, um contrapeso, a qual pode estar mergulhada sobre a biomassa em fermentação e uma parede central que divide o tanque de fermentação em duas câmaras. O abastecimento precisa ser constante, geralmente é alimentado por dejetos bovinos e/ou suínos, que apresentam uma certa frequência no fornecimento de dejetos. (LUCAS JÚNIOR, 1987)

Já o modelo chinês tem um formato cilíndrico, em alvenaria, com teto arredondado, impermeável, destinado ao armazenamento do biogás. Este biodigestor funciona com base no princípio de prensa hidráulica, de forma que o aumento de pressão em seu interior, resultantes do acúmulo de biogás, desloca o efluente da câmara de fermentação para a caixa de saída. Assim como o modelo indiano, o substrato deverá ser fornecido continuamente. Em termos comparativos, os modelos Chinês e Indiano, apresentam desempenho parecidos. (LUCAS JÚNIOR, 1987)

## **2.3 Biogás**

A digestão anaeróbia da biomassa acontece mediante uma série de reações geradas por microrganismos, que degradam a matéria orgânica, resultando na produção de biogás. Desta forma, a digestão anaeróbia, como método de tratamento

de resíduos, permite diminuir a quantidade de matéria orgânica e ao mesmo tempo produzindo energia (MORENO, 2011).

A biodigestão anaeróbia é um processo bioquímico que envolve a estabilização e degradação da matéria orgânica através da ação de microrganismos (RAPOSO et al., 2011). Esta ocorre na ausência de oxigênio molecular e utiliza como receptores de elétrons o carbono ( $\text{CO}_2$ ), enxofre ( $\text{SO}_2$ ), nitrogênio ( $\text{NO}_3$ ), íon férrico e o tetracloreto de carbono ( $\text{CCl}_4$ ), e tem como produtos principais o metano e gás carbônico (CAVALCANTI, 2012). A digestão anaeróbia é dividida em 5 etapas: Hidrólise, Acidogênese, Acetogênese, Metanogênese e Sulfetogênese (CHERNICHARO, 1997).

O biogás, rico em metano, pode ser facilmente transformado em energia térmica, mecânica ou elétrica (SANTI, 2013). Com a implementação de um sistema gerador de biogás em uma comunidade ou propriedade rural, esta pode adquirir certa independência energética. Se apresentar elevada capacidade de produção, pode inclusive vender o excedente de energia para a concessionária estadual, gerando assim benefícios econômicos.

## 2.4 Codigestão

A codigestão é o consórcio de um resíduo orgânico a outros resíduos que podem ser ricos em carboidratos ou microrganismos, como caldo de cana, vinhaça, esterco bovino, aves, entre outros, este termo é usado para descrever o tratamento combinado de resíduos com várias características complementares, sendo uma das principais vantagens da tecnologia anaeróbia (FERNÁNDEZ, 2014, apud NOGUEIRA, 2013).

Wu (2000) descreve que a codigestão é a digestão simultânea de uma mistura homogênea de dois ou mais substratos que melhora os rendimentos de biogás, devido a aspectos positivos estabelecidos no processo através do fornecimento de nutrientes em falta pelos cosubstratos e ainda traz vantagens econômicas e ambientais para o tratamento de resíduos.

Diversas pesquisas têm sido realizadas com intuito de avaliar o potencial de produção de biogás por meio da codigestão com outras biomassas. Bertin et al. (2013), obtiveram resultados que demonstram que a adição de 50% de soro de queijo

em relação ao volume do biodigestor proporciona rendimento mais elevado do que quando os dois resíduos são tratados separadamente.

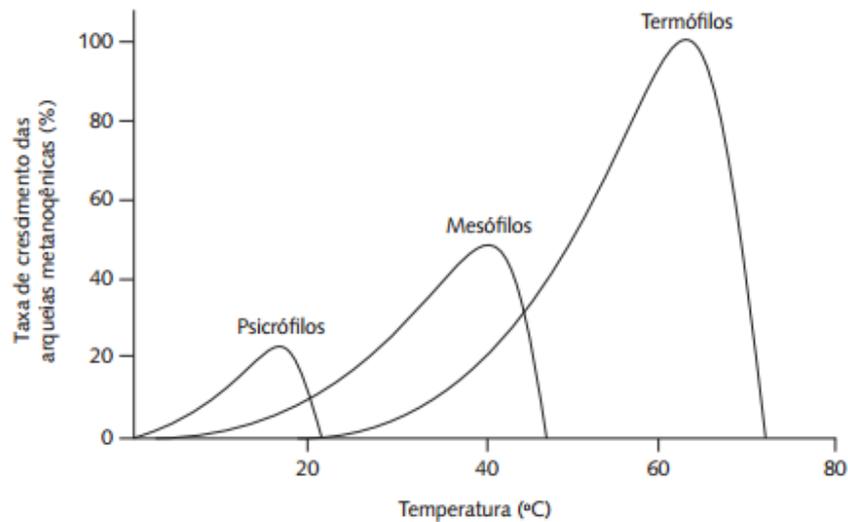
## **2.5 Potencial Metanogênico Bioquímico**

Como estimativa de produção de biogás e metano de uma determinada biomassa é utilizado um método científico conhecido como Potencial Metanogênico Bioquímico, segundo a VDI 2006, trata-se de um ensaio fermentativo, que ao final do experimento apresenta a quantidade total de biogás e metano que uma determinada amostra produziu sob certas condições de temperatura e pressão. Em condições ótimas de padronização, é possível obter a produção de biogás por kg de substrato. Para que isso ocorra é necessário que componentes orgânicos, como proteínas, carboidratos e gorduras, sejam degradados biologicamente sob condições anaeróbias.

A composição do biogás está diretamente ligada à matéria orgânica e suas características químicas bem como os parâmetros do processo de fermentação (VDI, 2006). A produção de biogás e metano pode ser obtida por meio de um ensaio realizado em laboratório em Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP), conforme a metodologia estabelecida pela norma alemã VDI 4630. O material deve ser incubado em condições mesofílicas  $37,5 \pm 0,5$  °C.

De acordo com Fuess e Garcia (2012), as temperatura que apresentam melhores condições, de 35 a 40 °C, para o crescimento dos microrganismos mesofílicos, sobretudo das arqueias metanogênicas. No gráfico 1 pode-se observar as taxas de crescimento das bactérias metanogênicas em função da temperatura.

**Gráfico 1 - Taxas relativas de crescimento de acordo com as faixas ótimas de temperatura.**

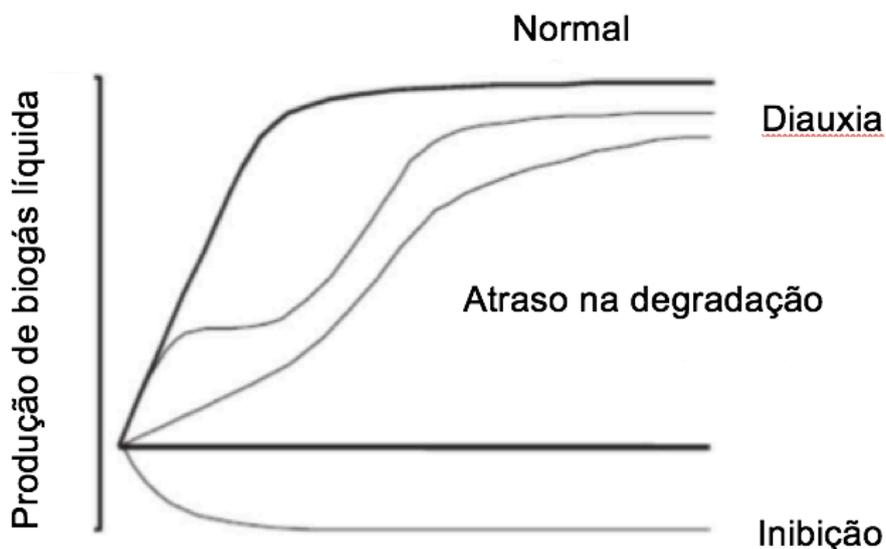


**Fonte: Fuess e Garcia (2012)**

Diversos fatores são observados e modificados para que o sistema de digestão ocorra nas melhores condições. No entanto, dependendo das características da biomassa e dos microrganismos, é possível encontrar diferentes tipos de biogás. No gráfico 2 são apresentadas as curvas típicas da produção de biogás em frequência acumulada. De acordo com Lyson (2011), há quatro tipos de curvas que podem ocorrer durante o processo de fermentação, são elas:

- Normal: As substâncias são transformadas rapidamente em biogás e a curva de produção é caracterizada por um aumento íngreme na quantidade acumulada de biogás;
- Diauxia: A degradação pode ocorrer em duas etapas, isto pode ser devido a uma decomposição de duas fases;
- Atraso na degradação: Ocorre com substâncias difíceis de degradar (como as que contêm lignina ou lipídeos), exibem uma curva retardada de formação de gás. Esta forma de curva também pode ser devido a uma leve inibição;
- Inibição: A inibição forte ou completa resulta em uma produção de biogás negativa, ou seja, a produção de gás é menor do que a produção de gás do inóculo (que é utilizado no cálculo final da produção de biogás).

Gráfico 2 - Curvas típicas de frequência acumulada da produção de biogás.



Fonte: Adaptado de Lyson (2011)

Dessa maneira, torna-se possível determinar a quantidade de biogás e metano que uma amostra de biomassa pode produzir e, com isso, estabelecer cenários com uso do biogás e a definição de recursos financeiros para implantação de plantas de produção.

## 2.6 Processo de dessulfurização microbiológica

O sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ) é um gás incolor que pode causar danos à saúde humana. Contato com pequenas concentrações, superiores a 50 ppm, já oferece risco considerável e exposições entre 700 a 1500 ppm podem levar a morte em alguns minutos devido a seu alto potencial tóxico (VIOLA, 2005). O  $H_2S$  pode ser oxidado por microrganismos das espécies *Thiobacillus* e *Sulfolobus*. A degradação requer oxigênio e, portanto, uma pequena quantidade de ar deve ser adicionada para que a dessulfurização biológica aconteça (PETERSSON; WELLINGER, 2009).

A degradação biológica acontece na parte interna do biodigestor e sua aceleração é por meio de microrganismos, encontrados naturalmente no digestato, como uma espécie de filtro biológico (PETERSSON; WELLINGER, 2009). Nesse tipo de tratamento biológico, realizado por injeção de ar no biodigestor, microrganismos especializados oxidam  $H_2S$  em enxofre elementar, que precipita no líquido do

biodigestor. A maioria destes microrganismos responsáveis pela oxidação são autotróficos e utilizam o  $\text{CO}_2$  a partir do biogás para suprir sua necessidade de carbono e se desenvolvem sobre a superfície do digestato ou na estrutura do biodigestor e não requerem inoculação (RYCKEBOSCH et al., 2011).

