

CRISTELA MARTA SIEBERT

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UMA PLANTA  
MICROGERADORA DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS**

CASCADEL  
PARANÁ – BRASIL  
MARÇO – 2021

CRISTELA MARTA SIEBERT

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UMA PLANTA  
MICROGERADORA DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, para obtenção do título de Mestre

Orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza

CASCVEL  
PARANÁ – BRASIL  
MARÇO– 2021

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

SIEBERT, Cristela Marta

Avaliação de desempenho de uma planta microgeradora de energia elétrica a partir do biogás / Cristela Marta SIEBERT; orientador(a), Samuel Nelson Melegari de Souza, 2021.

78 f.

Dissertação (mestrado), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, 2021.

1. Balanço de energia. 2. Biodigestor. 3. Eficiência. 4. Produção de biogás. I. Souza, Samuel Nelson Melegari de . II. Título.

**CRISTELA MARTA SIEBERT**

**Avaliação de desempenho de uma planta microgeradora de energia elétrica a partir do biogás**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestra em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Fontes Renováveis e Racionalização de Energia Na Agroindústria e Agricultura, APROVADA pela seguinte banca examinadora:



Orientador(a) - Samuel Nelson Melegari de Souza  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Reinaldo Aparecido Bariccatti  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Willian César Nadaleti  
Universidade Federal de Pelotas (UFPeI)

Cascavel, 3 de março de 2021

## **AGRADECIMENTOS**

Aos professores e colaboradores do programa de Pós-graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, por possibilitarem a realização do curso de pós-graduação.

Ao orientador, Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza, pela orientação e pelo o ensino disponibilizado para o desenvolvimento do trabalho.

À Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Simone Damasceno Gomes, por disponibilizar o Laboratório de Saneamento do *campus* de Cascavel, e ao técnico Edison Barbosa da Cunha, pelo auxílio e instruções nos procedimentos.

Ao proprietário da planta, pela disponibilidade, auxílio na coleta de dados e informações prestadas.

Aos demais discentes e professores do programa, pelas contribuições e sugestões.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Fluxograma do processo de digestão anaeróbia .....	18
Figura 2 -	Representação de um sistema de produção/consumo de energia elétrica conectada à rede de distribuição de eletricidade.....	22
Figura 3 -	Fronteira do sistema de estudo e fluxos de material e energia que atravessam a fronteira.....	32
Figura 4 -	Atividades a serem realizadas em campo durante execução do trabalho .....	33
Figura 5 -	Localização da planta e propriedades vizinhas .....	34
Figura 6 -	Sistema de remoção de água do biogás .....	36
Figura 7 -	Determinação do volume por profundidade da lagoa de saída .....	39
Figura 8 -	Determinação do volume por profundidade do biodigestor B (tubular) .....	40
Figura 9 -	Caixa armazenadora de dejetos bovinos .....	41
Figura 10 -	Medidor de vazão do biogás .....	41
Figura 11 -	Controlador do painel de comando do grupo gerador .....	42
Figura 12 -	Estufa com recirculação de ar para remoção de água das amostras ..	44
Figura 13 -	Mufla utilizada para combustão da amostra seca .....	44
Figura 14 -	Monitor de gás portátil modelo Landtec GEM 5000 .....	45
Figura 15 -	Diagrama do sistema de produção e conversão do biogás em energia elétrica.....	46
Figura 16 -	Fluxos energéticos que atravessam a fronteira do sistema da planta de geração energia elétrica.....	48
Figura 17 -	Volume de alimentação do biodigestor .....	51
Figura 18 -	Amostras de substrato preparadas para análise de sólidos.....	54
Figura 19 -	Amostras de substratos em processo de secagem utilizando estufa com recirculação de ar .....	54
Figura 20 -	Cinzas das amostras após processo de secagem e combustão em mufla .....	54
Figura 21 -	Volume médio diário de biogás produzido pela planta no período monitorado .....	61
Figura 22 -	Produção de energia elétrica da planta durante o período de monitoramento .....	62
Figura 23 -	Fluxo energético da planta de produção de energia elétrica a biogás. ..	68