Um dos produtos dessa reação é a formação do enxofre elementar assim como a formação de sulfato, que tem como característica a corrosão de materiais metálicos (RYCKEBOSCH et al., 2011). A formação de sulfeto e sulfato pode ser controlada com a adição de  $\text{O}_2$ . Segundo Janssen et al. (1995), é necessário 0,5 mol  $\text{O}_2$  por mol de enxofre para a oxidação do sulfeto para o enxofre elementar. Para que a reação ocorra, é necessário a adição de uma pequena quantidade de oxigênio (de 2 a 6 %) no sistema de produção de biogás usando um fornecimento de ar. Como produto dessa mistura, o  $\text{H}_2\text{S}$  é oxidado em enxofre e em razão disso sua concentração é diminuída (KAPDI et al., 2005). A temperatura ideal para que seja promovida a conversão biológica do  $\text{H}_2\text{S}$  em enxofre é de aproximadamente  $35^\circ\text{C}$  (RYCKEBOSCH et al., 2011).

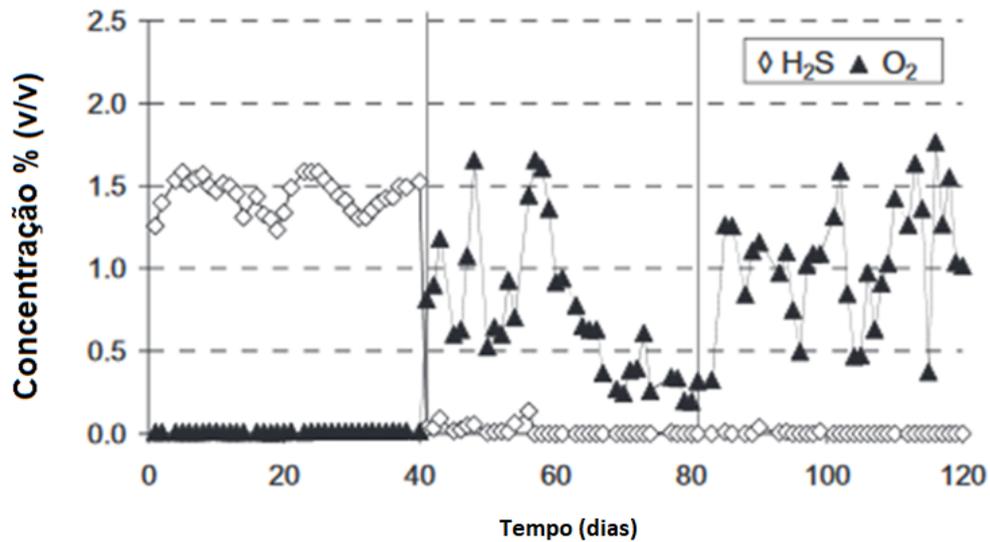
Munz et al., (2009) destacam que, em determinados casos, a concentração de 0,5 mol  $\text{O}_2$  é o suficiente para que ocorra a oxidação do sulfeto. Alguns autores mostram de 85 a 90% do sulfeto sendo convertido em enxofre elementar. Apesar deste ser um processo simples e de baixo custo, não exigindo uso de substâncias químicas ou equipamentos de alto valor, cuidados devem ser tomados. É preciso cautela, afim de evitar uma adição de ar acima do recomendado, sabendo que o biogás é altamente explosivo quando em contato com ar, concentrações na faixa de 6 a 12%  $\text{O}_2$  dependendo do teor de metano (KAPDI et al., 2005). Além disso, é preciso atenção para a manutenção das condições anaeróbias, afim de se preservar a biodigestão sem que o processo seja inibido (RYCKEBOSCH et al., 2011).

No tratamento biológico realizado após o sistema de biodigestão, um filtro biológico serve de meio para o crescimento de microrganismos que se aderem a um material suporte no interior da coluna. O biogás e o ar atmosférico são adicionados em contracorrente com um fluxo de água contendo nutrientes.

Os termos “microaeração” e “microoxigenação” se diferem em suas aplicações. O primeiro quando ocorre na aplicação de ar em um ambiente anaeróbico o segundo quando adiciona-se oxigênio puro (DIAZ, 2012). A microoxigenação demonstrou uma eficiência de 98 % na dessulfurização do biogás (DIAZ et al., 2011). No gráfico 3 pode-

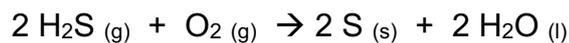
se observar uma queda significativa na concentração de H<sub>2</sub>S quando em contato com o oxigênio em função do tempo.

**Gráfico 3 - Variação da concentração de H<sub>2</sub>S em função do tempo de acordo com a injeção de O<sub>2</sub>.**



Fonte: Adaptado de Diaz et al., (2011)

Neste processo, um compressor pode ser utilizado para introduzir uma pequena quantidade de oxigênio (2 a 6%) e, em consequência, o H<sub>2</sub>S presente no biogás é oxidado a enxofre reduzindo a concentração do H<sub>2</sub>S, conforme descrita na seguinte reação estequiométrica:



É possível alcançar uma de remoção de 80 a 99%. (RYCKEBOSCH et al., 2011). Porém, essa eficiência de remoção está diretamente ligada com as condições ideais de operação do biodigestor (RÖSSERT, 2002).

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo geral**

Avaliar o potencial de produção metanogênica de diferentes resíduos de uma propriedade agrícola e avaliar a eficiência de um sistema de dessulfurização de biogás por meio da microaeração.

#### **3.2 Objetivos específicos**

- Avaliar a produção metanogênica para resíduos de suinocultura, bovinocultura de leite e soro de leite, em escala de bancada;
- Avaliar a complementação do soro de leite no efluente em relação a outros substratos, em escala de bancada;
- Verificar os efeitos do sistema de injeção de ar, por meio da microaeração, na dessulfurização microbiológica de biogás;

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Caracterização da área de estudo

A fonte de resíduos utilizados nos estudos deste trabalho, está localizado na Região Oeste do Estado do Paraná, na cidade de Entre Rios do Oeste. No lado esquerdo da Figura 1, destacado em vermelho, pode-se observar a localização do município.

**Figura 1 - Localização da cidade de Entre Rios do Oeste no Estado do Paraná.**



Fonte: Google Maps (2019)

Na Fotografia 1 pode-se visualizar parte da propriedade onde foram coletados os resíduos para a realização dos estudos. A propriedade contém uma granja de suínos na fase de terminação com, aproximadamente, 3.000 animais.

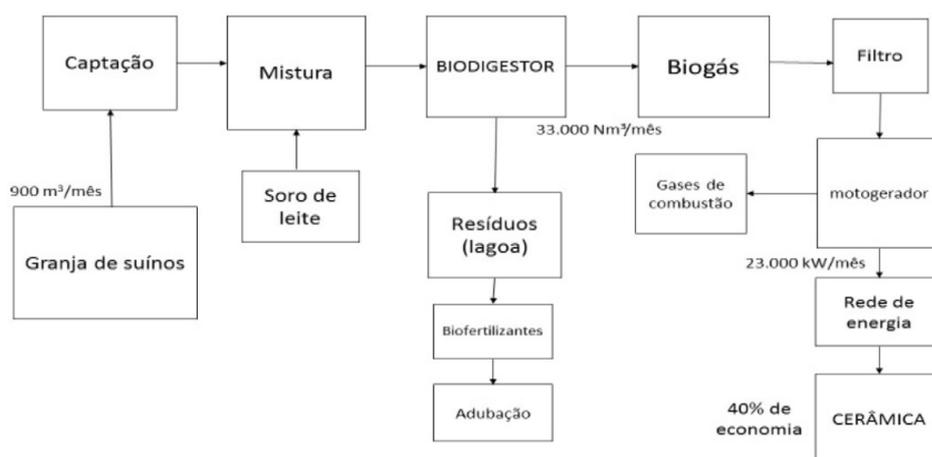
**Fotografia 1 - Vista aérea de parte da propriedade ilustrando a granja de suínos, o biodigestor e a lagoa de biofertilizante.**



**Fonte: Autoria própria (2018)**

O sistema de tratamento dos efluentes da suinocultura é por meio da digestão anaeróbia (realizada no biodigestor) que tem como principais produtos o biogás e o biofertilizante (armazenado na lagoa de biofertilizante). O biogás produzido é utilizado em um motogerador que produz a energia elétrica consumida pela propriedade nos horários de ponta (das 18 as 21h). Na Figura 2 pode-se observar o fluxograma que ilustra o processo de produção de biogás.

**Figura 2 - Fluxograma ilustrativo do processo de coleta, tratamento de efluentes, produção de biogás e consumo de energia gerada.**



**Fonte: Autoria própria (2018)**

O processo de captação e tratamento dos resíduos ocorre da seguinte forma: a operacionalização das atividades do sistema de tratamento começa quando o esterco animal produzido é raspado pelos funcionários para as canaletas da granja de suínos. Os dejetos suínos são coletados na granja e enviados para um tanque de homogeneização onde são misturados com soro de leite proveniente de um laticínio.

Esse sistema de abastecimento de soro é utilizado para suprir a alimentação do biodigestor nos períodos de troca entre os lotes.

A injeção de soro é responsável pela manutenção da carga orgânica no interior do sistema de biodigestão. Esse sistema é composto por 3 tanques de água, cada um com capacidade de 15.000 L, interligados na caixa de mistura a montante do biodigestor. O soro residual de laticínio, utilizado durante parte do experimento, foi disponibilizado por uma indústria láctea, localizada na região Oeste do Paraná. O efluente é originário das atividades de recepção de leite, resfriamento e produção de produtos como: leite UHT – longa vida, leite pasteurizado, achocolatados, manteiga, requeijão, creme de leite, leite condensado e outros derivados.

Nas Fotografias 2 e 3 pode-se visualizar a caixa de mistura e os tanques de armazenamento de soro, respectivamente.

**Fotografia 2 - Caixa de mistura com a entrada dos efluentes da granja de suínos (A), dos soro de leite (B) e alimentação do biodigestor (C).**



Fonte: Autoria própria (2018)

**Fotografia 3 - Ilustração da disposição dos três tanques reservatórios de soro de leite.**



**Fonte: Aatoria própria (2018)**

O efluente proveniente da caixa de mistura segue para o biodigestor (volume de 1.800 m<sup>3</sup> e um tempo de residência hidráulica de 30 dias). Após um período no biodigestor esta biomassa, que passou pelo processo de anaerobiose, e que pode ser denominado de digestato, é direcionado para uma lagoa e, após alguns dias, para aplicação no solo, como biofertilizante.

O biodigestor possui um agitador o qual é ligado em intervalos de tempo, que auxilia na mistura da matéria orgânica no seu interior. O sistema de agitação consiste de um motor, instalado na parte externa ao biodigestor, ligado a um eixo e uma hélice.

O biogás produzido é coletado por meio de tubulações e direcionado até o motogerador que fornece a energia elétrica para parte da propriedade. O biofertilizante é recalado para lotes próximos da propriedade para fertirrigação. Na fotografia 4 pode-se visualizar, em detalhe, o biodigestor (reator coberto por uma lona para retenção do biogás) e a lagoa contendo o biofertilizante.

**Fotografia 4 - Vista em perspectiva do biodigestor e da lagoa de biofertilizante.**



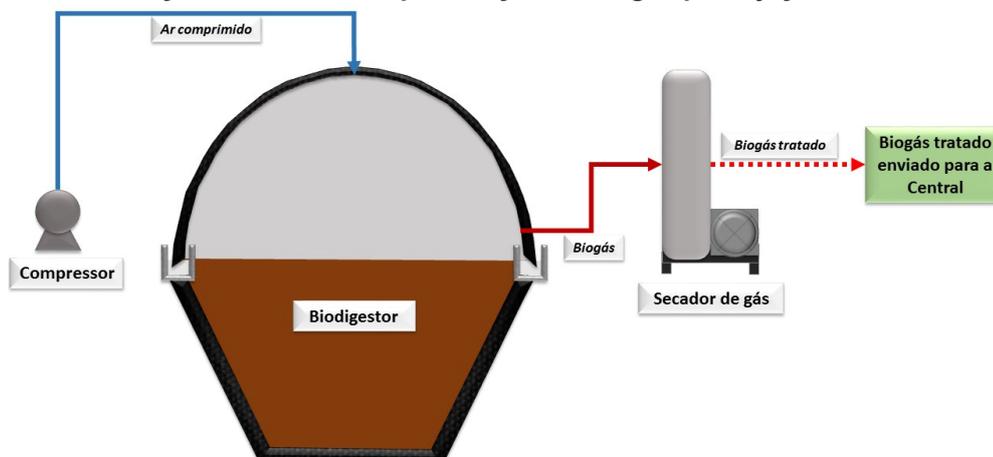
**Fonte: Autoria própria (2018)**

O biogás, produzido nesta propriedade possui, um sistema de purificação por injeção de ar atmosférico no espaço destinado ao armazenamento do gás sobre o biodigestor.

#### **4.2 Sistema de purificação de biogás**

A disposição do sistema de tratamento de biogás, utilizado na, pode ser visualizado na figura 3. Neste sistema, ar comprimido é injetado na parte superior do biodigestor com o auxílio de um compressor radial. O oxigênio contido no ar reage com duas moléculas de  $H_2S$ , através de atividades biológicas, produzindo duas moléculas de enxofre elementar e duas moléculas de água. O biogás com teor reduzido de  $H_2S$  é encaminhado a um secador de gás para remoção de umidade. Por fim, é conduzido até uma centra geração elétrica, que conta com um motor adaptado para consumo de biogás.

**Figura 3 - Ilustração do sistema de purificação de biogás por injeção de ar atmosférico.**



**Fonte: Autoria própria (2018)**

O compressor tem a função de enviar o ar até o biodigestor sendo responsável por manter um fluxo contínuo de alimentação do sistema garantido as condições necessárias para que o processo de dessulfurização biológica ocorra de forma eficiente.

### 4.3 Coleta dos resíduos

As coletas dos resíduos da suinocultura foram realizadas em dois pontos: na caixa de homogeneização e na caixa de saída existente na propriedade. Em cada amostragem foram coletados, aproximadamente, 5 L das amostras. Para o procedimento da coleta foi utilizado um frasco de plástico (5L). Antes da amostragem, o frasco foi ambientado com amostra, sendo realizada uma 'lavagem' por três vezes, só então a amostra foi coletada.

O soro de leite foi coletado diretamente dos tanques de armazenamento. Os resíduos de bovinocultura de leite (esterco de vacas leiteiras) foram coletados em uma propriedade vizinha diretamente em uma lagoa de armazenamento. Para esta coleta utilizou-se o mesmo procedimento, com frascos de 5 L, como descrito anteriormente para os efluentes de suínos.

#### 4.4 Análises físico-químicas

Com o objetivo de caracterizar as amostras dos efluentes foram realizados ensaios de sólidos totais (ST), sólidos fixos (SF), sólidos voláteis (SV) com a finalidade de conhecer o valor máximo de biogás e metano que as amostras poderiam atingir, sob condições ótimas. Na Tabela 1 são apresentadas as metodologias utilizadas em cada uma das determinações.

**Tabela 1 - Parâmetros e métodos utilizados para as análises do inóculo e dos substratos**

PARÂMETROS	METODOLOGIA
Sólidos Totais	2540B (APHA, 2012)
Sólidos Fixos	2540B (APHA, 2012)
Sólidos Voláteis	2540B (APHA, 2012)
Nitrogênio (NTK)	4500-Norg (APHA, 2012)
Alcalinidade Total	2320B (APHA, 2012)

Fonte: Autoria própria (2018)

#### 4.5 Potencial bioquímico de metano (PBM)

A determinação do PBM ocorreu de acordo com o *guideline* VDI 4630 o qual define alguns critérios e parâmetros para a biodigestão anaeróbica em sistemas de batelada. O sistema foi composto por reatores de vidro com volumes de 250 mL sendo 150 mL de efluente e um *headspace* de 100 mL. Os reatores foram divididos e identificados em 7 ensaios. Cada ensaio possuía 4 replicatas que foram montados seguindo um procedimento padronizado, totalizando 28 reatores.

O inóculo utilizado para os ensaios de biodigestão foi cedido pelo Laboratório do Centro Internacional de Energia Renováveis-Biogás (CIBiogás). A composição deste inóculo é elaborada a partir da proporção de 1:0,5:0,5 em base úmida de efluentes de biodigestores provenientes de dejetos suínos, de dejetos bovinos e um tipo de resíduo orgânico bruto (dejeito bovino bruto). Segundo o descrito por Edwiges (2017) o inóculo era mantido em reator de aço inoxidável com volume operacional de 100L, agitação contínua de 60 rpm e temperatura controlada em 37 °C.

Em conjunto com o inóculo, foi incubada a celulose microcristalina (Synth P.A) como padrão positivo para verificar a eficiência do inóculo. Também houve a incubação de somente o inóculo para posterior correção do volume específico das amostras. Os ensaios foram organizados de acordo com a Tabela 2.

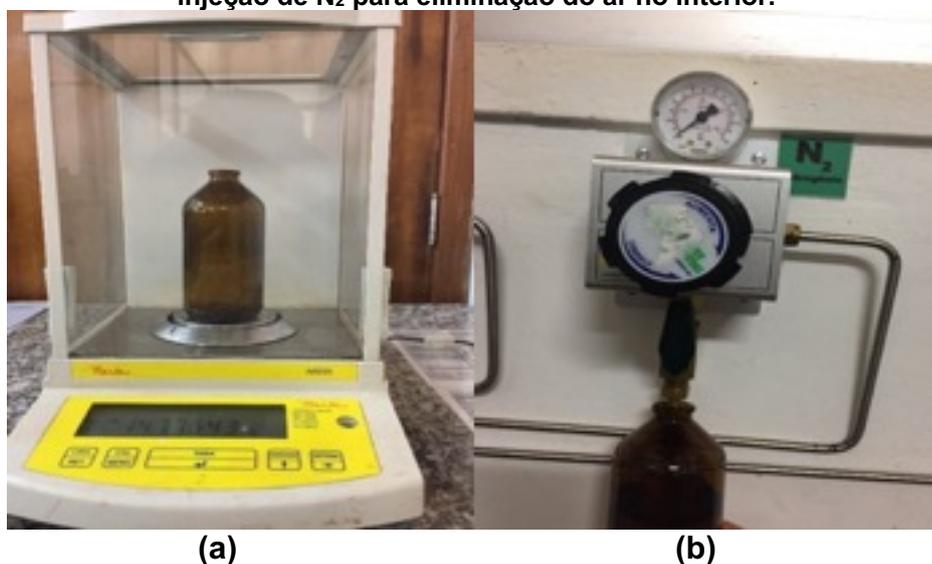
**Tabela 2: Ensaios para determinação do PBM dos resíduos avaliados**

<b>Ensaios</b>	<b>Resíduos</b>
Ensaio 1	Inóculo
Ensaio 2	Inóculo + celulose microcristalina
Ensaio 3	Inóculo + Soro de Leite
Ensaio 4	Inóculo + Resíduos de bovinocultura de leite
Ensaio 5	Inóculo + Resíduos de suínos
Ensaio 6	Inóculo + Resíduos de suínos + Soro de Leite
Ensaio 7	Inóculo + Resíduos de Suínos + Resíduos de bovinocultura de leite

**Fonte: Aatoria própria (2018)**

Para exemplificar a metodologia de montagem dos reatores, pode-se descrever o processo para o Ensaio 1. No Ensaio 1 foi utilizado apenas o inóculo puro que, com o auxílio de um béquer, foi transferido para o frasco até alcançar uma massa, aproximada, de 150 g, pesada em uma balança analítica. Após a repetição do procedimento para os 4 frascos do ensaio, os reatores, já preenchidos, foram expostos a uma injeção de nitrogênio, por um período de 40 segundos, que teve como função expulsar o oxigênio presente no interior do reator, como pode-se observar na fotografia 5.

**Fotografia 5 - Etapas da montagem dos reatores: (a) determinação da massa de inóculo e (b) injeção de N<sub>2</sub> para eliminação do ar no interior.**



**Fonte: Aatoria própria (2018)**

Os reatores preenchidos com  $N_2$  foram imediatamente lacrados afim de evitar a contaminação com ar atmosférico novamente. A vedação foi realizada utilizando-se uma tampa de borracha envolvida por uma tampa de alumínio (fotografia 6) e lacrados com o auxílio de um alicate recravador (fotografia 7).

**Fotografia 6 - Tampa de borracha e lacre de alumínio sobre os frascos de 250 mL**



Fonte: Aatoria própria (2018)

**Fotografia 7 - Ilustração da utilização do alicate recravador para fechar o frasco de penicilina.**



Fonte: Aatoria própria (2018)

De acordo com a VDI 4630, a relação entre SV da amostra e SV do inóculo, chamado de Fr, deve ser menor do que 0,5. Outra recomendação é a de que a %SV do Inóculo seja superior a 50%. Para o ajuste dos valores utilizou-se a Equação 1.

$$Fr = \frac{\left( m1 * \left( \frac{STm1}{100} \right) * \left( \frac{SVm1}{100} \right) + m2 * \left( \frac{STm2}{100} \right) * \left( \frac{SVm2}{100} \right) \right)}{mI * \left( \frac{STmI}{100} \right) * \left( \frac{SVmI}{100} \right)} \quad (1)$$

O Fr é a multiplicação de m1, massa de um dos substratos, e as frações das concentrações de sólidos totais e sólidos voláteis,  $STm1*SVm1$ , somados a massa do segundo substrato, m2, também multiplicado pelas suas frações de  $STm2$  e  $SVm2$ . Ambos os termos divididos pela massa do inóculo,  $mI$ , multiplicado pelas frações de  $STmI$  e  $SVmI$ , resultando assim, na relação entre a os SV da amostra e os SV do inóculo. Em seguida, os reatores contendo celulose (Ensaio 2), soro de leite (Ensaio 3), efluente bovino (Ensaio 4), dejetos suínos (Ensaio 5), mistura de dejetos de suíno e de soro de leite (Ensaio 6) e mistura de dejetos de suíno e bovino (Ensaio 7) foram montados seguindo o mesmo procedimento para os reatores contendo inóculo puro, respeitando as devidas proporções de massas dentro dos frascos em função da porcentagem de sólidos voláteis da amostra. As proporções teóricas utilizadas nas misturas estão apresentadas na Tabela 3.