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tecnologias de purificação e limpeza do biogás .....	20
Quadro 2 - Indicadores de eficiência do processo de produção de biogás .....	25
Quadro 3 – Descrição dos biodigestores .....	35
Quadro 4- Equipamentos utilizados na produção de biogás e de energia elétrica da planta .....	37
Quadro 5 – Variáveis de controle do processo .....	38

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Potencial de produção de metano de dejetos bovinos e suínos .....	28
Tabela 2 - Parâmetros do processo biológico de digestão anaeróbia .....	52
Tabela 3 - Concentração de sólidos totais, sólidos voláteis e sólidos fixos dos substratos.....	55
Tabela 4 - Pesquisa bibliográfica para concentrações de Sólidos Totais e Voláteis de dejetos suíno .....	55
Tabela 5 - Composição do Biogás .....	57
Tabela 6 - Vazão de ar recomendada para a remoção de H <sub>2</sub> S do biogás no sistema de dessulfurização biológica .....	58
Tabela 7 - Redução de ST e SV desempenhado pelos biodigestores A e B.....	59
Tabela 8 - Teste -F para comparar variâncias de dois tratamentos diferentes.....	60
Tabela 9 - Teste t de comparação de médias de dois tratamentos diferentes .....	60
Tabela 10 - Valores obtidos para o volume de biogás produzido planta .....	61
Tabela 11 - Valores obtidos para a produção de energia elétrica da planta.....	62
Tabela 12 - Valores obtidos para eficiência do conjunto motor gerador.....	63
Tabela 13 - Consumo energético dos equipamentos em kWh.d <sup>-1</sup> .....	64
Tabela 14 - Estimativa diária da energia da contida na biomassa (E <sub>bm</sub> ) de alimentação dos biodigestores em kWh.d <sup>-1</sup> .....	66
Tabela 15 - Fluxos energéticos que atravessam o limite do sistema .....	67

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al/AP	Alcalinidade Intermediária / Alcalinidade Parcial
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
B0	Capacidade máxima de produção de metano
CHP	<i>Combined Heat and Power</i>
COV	Carga Orgânica Volumétrica
CSTR	<i>Continuous Stirred Tank Reactor</i>
DQO	Demanda Química de Oxigênio
GLP	Gás liquefeito de Petróleo
Pb	Produção de biogás
PBM	Potencial Bioquímico de Metano
PCI	Poder Calorífico Inferior
PdB	Produtividade de Biogás
PdM	Produtividade de Metano
PEAD	Polietileno de alta densidade
PEIO	<i>Primary Energy Input to Output</i>
SF	Sólidos Fixos
ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis
TRH	Tempo de Retenção Hidráulica

## LISTA DE SÍMBOLOS

CH <sub>4</sub>	Metano
CO <sub>2</sub>	Gás carbônico
cv	Cavalo-vapor
H <sub>2</sub> S	Sulfeto de hidrogênio ou gás sulfídrico
kg	Quilograma
kVA	Quilovolt Ampére
kW	Quilowatt
kWh	Quilowatt hora
m <sup>3</sup>	Metros cúbicos
MW	Megawatt
N <sub>2</sub>	Nitrogênio
NO	Óxido de Nitrogênio
NH <sub>3</sub>	Hidróxido de amônia
Nm <sup>3</sup>	Metros cúbicos normais
O <sub>2</sub>	Oxigênio
P	Fosforo
pH	Potencial hidrogeniônico
SO <sub>2</sub>	Dióxido de Enxofre
TKN	Nitrogênio Total Kjeldahl
TOC	Carbono Orgânico Total
°C	Celcius
m	Vazão mássica
ρ	Densidade
η	Eficiência

SIEBERT, Cristela Marta. Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Unioeste, Março de 2021. **Avaliação de desempenho de uma planta microgeradora de energia elétrica a partir do biogás.** Orientador: Prof. Samuel Nelson Melegari de Souza