**Tabela 3 - Proporções teóricas das substâncias utilizadas para o preparo dos reatores**

		%ST	%SV	massa (g)	Fr
Inóculo		3,74	56,99	150,0	0
Inóculo+ Celulose	Inóculo	3,74	56,99	150,0	0,51
	Celulose	96,54	99,87	1,70	
Inóculo+ Soro	Inóculo	3,74	56,99	92,0	0,50
	Soro	4,00	42,56	58,0	
Inóculo+ Bovino	Inóculo	3,74	56,99	135,0	0,48
	Bovino	11,63	80,29	15,0	
Inóculo+ Suíno	Inóculo	3,74	56,99	125,0	0,50
	Suíno	7,48	72,19	25,0	
Inóculo+ Suíno+ Soro	Inóculo	3,74	56,99	120,0	0,50
	Suíno	4,00	42,560	10,0	
	Soro	7,48	72,19	21,0	
Inóculo+ Suíno+ Bovino	Inóculo	3,74	56,99	130,0	0,49
	Suíno	4,00	42,560	6,0	
	Bovino	11,63	80,29	15,0	

**Fonte: Autoria própria (2018)**

Após serem identificados com rótulos e dispostos em fileiras únicas, os reatores foram submersos, em banho maria, a uma temperatura de 37 °C (fotografia 8).

**Fotografia 8 - Visualização dos frascos, com identificação, em banho termostático.**



**Fonte: Autoria própria (2018)**

#### 4.6 Caracterização do biogás produzido na propriedade

A caracterização do biogás produzido na propriedade foi determinada com o auxílio de um analisador portátil de biogás (marca Wuhan Cubic Optoelectronic Co, modelo Gasboard 3200L). Este analisador possibilita a análise de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$ . Na fotografia 9 pode-se observar um procedimento de análise do biogás coletado diretamente do biodigestor para verificação da concentração dos gases constituintes.

**Fotografia 9 - Coleta da amostra do biogás no biodigestor**



Fonte: Autoria própria (2018)

#### 4.7 Produção de biogás nos reatores

A produção de biogás foi medida diariamente nos primeiros 11 dias. Após esse período não seguiu uma leitura padrão em função do tempo, mas sim em razão da pressão interna medida por um manômetro afim de evitar inibição das atividades microbiológicas.

A coleta das amostras do biogás produzido no laboratório seguiu um padrão para todos os reatores. Utilizando-se um manômetro digital (Peakmeter, modelo HT-1890) mediu-se a pressão interna dos frascos (fotografia 10). Com o auxílio de uma seringa de vidro intercambiável da marca ArtiGlass de 100 mL, coletou-se o biogás até que a pressão indicada no manômetro indicasse zero (fotografia 11). O volume coletado pela seringa era registrado em uma planilha de controle, juntamente com a pressão atmosférica do dia e a temperatura ambiente, para a correção do volume de biogás nas condições padrão.

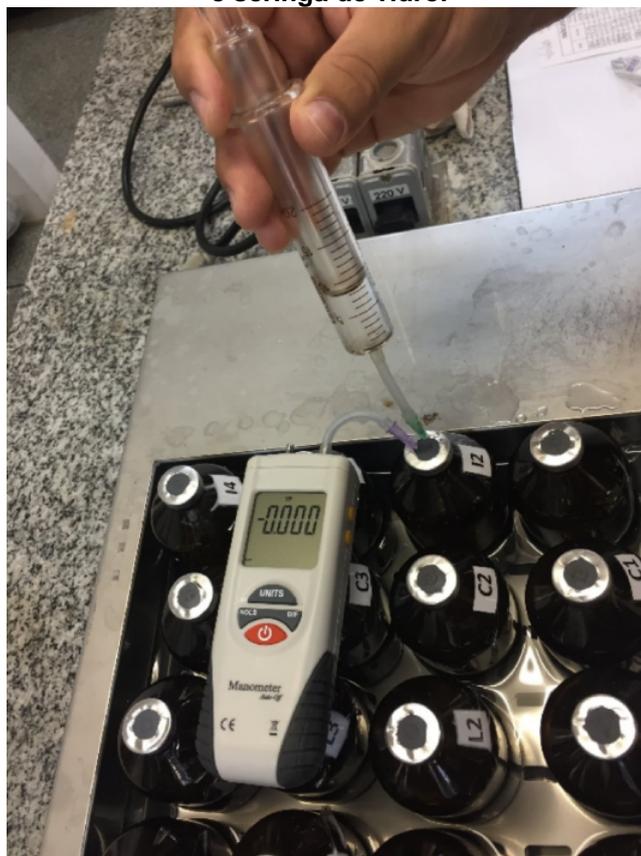
Inicialmente, o gás gerado nos reatores foi medido pela seringa de 100 mL e na etapa final do experimento, em função da redução da produção, o volume foi medido por uma seringa de vidro de 20 mL afim de obter-se uma maior precisão na leitura dos valores.

**Fotografia 10 - Verificação da pressão interna dos frascos antes da amostragem com o auxílio do manômetro digital**



Fonte: Autoria própria (2018)

**Fotografia 11 - Ilustração da coleta de amostras do biogás com o auxílio de manômetro digital e seringa de vidro.**



**Fonte: Autoria própria (2018)**

No entanto, para se ter o valor produzido de biogás em função de cada substrato, utilizou-se uma equação matemática que expressa o volume total de biogás gerado em cada reator menos a produção gerada individualmente pelo inóculo presente em cada reator em função dos SV adicionados. Assim, permite-se identificar a fração de biogás produzida por cada substrato isoladamente. Na Equação 2 está demonstrado que o biogás medido (Volume Total) representa a soma do substrato (Biogás Substrato) e do inóculo (Volume Inóculo).

$$\text{Biogás Substrato} = \text{Volume Total} - \text{Volume Inóculo} \quad (2)$$

Na Equação 3 pode-se calcular o volume de biogás, produzido pelo inóculo, em cada reator de acordo com a SV.

$$Vi = \frac{\sum Vt*ml}{Mt} \quad (3)$$

Onde o volume de biogás do inóculo,  $V_i$ , é determinado pela somatória da multiplicação entre o volume total de biogás e a massa de inóculo,  $Vt*ml$ , dividido pela massa total no reator,  $Mt$ .

Análise da Variância (ANOVA) é um método para testar a igualdade de três ou mais médias populacionais, baseado na análise das variâncias amostrais. Quando resulta em um p-valor menor que 5%, temos evidências de que ao menos um tratamento se diferencia dos demais. Para saber quem é este tratamento discrepante podemos comparar os tratamentos entre si e verificar quais são estatisticamente iguais ou diferentes.

Para isso existem alguns testes de médias, como por exemplo o teste de Tukey. Após determinarmos a diferença mínima significativa (ou Honest Significant Difference - HSD), podemos julgar se as médias são iguais ou não.

#### 4.7.1 Caracterização Do Biogás Produzido Nos Reatores

A análise da composição de biogás foi realizada por meio de cromatografia gasosa em um cromatógrafo com Detector de Condutividade Térmica (TCD) da marca Perkin Elmer, modelo Clarus 680. Foi utilizada uma coluna empacotada Plot Q, utilizando-se Hélio como gás de arraste a uma vazão de 30,0 mL min<sup>-1</sup>. Foram identificadas as seguintes frações no cromatograma:

- Mistura de ar (O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>)
- Metano (CH<sub>4</sub>);
- Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>);
- Sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S).

Inicialmente realizaram-se análises com biogás padrão contendo as concentrações conhecidas dos gases nitrogênio (N<sub>2</sub>), oxigênio (O<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S). A composição do biogás padrão está apresentada na Tabela 4. Todas as análises foram realizadas pela injeção de um volume de 200 µL de biogás em cada leitura, utilizando-se de uma seringa da marca Hamilton, modelo 1750RN SYR (22/2”/2 com capacidade de 500 µL).

**Tabela 4 - Composição do biogás padrão utilizado.**

Elemento	Fração na mistura (mol mol <sup>-1</sup> )
CH <sub>4</sub>	0,65
CO <sub>2</sub>	0,29
H <sub>2</sub> S	0,007
N <sub>2</sub> -O <sub>2</sub>	0,041

**Fonte: Autoria própria (2018)**

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Análises Físico-Químicas Do Substrato Coletado Na Propriedade

A relação entre os sólidos orgânicos e produção de biogás está, intimamente, ligada à fração volátil dos sólidos e influenciam diretamente no acúmulo de biogás produzido, sendo possível prever sua degradabilidade. Na Tabela 5 estão apresentadas as características físico-químicas dos dejetos brutos de suínos na fase de crescimento e terminação, coletados na propriedade em diferentes datas.

**Tabela 5 - Concentração de ST, SF e SV do afluente e efluente do biodigestor.**

Data	AFLUENTE			EFLUENTE		
	Sólidos Totais (mg L <sup>-1</sup> )	Sólidos Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	Sólidos Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	Sólidos Totais (mg L <sup>-1</sup> )	Sólidos Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	Sólidos Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )
nov/17	30051	6851	23200	13878	5525	8352
jan/18	14330	4960	8710	7618	5135	2483

**Fonte: Autoria Própria (2018)**

Nota-se que o maior valor apresentado para ST do afluente encontra-se no início do confinamento dos animais, 11/2017, resultado semelhante ao valor máximo apresentado por Silva (1996). Já no mês 01 de 2018 percebe-se uma queda na concentração de sólidos totais, podendo ser em função da manutenção feita diariamente no estabelecimento, esse valor se aproxima ao mínimo apresentado pelo referido autor assim como para os SV e SF, do afluente e do efluente, os resultados obtidos aproximam-se das médias apresentadas Silva (1996).

## 5.2 Análises físico-químicas do substrato utilizado para o PBM

Na Tabela 6 estão apresentadas as características físico-químicas encontradas dos dejetos brutos, coletados na propriedade e utilizados no PBM.

**Tabela 6 - Concentração de ST, %ST e % SV do inóculo, da celulose e dos substratos (bovino, suíno e soro de leite).**

		<b>Média</b>	<b>Desvio-Padrão</b>	<b>CV</b>
<b>Inóculo</b>	ST (mg L <sup>-1</sup> )	18640,67	150,98	0,81
	%ST	3,74	0,02	0,53
	%SV	56,99	0,42	0,74
<b>Celulose</b>	%ST	96,54	0,16	0,17
	%SV	99,87	0,06	0,07
<b>Bovino</b>	ST (mg L <sup>-1</sup> )	58548,00	494,40	0,84
	%ST	11,63	0,06	0,52
	%SV	80,29	0,74	0,92
<b>Suíno</b>	ST (mg L <sup>-1</sup> )	169608,67	2037,29	1,20
	%ST	7,48	0,10	1,36
	%SV	72,19	0,58	0,8
<b>Soro de Leite</b>	ST (mg L <sup>-1</sup> )	40098,67	115,27	0,28
	%ST	4,00	0,01	0,38
	%SV	42,55	0,08	0,19

**Fonte: Autoria própria (2018)**

Em relação ao substrato bovino, percebe-se que a média do percentual de ST, 11,63%, está acima do valor apresentado por Ferreira (2012). O mesmo substrato, quando comparado em função dos SV, 80,29%, pode ser considerado semelhante ao índice apresentado pelo referido autor. Já quando se tratando de dejetos suínos os valores encontrados se aproximam ainda mais, tanto para ST quanto para SV.