## RESUMO

Observa-se, no Brasil, o crescimento anual do número de plantas microgeradoras de energia elétrica instaladas pelo país, principalmente depois da implantação da Resolução Normativa nº 482/2012, que regulamenta nacionalmente a geração e a distribuição. Dentre elas, estão as plantas rurais de geração de energia elétrica movidas a biogás. Essas plantas são compostas por biodigestor e grupo gerador para a produção e para a conversão do biogás em energia elétrica. Os custos de operação e o investimento na planta são altos, e a máxima eficiência do processo deve ser almejada para que o agricultor possa obter melhor retorno financeiro. Na região Oeste do Paraná existem diferentes configurações de plantas a biogás em operação, mas poucos são os dados na literatura sobre a eficiência desses sistemas. Com o objetivo de mensurar a eficiência de uma planta microgeradora de energia elétrica a biogás, foi realizado o balanço de energia de uma planta localizada no município de Toledo (PR). Assim, o intuito deste trabalho foi contribuir para a identificação dos melhores projetos para cada aplicação e localidade. A planta tem dois biodigestores, de baixa tecnologia para produção de biogás, um motor tipo Otto e gerador para conversão em energia elétrica. Os resultados apontam aproveitamento de 65% dos sólidos voláteis presentes no substrato pelos biodigestores, produzindo biogás com concentração de metano de 57% em média. O grupo gerador tem eficiência média de 23,8% na conversão do biogás em energia elétrica, operando a 70 kWh com injeção de energia elétrica na rede de distribuição de concessionária. Os equipamentos necessários para a operação do sistema consomem 19,46% da energia produzida, sendo a maior parte dessa energia utilizada no transporte dos substratos. O balanço energético da planta indica eficiência da planta de 27,24% no seu processo de produção.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

**PALAVRAS-CHAVE:** Balanço de energia; biodigestor; eficiência; microgeradora; produção de biogás.

SIEBERT, Cristela Marta. Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Unioeste, March 2021. **Performance evaluation of a micro electric power plant from biogas.** Advisor: Prof. Samuel Nelson Melegari de Souza

## ABSTRACT

There is an annual growth of the number of micro power plants installed in Brazil, especially after the implementation of the regulation 482/2012, that regulates the generation distributed in Brazil. Small farm plants producing electricity from biogas belong to this group and share part of this growth. These plants are composed of biodigester for the production of biogas and generator for conversion of biogas into electric energy. The operation cost and investment are high, and the maximum efficiency of the process should be desired for better financial return. In the western region of the State of Paraná, Brazil, there are different biogas plant sets, but few publications about their efficiency. With the aim of measure de efficiency of a micro power plant from biogas, it was realized the energy balance of a micro power plant located on the city of Toledo, Paraná. The goal of this paper was to contribute with the best sets recognition for each location and purpose. The plant analyzed has two biodigesters, low-tech for biogas production, and an Otto engine and generator for conversion into electricity. The results shows that the biodigesters consume 65% of the volatile solids present in the substrate producing biogas with a methane concentration of 57% on average. The generator engine set achieves 23,8% efficiency, operating at 70 kWh with electricity injection into the utility distribution network. The equipment needed for the operation of the system consumes 19,46% of the energy produced, most of which is used in the transport of substrates. The energy balance of the plant indicates a performance of 27,24% in energy use.

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001.