Para a distribuição dos substratos foi utilizado o procedimento anteriormente descrito para a proporção teórica, no entanto a Tabela 7 demonstra a proporção real dos dejetos em cada reator.

Tabela 7 - Proporção real dos substratos para cada reator.

Massa (g)		R1	R2	R3	R4	Média	Desvio-Padrão	CV (%)
Inóculo		150,28	150,22	150,46	150,60	150,37	0,17	0,12
Inóculo+ Celulose	Inóculo	150,77	150,53	150	150,58	150,37	0,27	0,18
	Celulose	1,76	1,72	1,73	1,73	1,73	0,01	0,99
Inóculo+ Soro	Inóculo	92,16	92,14	92,47	92,19	92,24	0,15	0,17
	Soro	58,08	58,48	58,55	58,38	58,37	0,21	0,35
Inóculo+ Bovino	Inóculo	135,22	135,15	135,44	135,77	135,39	0,27	0,20
	Bovino	15,19	15,06	15,09	15,04	15,09	0,60	0,44
Inóculo+ Suíno	Inóculo	125,23	125,14	126	125,38	125,35	0,17	0,14
	Suíno	25,03	25,11	25	25,08	25,07	0,03	0,13
Inóculo+ Suíno+ Soro	Inóculo	120,14	120,25	120,92	120,66	120,49	0,36	0,30
	Suíno	21,07	21,34	21,32	21,15	21,22	0,13	0,61
	Soro	13,86	10,27	11	10,22	11,10	1,84	16,60
Inóculo+ Suíno+ Bovino	Inóculo	130,14	130,43	130,11	130,35	130,25	0,15	0,12
	Suíno	15,04	15,270	15	15,270	15,17	0,11	0,77
	Bovino	6,24	6,21	6	6,65	6,32	0,21	3,40

Fonte: Autoria própria (2018)

### 5.3 Análises da produção do biogás dos reatores PBM

A produção acumulada de cada reator foi medida e pode ser observada na Tabela 8, esses valores foram utilizados para as análises estatísticas.

O inóculo apresentou a menor produção, o que já era esperado, justamente por se tratar de um substrato concentrado e com uma atividade microbológica em estágio já desenvolvido.

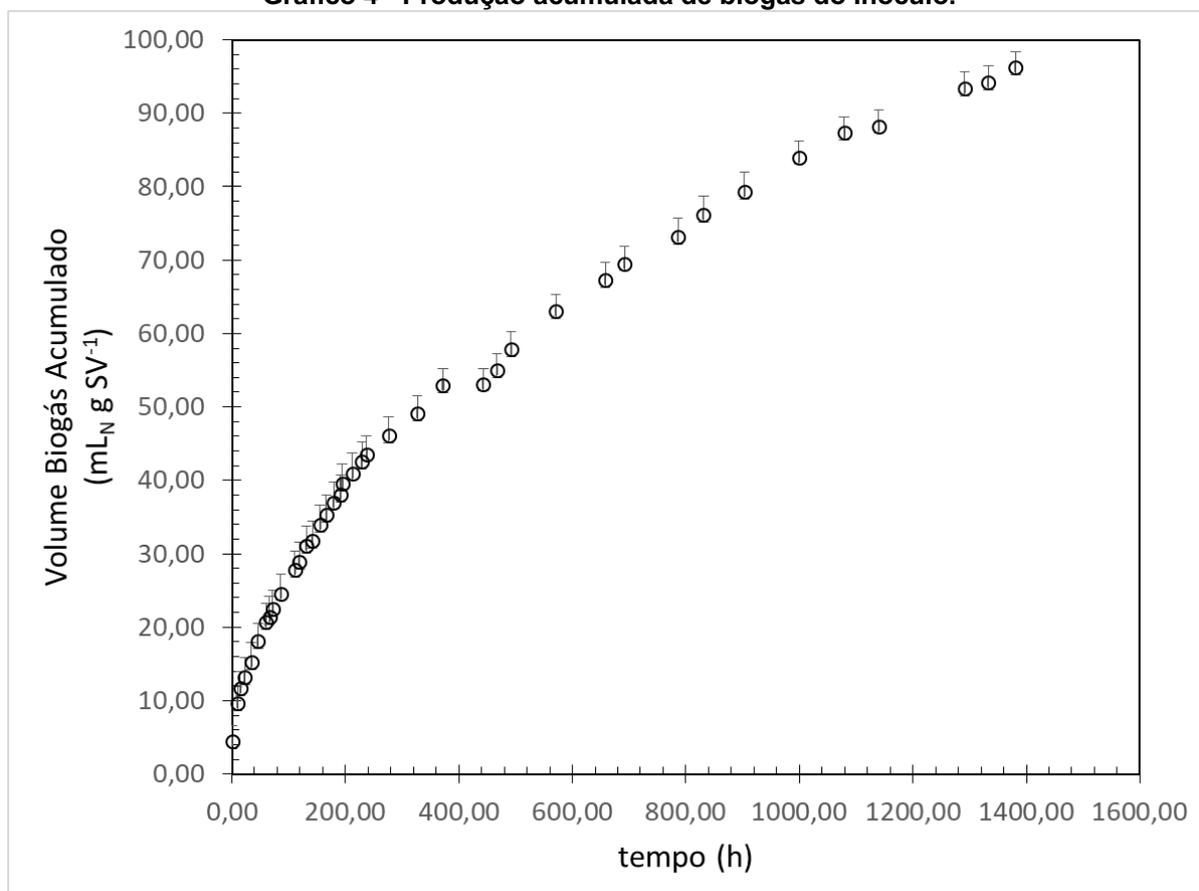
Tabela 8 - Produção acumulada de biogás.

	Replicatas				Média (mL <sub>N</sub> gSV <sup>-1</sup> )	Desvio-Padrão
	R1	R2	R3	R4		
<b>Inóculo</b>	95,6	93,7	99,0	96,7	96,3	2,21
<b>Celulose</b>	551,0	559,0	687,0	768,0	641,3	104,99
<b>Soro de leite</b>	1012,0	1062,0	1103,0	1142,0	1079,8	55,74
<b>Bovino</b>	537,0	557,0	600,0	581,0	568,8	27,52
<b>Suíno</b>	1678,0	1359,0	1074,0	1201,0	1328,0	260,84
<b>Suíno + Soro</b>	1579,0	1692,0	1697,0	1806,0	1693,5	92,70
<b>Suíno + Bovino</b>	1452,0	1658,0	1617,0	1565,0	1573,0	89,19

Fonte: Autoria própria (2018)

A produção de biogás do inóculo foi registrada para subtraí-la do total produzido de todos os substratos. Após um período de 58 dias de incubação o inóculo apresentou uma produção de biogás de 96,26 mL<sub>N</sub> gSV<sup>-1</sup>, como observado no gráfico 4.

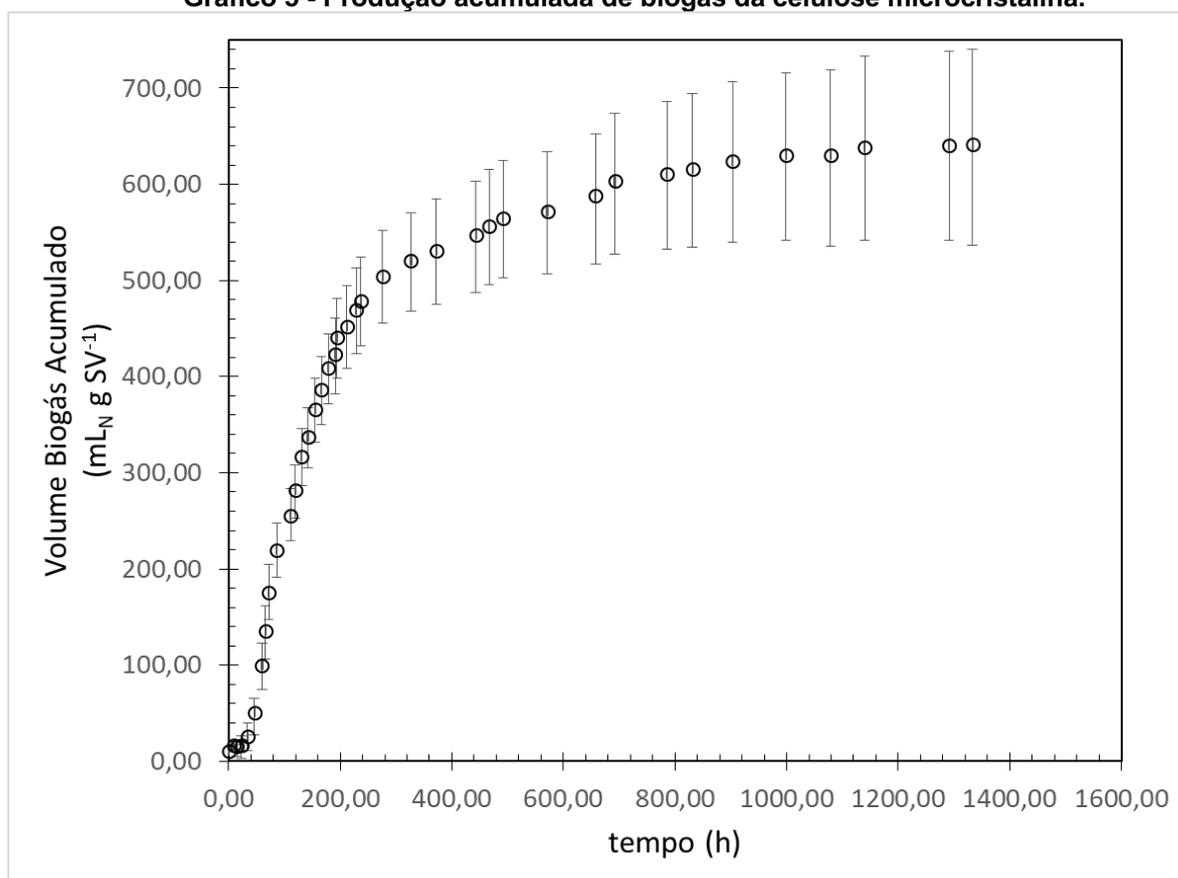
Gráfico 4 - Produção acumulada de biogás do Inóculo.



Fonte: Autoria própria (2018)

A produção de biogás a partir da celulose microcristalina teve como objetivo avaliar a eficiência da degradação e produção de biogás feitas pelos microorganismos presentes no inóculo. O valor total produzido pela celulose foi de  $641,21 \text{ mL}_N \text{ gSV}^{-1}$ , cerca de 87% da produção recomendado pela VDI 4630, que fixa um valor mínimo de 80% da produção teórica (entre  $740\text{-}750 \text{ L}_N \text{ kgSV}^{-1}$ ), como pode ser observado no gráfico do gráfico 5.

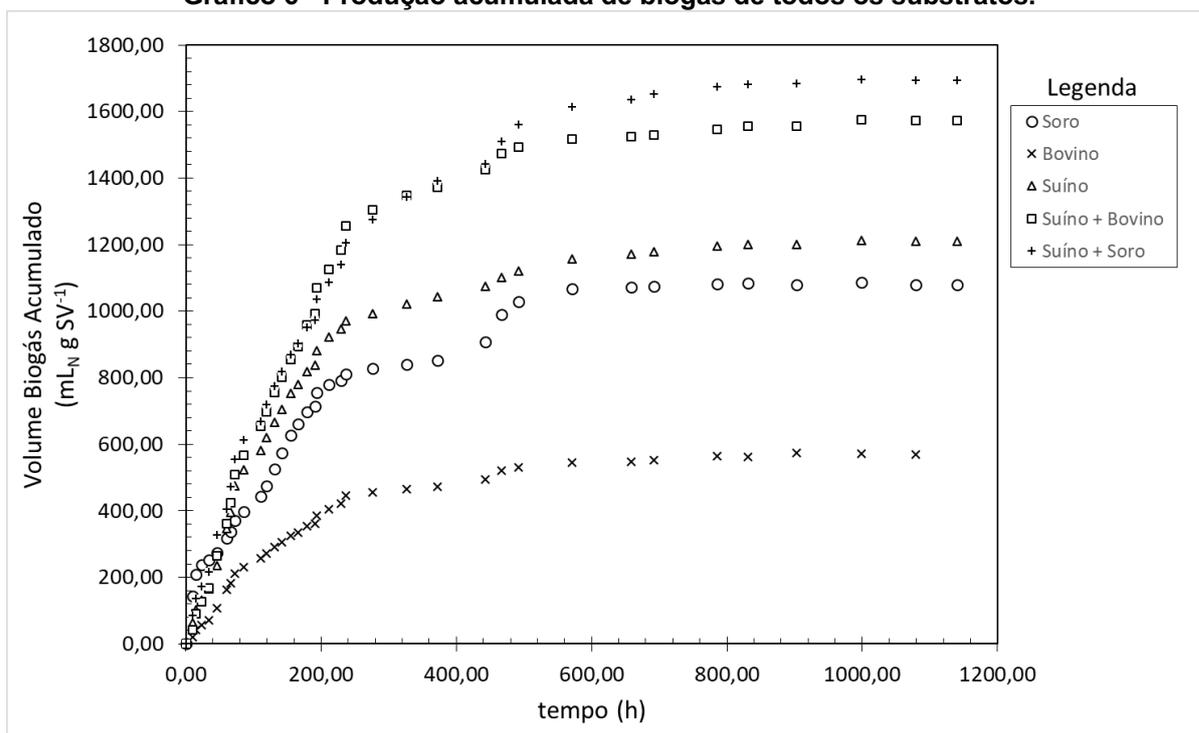
**Gráfico 5 - Produção acumulada de biogás da celulose microcristalina.**



Fonte: Autoria própria (2018)

Os demais resultados da produção de biogás para cada substrato ou mistura destes serão demonstrados a seguir em forma de gráficos e os dados da produção estão disponíveis em tabelas no Apêndice A.

Nota-se uma produção de biogás, em todos os substratos, já nas primeiras horas de incubação do experimento. Desse modo, ao término do período de incubação, 58 dias, percebe-se que o substrato suíno+ soro atingiu o maior nível de produção de biogás em comparação aos demais substratos, alcançando um volume de  $1693,58 \text{ mL}_N \text{ gSV}^{-1}$ , como pode ser observado no gráfico 6.

**Gráfico 6 - Produção acumulada de biogás de todos os substratos.**

Fonte: Autoria própria (2018)

De acordo com Lyson (2011), há quatro tipos de curvas que podem ocorrer durante o processo de fermentação, sendo que as curvas de produção de biogás do experimento assemelham-se com a curva normal, ou seja, substâncias são transformadas rapidamente em biogás e a curva de produção é caracterizada por um aumento íngreme na quantidade acumulada de biogás;

Pode-se dizer que o substrato suíno+ bovino teve uma produção semelhante ao do soro de leite, chegando a produzir 1572,87 mL<sub>N</sub> gSV<sup>-1</sup>. O substrato bovino foi o de menor produção com 568,81 mL<sub>N</sub> gSV<sup>-1</sup>.

A análise de variância (ANOVA), apresentada na Tabela 9, indica que há diferença estatisticamente significativa ( $p < 0,05$ ) entre as médias da variável produção de biogás.

**Tabela 9 - Tabela de Análise de variação (ANOVA) das produções médias de biogás.**

	Graus de Liberdade.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	p-valor
Tratamento	6	8218340,637	1369723,44	96,38507773	3,518E-14
Resíduos	21	298429,9324	14210,94916		

Fonte: Autoria própria (2018)

Feito isso, faz-se necessário a aplicação do teste de Tukey, a 95% de confiança, a fim de verificar quais as médias se diferem umas das outras. Os resultados do teste são apresentados na Tabela 10.

**Tabela 10 - Tabela de resultados das comparações múltiplas dos diferentes substratos.**

Fator	Médias mL <sub>N</sub> gSV <sup>-1</sup>	Grupos
Suíno + Soro de Leite	1693,5	a
Bovino + Suíno	1573,0	ab
Suíno	1328,0	bc
Soro de leite	1079,75	c
Celulose Microcristalina	641,25	d
Bovino	568,75	d
Inóculo	96,26	e

Fonte: Aatoria própria (2018)

De acordo com os resultados apresentados, nota-se que o substrato Suíno+Soro de Leite apresentou a maior média de produção de biogás não se diferenciando, significativamente, do substrato Bovino+Suíno. No entanto, quando comparado com o terceiro substrato, Suíno, percebe-se que, segundo o teste, existe uma diferença significativa entre as médias e por isso não podem ser consideradas iguais.

Ainda, mesmo apresentando valor diferente da maior média, observa-se que, quando comparadas, as médias entre o Suíno e Bovino+Suíno são consideradas iguais estatisticamente assim como para a comparação do entre o Suíno e o Soro de leite.

O substrato Inóculo foi o que apresentou a menor média de produção não apresentando qualquer semelhança entre as médias. A Celulose não apresentou uma diferença significativa quando comparada com o substrato Bovino, mas não pode ser considerado o mesmo em relação às outras médias.

#### 5.4 Análises do biogás realizadas na propriedade

Os resultados preliminares de um lote de suínos estão demonstrados na Tabela 10. Nota-se um aumento da concentração do H<sub>2</sub>S e acredita-se que seja em razão da adição do soro de leite, uma vez que o líquido possui uma grande quantidade de ácidos lácticos que podem influenciar diretamente no crescimento dessa substância.

No dia 26/01/2018, percebe-se um aumento significativo na concentração de H<sub>2</sub>S, coleta posterior ao dia em que foi adicionado cerca de 5.000 L de soro de leite, como demonstra a Tabela 11.

**Tabela 11 - Leitura feita pelo analisador portátil**

DATA	BIODIGESTOR				CONDENSADOR			
	CH <sub>4</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> S (ppm)	CH <sub>4</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> S (ppm)
01/11/2017	45,5	35,47	1,15	80	44,73	35,47	1,45	63
12/12/2017	47,42	32,96	1,3	245	47,28	33,36	1,36	633
04/01/2018	47,62	32,72	0,89	289	48,09	33,88	0,9	257
26/01/2018	46,73	35,6	0,77	2918	46,63	36,11	1,01	3300

**Fonte: Autoria própria (2018)**

De acordo com Wawrzyniak e Wasiak (2011), nem todo biogás produzido pode ser aplicado na produção de energia. O principal requisito para essa finalidade é que o biogás possua pelo menos 40% de metano em sua composição, o que neste caso, apresenta teores de CH<sub>4</sub> acima de 45%. Ramos and Fdz-Polanco (2014), apresentaram concentrações de H<sub>2</sub>S entre 3500 e 5000 ppm<sub>v</sub> e obtiveram eficiência de remoção próximo a 99%. Alguns autores também apresentam resultados, em que, segundo Krayzelova et al., (2014<sup>a</sup>), concentrações de H<sub>2</sub>S entre 20 000 e 67 000 ppm<sub>v</sub> removidas entre 70 e 80 %

### 5.5 Análises cromatográficas do biogás produzido no laboratório

A maioria dos substratos utilizados no presente trabalho, apresentam uma concentração de CH<sub>4</sub> entre 50 e 65% e para o CO<sub>2</sub> em torno de 35 a 45%, como pode ser observado na Tabela 11. No entanto, concentrações de CO<sub>2</sub> acima de 50 a 60% podem ser justificados pela baixa presença de CO<sub>2</sub> dissolvido em água. Quanto maior a temperatura de fermentação do processo menor a concentração de CO<sub>2</sub> dissolvido em água.

Villela e Silveira (2005), ao analisar na Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) de um Laticínio a produção de biogás gerado por efluentes do processo de pasteurização do leite, iogurtes com polpa de frutas, flan, pudins e produtos longa vida, para futuramente ser utilizado como insumo energético para o próprio processo industrial, por meio do uso de biodigestor modelo Chinês, verificaram biogás com a seguinte composição: 62,7 % de CH<sub>4</sub>; 13,4 % de N<sub>2</sub>; 5 % de CO; 2,4 % de CO<sub>2</sub>; 2,4 % de H<sub>2</sub>O; 14,1 % de H<sub>2</sub>S.

**Tabela 12 - Resultados das análises de cromatografia.**

DATA		SORO	BOVINO	SUÍNO	SUÍNO+SORO	SUÍNO+BOVINO
18/abr	CH <sub>4</sub> (%)	78,58	54,95	64,73	65,48	66,64
	CO <sub>2</sub> (%)	33,67	55,82	37,71	37,85	39,88
	H <sub>2</sub> S (ppm)	246,01	71,10	66,13	91,89	65,18
24/abr	CH <sub>4</sub> (%)	71,70	48,49	63,20	57,53	54,76
	CO <sub>2</sub> (%)	38,71	61,94	39,63	33,73	46,37
	H <sub>2</sub> S (ppm)	160,56	76,53	50,00	74,39	52,28
22/mai	CH <sub>4</sub> (%)	74,96	55,42	60,88	60,76	58,36
	CO <sub>2</sub> (%)	35,49	54,51	45,82	44,63	49,32
	H <sub>2</sub> S (ppm)	53,04	42,31	26,91	38,07	55,33
30/mai	CH <sub>4</sub> (%)	64,34	47,29	53,88	54,41	51,80
	CO <sub>2</sub> (%)	30,65	43,47	38,93	38,46	42,39
	H <sub>2</sub> S (ppm)	49,69	37,28	38,69	34,17	57,69

**Fonte: Autoria própria (2018)**

Rico et al., (2014), em pesquisa com codigestão anaeróbia de água residuária de laticínios e esterco bovino concluíram que constitui bom substrato para o processo. Os resultados obtidos demonstraram que os resíduos líquidos e semi-líquidos da indústria de laticínios tiveram potenciais de metano equivalentes ao esterco e 35% desse resíduo láctico com base na massa aumentou 80,5% do rendimento de metano em relação ao esterco quando em digestão anaeróbia individual.