**KEYWORDS:** Energy balance; biodigester; efficiency; micro power planta; biogas production;

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1.	OBJETIVO GERAL	15
1.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>16</b>
2.1	ENERGIAS RENOVÁVEIS	16
2.2	BIOGÁS	16
2.3	DIGESTÃO ANAERÓBIA	17
2.3.1	Utilização do Biogás	19
2.4	SISTEMA DE LIMPEZA DO BIOGÁS	20
2.5	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	21
2.6	BIODIGESTORES	22
2.6.1	Biodigestor de lagoa coberta – tubular	23
2.6.2	Biodigestor CSTR	24
2.6.3	Variáveis de controle de biodigestores	24
2.6.3.1	Indicadores de eficiência do processo	25
2.6.3.2	Indicadores de estabilidade do processo	25
2.7	ENERGIA DA BIOMASSA	27
2.7.1	Caracterização química do substrato	27
2.7.2	Potencial bioquímico de metano	28
2.8	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	29
2.8.1	Balanço de massa	29
2.8.1.1	Balanço de massa de biodigestores	30
2.8.2	Medida de desempenho	31
2.8.3	Desempenho de plantas de geração de energia a partir do biogás	31
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>33</b>
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO	33
3.2	DESCRIÇÃO DA PLANTA EM ESTUDO	33
3.2.1	Descrição do Biodigestores	35
3.2.2	Sistema de limpeza do biogás	36
3.2.3	Descrição dos equipamentos	37
3.3	MONITORAMENTO DO PROCESSO	38
3.3.1	Mensuração da vazão de dejetos	39
3.3.2	Produção de biogás	41
3.3.3	Produção de energia elétrica	42
3.4	CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA	42
3.5	CARACTERIZAÇÃO DO BIOGÁS	45
3.6	DEFINIÇÃO DOS LIMITES DO SISTEMA	45
3.7	MÉTODO DE CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DO BIODIGESTOR	46
3.8	MÉTODO DE CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DO CONJUNTO MOTORGERADOR	47
3.9	MÉTODO DE CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DA PLANTA	48
3.10	COLETA DOS DADOS	50

<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>51</b>
4.1	PARÂMETROS DO PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	51
4.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA BIOMASSA.....	53
4.3	CARACTERIZAÇÃO DO BIOGÁS.....	56
4.4	EFICIÊNCIA DO BIODIGESTOR .....	58
4.5	PRODUÇÃO DE BIOGÁS .....	60
4.6	PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA .....	62
4.7	BALANÇO DE ENERGIA DO MOTOR.....	63
4.8	CONSUMO ENERGÉTICO DOS EQUIPAMENTOS.....	64
4.9	DESEMPENHO DA PLANTA .....	65
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>69</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>70</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de energia elétrica em todo o mundo vêm passando por uma transição, de matrizes energéticas de combustíveis fósseis para matrizes energéticas de baixo carbono (BRASIL, 2020). A matriz elétrica brasileira é predominantemente renovável; porém, altamente dependente de duas fontes, a hidráulica e gás natural, o que requer, portanto, a sua diversificação (FERREIRA *et al.*, 2018). Nesse contexto, o biogás se apresenta como uma alternativa aos combustíveis fósseis, pois pode ser utilizado como combustível veicular e como substituto ao gás natural (NSAIR *et al.*, 2019).

Essa transição energética para sistemas mais sustentáveis tem sido tema de pesquisas há alguns anos, não apenas pelo desenvolvimento de tecnologias para implantá-la, mas também para compreender o seu impacto no funcionamento da sociedade (GARCEZ, 2017).

No contexto social, é possível observar a mudança de comportamento do consumidor de energia elétrica, que tem evoluído de uma posição passiva para ativa no setor elétrico brasileiro, principalmente por meio da popularização das tecnologias de micro e minigeração distribuída. Fatores como a grande disponibilidade e qualidade de recursos energéticos nacionais, o alto valor de tarifa para consumidores e o modelo de compensação de créditos favorável, tornaram o investimento em geração própria bastante rentável no Brasil (BRASIL, 2017; BRASIL, 2020).

No meio agropecuário, a produção de biogás por meio da digestão anaeróbia dos resíduos desempenha um papel significativo na mitigação dos problemas ambientais e na redução das emissões de carbono. A valorização do biogás como atividade econômica, por meio da produção de energia elétrica, proporciona ainda o desenvolvimento local (FREITAS *et al.*, 2019; OLIVEIRA; NEGRO, 2019).

Durante o período de 2012 a 2016, a capacidade instalada de plantas de biogás cresceu internacionalmente, com a Alemanha liderando o desenvolvimento de tecnologias. No Brasil, a regulamentação do sistema de geração distribuída por meio da Resolução Normativa nº 482 de 2012 contribuiu para o crescimento do uso do biogás para produção de energia elétrica. Nesse período, ocorreu o desenvolvimento de instituições e programas, tanto de interesse privado quanto do governo, que contribuíram com a difusão de informações e a realização de projetos

de biogás para a agricultura (OLIVEIRA; NEGRO, 2019).