## 6 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados apresentados, observa-se que o substrato Suíno+ Soro apresentou a maior média de produção de biogás, o que é utilizado pela propriedade, não se diferindo, significativamente, do substrato Bovino+ Suíno. No entanto, quando comparado com o terceiro substrato, apenas Suíno, percebe-se que, segundo o teste, existe uma diferença significativa entre as medias e por isso não podem ser consideradas iguais, levando a concluir que o soro contribui para a produção de biogás.

O biogás produzido no laboratório se mostrou de maior qualidade quando comparado com o biogás analisado na propriedade, possivelmente em função das semelhanças.

A injeção de pequena quantidade de ar atmosférico em um sistema de biodigestão alimentado por efluente suíno, demonstrou-se eficiente no processo de remoção de  $H_2S$ , uma vez que, de acordo com os resultados obtidos, o aumento do teor de  $O_2$  ocasionou uma diminuição de  $H_2S$ .

## REFERÊNCIAS

- ANUALPEC: Anuário da pecuária brasileira. São Paulo: Instituto FNP, 380p. 2015.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **APHA**. Standard methods for the examination of water and wastewater, Washington, DC: APHA, 2012. Método 5220D - Método Colorimétrico, para DQO. Método 2540 B para sólidos totais (st), sólidos totais fixos (stf) e sólidos totais voláteis (stv)
- BARBOSA, A.S. et al. **Utilização do soro como substrato para produção de aguardente: estudo cinético da produção de etanol. Revista verde de agroecologia e desenvolvimento sustentável.** Mossoró, v.5, n.1, p.7-25, jan/mar, 2010.
- BERTIN, L. et al. **Innovative two-stage anaerobic process for effective codigestion of cheese whey and cattle manure. Bioresource Technology .**128, p. 779–783, 2013.
- CAVALCANTI, José Eduardo W. de A. **Manual de tratamento de efluentes industriais. 2ª Edição ampliada. 2012.** São Paulo: Engenho editora técnica LTDA.
- CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo – Apêndice A: Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas**
- CHERNICHARO, C. A. L. (1997). **Reatores anaeróbios. 2. Ed.** Belo Horizonte: DESA-UFMG, 2007. 380 p, v.5.
- COSTIGAN M. G.; **Hidrogen sulfide: UK occupational exposure limits. Occup Environ Med.** 2003; 60:308–312
- CI – **BIOGÁS**. Metodologia de dimensionamento: Estimativa do Potencial de Produção de Dejetos, Estimativa do Potencial de Produção de Biogás e Gasoduto. Foz do Iguaçu, 2011.
- DESHUSSES, M. A.; GABRIEL, D. **Biotrickling filter technology.** In: SHAREEFDEEN, Z.; 2005. Cap. 7, p. 146-167.
- DEUBLEIN, D., STEINHAUSER, A. **Biogas from Waste and Renewable Resources.** An Introduction, first ed. Wiley-VCH, Weinheim. 2008
- DIAS, S.I et al., **Effect of oxygen dosing point and mixing on the microaerobic removal of hydrogen sulphide in sludge digesters.** Department of Chemical Engineering and Environmental Technology, Escuela de Ingenierías Industriales, Spain, 2010.

DRAGONE, G.; TEIXEIRA, J. A.; SILVA, J. B. A. **Bebidas fermentadas e destiladas a partir do soro de leite**. In: VENTURINI FILHO, W. G (Coord.). *Bebidas não alcoólicas: ciências e tecnologia*. SÃO PAULO: BLUCHER, 2011. p. 511 - 536.

EDWIGES, THIAGO. **Biodigestão anaeróbica de resíduos vegetais provenientes de central de abastecimento**. 81f; Cascavel, 2017.

ESPOSSITO, G. et al. **Anaerobic co-digestion of organic wastes. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**. December 2012, v. 11, p. 325-341.

FERNÁNDEZ, C. et al. **Anaerobic Co-digestion of Sewage Sludge with Cheese Whey under Thermophilic and Mesophilic Conditions**. *International Journal of Energy Engineering* 2014, 4(2): 26-3.

FERREIRA, A. M. **Manejo reprodutivo de bovinos leiteiros. Práticas corretas e incorretas, casos reais, perguntas e respostas**. Juiz de Fora: Editar Editora Associada, 2012, 614 p.

FRARE, L. M.; GIMENES, M. L.; PEREIRA, N. C. **Processo para remoção de ácido sulfídrico de biogás**. *Engenharia Sanitária Ambiental*, v. 14, n. 2, p. 167-172, Rio de Janeiro, 2009.

GONÇALVES JUNIOR, A. C.; POZZA, P. C.; NACKE, H.; LAZZERI, D. B.; SELZLEIN, C.; CASTILHA, L. D. Homogeneização e níveis de metais em dejetos provenientes da bovinocultura de leite. **Acta Scientiarum Technology**, Maringá, v.29, n.2, p.213-217, 2007.

HAMELIN, L.; WESNAES, M.; WENZEL, H.; PETERSEN, B. M. **Environmental Consequences of Future Biogas Technologies Based on Separated Slurry**. Institute of Chemical Engineering, Biotechnology and Environmental Technology, Faculty of Engineering, University of Southern Denmark, Campusvej 55, 5230 Odense M., Denmark, 2011

HASS, Luiza Beatriz, **Desenvolvimento de um filtro para remoção de H<sub>2</sub>S de Biogás**. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2013.

HERNANDEZ, S.P. et al. **Biogas purification for MCFC application**. *International Journal of Hydrogen Energy*, v.36, p. 8112-8118, 2011.

KAPDI, S. S.; VIJAY, V. K.; RAJESH, S. K.; PRASAD, R. **Biogás scrubbing, compression and storage: perspective and prospectus in Indian context**. *Renewable Energy*, v.30, p.1195-1202, 2005.

MAGANHA, M. F. B. **Guia técnico ambiental da indústria de produtos lácteos**. São Paulo: CETESB, 2008. 95p.

KUMMER, Ana C. B.; ANDRADE, Lidiana; GOMES, Simone d.; FAZOLO, Ajadir; HASAN, Salah D. M.; MACHADO, Fabiano. **Tratamento de efluente de abatedouro de tilápia com adição de manipueira na fase anóxica**. v. 31, n1, 2011.

LUCAS JÚNIOR, J. **Estudo comparativo de biodigestores modelos Indiano e Chinês**. Botucatu, 1987, 114p. (Tese de Doutorado), Universidade Estadual Paulista.

LYSON, D. F.; REQUENA, R. E.; BAUER, A.; AMON, B.; AMON, T. **Biogas laboratory setup in Foz do Iguaçu, Brazil**. 3rd Progress Report. August 2011. Disponível em: <[http://www.renenergyobservatory.org/uploads/media/Anexo\\_12.\\_Biogas\\_Lab.3erd\\_and\\_final\\_report.pdf](http://www.renenergyobservatory.org/uploads/media/Anexo_12._Biogas_Lab.3erd_and_final_report.pdf)>.

MANSO, K. R. J.; FERREIRA, O. M. **Confinamento de bovinos: estudo do gerenciamento dos resíduos**. Universidade Católica de Goiás, Departamento de Engenharia – Engenharia Ambiental, Goiânia, 2007.

MATOS, A. T. **Poluição ambiental. Impactos no meio físico**. 1ª edição. Viçosa, MG: ed. UFV, 2010, 260 p.

MENDES, et al. Biodegradação de águas residuárias de laticínios previamente tratadas por lipases. **Brazilian Journal of food Technology**, v.9, n.2, p. 143-149, abr/jun, 2006.

NIRENBERG, L. P.; FERREIRA, O. M.; **Tratamento de águas residuárias de indústria de laticínios: eficiência e análise de modelos matemáticos do projeto da Nestlé Goiânia- GO**. 2005.

NOGUEIRA, R. G. S. **Inclusão de cana de açúcar triturada em biodigestores abastecidos com dejetos de bovinos de corte confinado**. 2013. 74f. Tese (Mestrado em Energia na Agricultura) Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias-UNESP, Botucatu, 2013.

NORMA TECNICA SABESP- **NTS 004/1997**; Demanda Química de Oxigênio; Método de ensaio.

**OESTE DO PARANA EM NUMEROS** Visitado em 16/08/2018 [http://www.oesteemdesenvolvimento.com.br/src/pagina\\_arquivo/14](http://www.oesteemdesenvolvimento.com.br/src/pagina_arquivo/14).

OLIVEIRA, L. A.; MADEIRA, V. S. **Tratamento Terciário de Esgoto Sanitário Visando o Reúso da Água**. BlucherChemicalEngineeringProceedings, v. 1, n. 2, p. 7498-7505, 2012.

OLIVEIRA, P. A. V. **Tecnologias para o manejo de resíduos na produção de suínos: manual de boas práticas**. Concórdia, Embrapa Suínos e Aves, 2004.

Ramos I, Fdz-Polanco M(2014) **Microaerobic control of biogas sulphide content during sewage sludge digestion by using biogas production and hydrogen sulphide concentration**. Chem Eng J 250:303–311

RAMIREZ D; PEÑA G. **Desulfurisation of biogas by Biofiltration**. Bioprocesses Department, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología, Instituto Politécnico Nacional. Av. Acueducto s/n, 07340, Mexico D.F.

RICO, C.; RICO, J. L.; LASA, C. Anaerobic digestion of the liquid fraction of dairy manure separated by screw pressing and centrifugation in a upflow anaerobic sludge blanket reactor at 25 °C. **Biosystems engineering**, v. 112, p. 344-351, 2012.

RICO, C. et al. Biogas production from various typical organic wastes generated in the region of Cantabria (Spain): Methane Yields and Co-Digestion Tests. **Smart Grid and Renewable Energy**, 5, 128-136, 2014.

RYCKEBOSCH, E.; DROUILLON, M.; VERVAEREN, H. **Techniques for transformation of biogas to biomethane**. Biomass and Bioenergy, v.35, p.1633-1645, 2011.

SALOMON, K. R. **Avaliação Técnico-Econômica e ambiental da utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá. pg, 38-39, 2007.

SARAIVA, A. et al. **Conceitos para o licenciamento ambiental de usinas de biogás / Probiogás**. Organizadores: Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ) - Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2016, 147p.

SANTI, L. **Influência da adição de enzimas e microrganismos sobre a digestão anaeróbia de dejetos bovinos e suínos. Dissertação (mestrado)** - Universidade Estadual Paulista – Campus Jaboticabal, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2013

SILVA, Andreza A.; ALBINO, Gabriela A. F. **A biodigestão de resíduos agrossilvopastoris no processo de transformação de energia**. Revista Científica da FEPI, v. 6, n. 1, 2015.

VALENTE, V. B. **Análise de Viabilidade Econômica e Escala Mínima de Uso do Biogás de Reatores Anaeróbios em Estações de Tratamento de Esgoto no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2015.

VALENTE JUNIOR, A. S.; SANTOS, J. A. N.; SOUZA, G. S. A agroindústria na região nordeste. In: ZIBETTI, D. W. e BARROSO, L. A. **Agroindústria: uma análise no contexto socioeconômico e jurídico brasileiro**. 1 ed. São Paulo: Universitária de Direito, 2009. 327 p.

VDI 4630. Fermentation of organic materials - **Characterisation of the substrate, sampling**. Collection of material data and fermentation tests. Verein Deutscher Ingenieure (Germany Association of Engineers), 2006 96 p.

VERNEQUE, R. S. et al. **Seleção para objetivos econômicos em gado de leite**. 1ª edição. Juiz de Fora: Embrapa gado de leite, 2006. 152 p.

VILLELA, I. A. C.; Silveira, J. L. **Aspectos técnicos da produção de biogás em um laticínio Janus**, Lorena, ano 2, nº 2, 1º semestre de 2005.

VIOLA, E. D. M. O sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S) e o meio ambiente. In: **SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA**, 2., 2005, Resende - Rio de Janeiro

ZICARI, S. M. **Removal of hydrogen sulfide from biogas using cow-manure compost**. Dissertação (Mestrado em Ciência). Department of biological and Environmental Engineering, Cornell, Ithaca. 2003.

Wawrzyniak R.; Wasiak W.; **Chromatographic, spectrophotometric and electrochemical methods in determination of biogas component. Ecological chemistry and engineering**. V 8, N<sup>o</sup>4, 2011.

WELLINGER A, LINDEBERG A. **Biogás upgrading and utilization**. Task 24: energy from biological conversion of organic wastes, pg. 17, 1999.

Wu, W. **Anaerobic Co-digestion of Biomass for Methane Production: Recent Research Achievements**. 2000.

## APÊNDICE A

Tabela A1 - Dados de produção de biogás do substrato inóculo.

Período Acumulado (h)	Média Acumulada Inóculos (mLN gSV <sup>-1</sup> )	Desvio-padrão
0,00	4,45	2,18
10,00	9,65	2,30
15,00	11,69	2,27
23,00	13,23	2,60
34,00	15,26	2,66
46,00	18,08	2,40
60,00	20,71	2,52
66,00	21,44	2,71
72,00	22,48	2,52
86,00	24,61	2,54
111,00	27,82	2,51
119,00	28,95	2,56
131,00	31,11	2,63
142,00	31,76	2,64
155,00	33,93	2,66
166,00	35,28	2,67
179,00	37,03	2,68
191,00	38,07	2,72
194,00	39,55	2,68
212,00	41,00	2,76
229,00	42,53	2,71
237,00	43,58	2,51
276,00	46,13	2,54
327,00	49,14	2,34
372,00	52,92	2,28
443,00	53,15	2,03
467,00	54,97	2,27
492,00	57,82	2,37
571,00	63,05	2,31
658,00	67,33	2,31
692,00	69,53	2,31
786,00	73,18	2,57
831,00	76,21	2,53
903,00	79,31	2,64
999,00	84,02	2,18
1079,00	87,32	2,16
1140,00	88,25	2,26
1291,00	93,35	2,25
1333,00	94,22	2,17
1381,00	96,22	2,17

Fonte: Autoria própria (2018)

**Tabela A2 - Dados de produção de biogás do substrato celulose.**

Período Acumulado (h)	Média Acumulada Celulose (mLN gSV <sup>-1</sup> )	Desvio-padrão
0,00	0,00	0,00
10,00	11,03	0,43
15,00	16,76	4,85
23,00	15,42	10,22
34,00	16,42	13,71
46,00	26,06	15,04
60,00	50,45	23,15
66,00	100,03	25,92
72,00	135,56	29,04
86,00	175,20	28,38
111,00	219,82	28,14
119,00	255,42	26,30
131,00	282,18	28,83
142,00	317,33	30,73
155,00	337,23	32,16
166,00	366,43	34,42
179,00	386,60	36,11
191,00	408,76	37,54
194,00	423,15	41,00
212,00	440,74	41,94
229,00	452,29	44,05
237,00	469,37	45,12
276,00	478,89	47,00
327,00	504,60	49,38
372,00	520,63	53,01
443,00	531,21	56,03
467,00	547,26	59,64
492,00	556,19	60,08
571,00	564,58	62,10
658,00	572,00	64,75
692,00	587,97	70,55
786,00	603,33	75,51
831,00	610,82	78,12
903,00	616,18	81,75
999,00	624,60	85,27
1079,00	630,75	88,83
1140,00	630,06	94,15
1291,00	638,87	97,49
1333,00	640,99	99,03
1381,00	641,21	105,07

Fonte: Autoria própria (2018)

**Tabela A3 - Dados de produção de biogás do substrato soro**

Período Acumulado (h)	Média Acumulada Soro (mLN gSV <sup>-1</sup> )	Desvio-padrão
0,00	0,00	0,00
10,00	143,40	6,17
15,00	208,89	32,76
23,00	237,08	37,32
34,00	251,41	39,04
46,00	274,05	40,01
60,00	318,31	45,33
66,00	337,71	47,44
72,00	370,81	52,07
86,00	397,26	55,34
111,00	442,97	61,89
119,00	474,69	69,37
131,00	526,67	75,99
142,00	572,96	81,64
155,00	625,97	82,51
166,00	660,40	80,77
179,00	697,95	66,82
191,00	714,40	59,95
194,00	754,63	57,20
212,00	778,88	56,42
229,00	791,43	57,35
237,00	812,09	55,24
276,00	826,79	54,18
327,00	838,91	53,57
372,00	852,17	52,60
443,00	907,47	52,30
467,00	989,80	64,30
492,00	1029,47	63,62
571,00	1067,09	56,11
658,00	1072,95	53,46
692,00	1075,50	53,22
786,00	1082,77	53,98
831,00	1083,21	54,16
903,00	1079,26	54,42
999,00	1087,62	54,73
1079,00	1080,19	55,31
1140,00	1079,64	55,68

**Fonte: Autoria própria (2018)**

**Tabela A4 - Dados de produção de biogás do substrato bovino**

Período Acumulado (h)	Média Acumulada Bovino (mLN gSV <sup>-1</sup> )	Desvio-padrão
0,00	0,00	0,00
10,00	20,49	10,47
15,00	41,72	8,38
23,00	56,91	7,21
34,00	70,30	6,95
46,00	106,47	9,22
60,00	163,89	18,01
66,00	182,27	21,21
72,00	211,15	25,00
86,00	229,38	26,72
111,00	256,53	27,80
119,00	270,81	27,85
131,00	291,88	27,57
142,00	306,48	27,66
155,00	324,03	27,87
166,00	334,58	27,87
179,00	352,69	27,69
191,00	360,80	26,71
194,00	386,29	28,45
212,00	405,73	28,45
229,00	422,29	28,57
237,00	444,90	28,30
276,00	455,66	27,99
327,00	465,26	28,19
372,00	473,00	27,86
443,00	494,39	27,69
467,00	521,06	27,79
492,00	530,55	27,66
571,00	544,84	27,83
658,00	547,80	27,91
692,00	552,15	28,21
786,00	563,38	28,11
831,00	561,77	28,46
903,00	573,37	28,33
999,00	571,97	28,08
1079,00	568,81	27,23

**Fonte: Autoria própria (2018)**

**Tabela A5 - Dados de produção de biogás do substrato suíno**

Período Acumulado (h)	Média Acumulada Suíno (mLN gSV <sup>-1</sup> )	Desvio-padrão
0,00	0,00	0,00
10,00	64,69	1,22
15,00	103,00	2,14
23,00	132,25	2,79
34,00	165,60	2,85
46,00	235,62	24,01
60,00	346,65	82,08
66,00	395,88	88,39
72,00	475,17	106,36
86,00	523,68	107,97
111,00	581,69	115,62
119,00	619,49	123,43
131,00	665,39	131,61
142,00	704,78	134,56
155,00	752,97	134,28
166,00	779,91	135,51
179,00	819,23	138,54
191,00	838,43	139,20
194,00	880,29	151,23
212,00	922,57	151,71
229,00	947,44	141,50
237,00	971,42	141,50
276,00	992,48	135,24
327,00	1020,35	145,05
372,00	1043,84	149,05
443,00	1074,74	151,83
467,00	1101,28	149,38
492,00	1120,21	148,75
571,00	1157,11	147,74
658,00	1172,28	147,09
692,00	1179,53	142,91
786,00	1194,32	142,23
831,00	1200,66	142,26
903,00	1200,96	141,37
999,00	1212,98	141,37
1079,00	1209,76	142,31
1140,00	1211,08	142,94

Fonte: Autoria própria (2018)

**Tabela A6** - Dados de produção de biogás do substrato suíno+soro.

Período Acumulado (h)	Média Acumulada Suíno + Soro (mLN gSV <sup>-1</sup> )	Desvio-padrão
0,00	0,00	0,00
10,00	86,50	7,60
15,00	136,87	8,33
23,00	172,82	9,19
34,00	216,32	8,26
46,00	327,29	3,76
60,00	404,37	22,73
66,00	471,36	33,25
72,00	553,46	48,03
86,00	611,80	55,33
111,00	667,26	62,90
119,00	718,38	68,87
131,00	775,69	76,99
142,00	817,61	79,47
155,00	868,43	80,18
166,00	902,40	81,31
179,00	950,82	84,50
191,00	973,14	84,28
194,00	1036,55	89,43
212,00	1087,01	89,75
229,00	1140,61	105,20
237,00	1205,63	105,94
276,00	1275,62	111,53
327,00	1343,49	115,11
372,00	1391,40	115,01
443,00	1442,87	122,48
467,00	1509,41	119,67
492,00	1560,79	110,43
571,00	1614,83	100,11
658,00	1636,03	99,76
692,00	1652,55	94,09
786,00	1673,70	93,43
831,00	1682,26	92,00
903,00	1682,78	91,62
999,00	1696,89	90,23
1079,00	1693,01	91,24
1140,00	1693,58	92,66

Fonte: Autoria própria (2018)

**Tabela A7 - Dados de produção de biogás do substrato suíno+bovino.**

Período Acumulado (h)	Média Acumulada Suíno + Bovino (mLN gSV <sup>-1</sup> )	Desvio-padrão
0,00	0,00	0,00
10,00	42,08	1,09
15,00	90,06	2,55
23,00	127,08	3,75
34,00	168,75	5,27
46,00	263,99	9,62
60,00	360,66	47,98
66,00	423,21	45,81
72,00	509,18	37,59
86,00	567,08	38,24
111,00	652,88	35,07
119,00	697,09	42,78
131,00	755,28	53,75
142,00	800,84	60,98
155,00	853,66	60,17
166,00	893,86	62,07
179,00	958,32	68,87
191,00	991,90	69,42
194,00	1070,68	82,31
212,00	1125,43	83,30
229,00	1183,06	86,95
237,00	1257,00	88,75
276,00	1303,88	89,27
327,00	1348,84	89,96
372,00	1372,72	89,58
443,00	1425,88	89,96
467,00	1474,61	90,06
492,00	1492,78	89,99
571,00	1516,47	90,08
658,00	1523,49	90,11
692,00	1530,21	90,21
786,00	1547,23	89,17
831,00	1554,80	88,63
903,00	1556,41	88,35
999,00	1575,26	88,77
1079,00	1571,91	89,16
1140,00	1572,87	89,18

**Fonte: Autoria própria (2018)**