Houve também grande avanço tecnológico na produção de biogás, com diferentes modelos de biodigestores disponíveis em diferentes partes do mundo. No entanto, países em desenvolvimento costumam utilizar modelos mais simples, com menos tecnologia empregada, sem capacidade de aquecimento ou agitação (BOND; TEMPLETON, 2011). Esse é o caso do Brasil, que, devido ao clima tropical e às características locais, permite realizar o processo de digestão anaeróbia em biodigestores de baixa tecnologia (FREITAS *et al.*, 2019).

Por mais que os modelos aplicados no Brasil sejam considerados de baixa tecnologia, o investimento em uma planta a biogás ainda é muito elevado, se comparado à renda do produtor rural. Por exemplo, o retorno de investimento para uma planta a biogás na suinocultura no Brasil foi estimado por Ricardo *et al.* (2018) em sete anos para a recuperação do capital investido.

Além disso, os custos de produção e de transporte da biomassa normalmente compõem a maior parte dos gastos na produção de biogás, e esses variam em função do tamanho da planta e da disponibilidade da biomassa na região, por exemplo. Na Europa, é comum utilizar silagem de milho como substrato no biodigestor, e a produção e o transporte da silagem chegam a 50% dos custos totais de produção de biogás (STÜRMER *et al.*, 2021; WALLA; SCHNEEBERGER, 2008).

No Brasil, normalmente se utilizam rejeitos agropecuários na alimentação dos biodigestores, oriundos das atividades econômicas da propriedade; em alguns casos, existe o transporte de resíduos entre propriedades vizinhas. A mecanização ideal do sistema é crucial para a produção competitiva de biogás, pois a produção de biogás deve ser tratada como um negócio, buscando eficiência e o retorno financeiro da atividade (STÜRMER; SCHMID; EDER, 2011).

Para aumentar a produção das plantas de biogás, é necessário melhorar a eficiência do processo e reduzir os custos (NSAIR *et al.*, 2019), e o monitoramento e a avaliação do processo permitem identificar problemas e melhorar a eficiência de uma planta.

Muitas contribuições do meio acadêmico para o controle de processos de digestão anaeróbica têm sido publicadas, propondo-se diferentes metodologias (GAIDA; WOLF; BONGARDS, 2017). A performance energética de plantas de biogás pode ser estimada por meio da aplicação de fronteiras do sistema, que pode receber diferentes abordagens, entre elas, o cálculo do balanço energético a partir

da identificação dos fluxos de energia que atravessam a fronteira da planta. Esse balanço de energia consiste em contabilizar a energia disponível e a energia consumida em determinado sistema, de forma a mensurar a sua eficiência (NISHIMURA, 2009; HAVUKAINEN et al., 2014).

Os equipamentos envolvidos na produção, na purificação e no consumo do biogás têm seus consumos energéticos contabilizados no balanço de energia, portanto, impactam a eficiência de uma planta, e esse impacto pode ser positivo ou negativo.

Na região Oeste do Paraná existem diferentes configurações de plantas em funcionamento, mas existem poucos dados na literatura sobre a eficiência desses sistemas. A realização de um trabalho de avaliação de eficiência das plantas na região pode auxiliar a identificar os melhores projetos para cada aplicação e localidade.

Dessa forma, propõe-se, neste trabalho, realizar o balanço energético de uma planta microgeradora de energia elétrica a partir de biogás, como parte de estudo que visa a identificar os sistemas mais eficientes e mais adequados a situação socioeconômica local.

### 1.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho de uma planta rural de geração de energia elétrica a biogás, instalada na região Oeste do Paraná, por meio do balanço energético da planta.

### 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar os fluxos energéticos e estabelecer as fronteiras do sistema;
- Realizar o balanço de massa do biodigestor;
- Monitorar a produção e o consumo das diferentes formas de energia;
- Realizar o balanço de energia da planta.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 ENERGIAS RENOVÁVEIS

Energia renovável é, por definição, uma fonte de energia sustentável e limpa. Seu uso contribui com a redução de uso de combustíveis fósseis, que tendem a se esgotar, e a redução de impactos ambientais, que resultam do uso indiscriminado de recursos não renováveis (FREITAS *et al.*, 2019).

No Brasil, existe uma tendência crescente de eletrificação da matriz energética nacional, observada pelo incremento médio anual de 3,8% da fonte elétrica. Os derivados de petróleo mantêm-se como a principal fonte de energia final, com um crescimento médio de 2,0% a.a. no decênio. Entretanto, observa-se uma redução de sua participação na matriz de consumo final, que se deve, em parte, pela substituição de parcela de óleo diesel por biodiesel e parte da gasolina por etanol (BRASIL, 2020).

Fontes de energia como solar, eólica, biomassa e biogás são exemplos de energias renováveis que têm sido desenvolvida e disseminadas na substituição da matriz fóssil e na diversificação da matriz energética. O biogás, além do seu potencial em contribuir significativamente com a geração de energia elétrica no Brasil, tem efeitos positivos, como a prevenção de poluição e a criação de fonte de renda em empregos na área rural (BORSCHIVER; SILVA, 2014; FREITAS *et al.*, 2019)

### 2.2 BIOGÁS

O biogás é um combustível gasoso, composto principalmente por metano (CH<sub>4</sub>) e gás carbônico (CO<sub>2</sub>), e gerado por uma reação bioquímica, na qual matéria orgânica é degradada por microrganismos na ausência de oxigênio, pelo processo conhecido como digestão anaeróbia. (COELHO *et al.*, 2018; OLIVEIRA, NEGRO, 2019).

A biomassa utilizada no processo consiste em qualquer recurso renovável derivado de material orgânico de origem animal ou vegetal, existente na natureza ou gerado pelo homem e/ou animais, como resíduos de atividades agrícolas e industriais e também resíduos urbanos (FERREIRA *et al.*, 2018).

A digestão anaeróbica é altamente dependente das características da matéria-prima, bem como da atividade dos microrganismos envolvidos nas diferentes fases da degradação da matéria, de forma que a composição do gás resultante desse processo é variável (BATSTONE *et al.*, 2002).

A literatura costuma apresentar, de forma geral, a seguinte composição para o biogás: entre 50% a 60% de metano (CH<sub>4</sub>); de 40% a 50% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>); e até 5% de outros gases, como nitrogênio, amônia, gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S, monóxido de carbono e oxigênio, entre outros (COELHO *et al.*, 2018; HAKAWATI *et al.*, 2017).

O metano é o componente em maior concentração no biogás e é altamente inflamável, o que permite seu uso para fins energéticos. Além disso, é uma fonte renovável de energia e seu uso contribui para a diminuição de emissões de gases de efeito estufa ( SORDI *et al.*, 2006; COIMBRA-ARAÚJO *et al.*, 2014).

### 2.3 DIGESTÃO ANAERÓBIA

A digestão anaeróbia é o processo de decomposição da matéria orgânica presente no substrato na ausência de oxigênio, que depende da atividade conjunta de uma associação de microrganismos (COELHO *et al.*, 2018; KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019).

O processo ocorre em quatro fases representadas na Figura 1, e são descritas por Coelho *et al.* (2018) a seguir:

- Hidrólise, em que as bactérias hidrolíticas liberam enzimas que decompõem compostos orgânicos complexos como carboidratos, proteínas e lipídios, em compostos dissolvidos como aminoácidos, açúcares e ácidos graxos, de modo a serem processados pelas células;
- Acidogênese, em que as bactérias fermentativas acidogênicas fazem com que os compostos intermediários formados a partir da hidrólise sejam decompostos em ácidos graxos voláteis (ácidos acético, propiônico e butírico) e outros compostos como ácido láctico e álcoois;
- Acetogênese, responsável pela oxidação dos produtos gerados na fase anterior, em que os microorganismos realizam a degradação dos

ácidos graxos e álcoois dando origem ao ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono;

- Metanogênica, em que as bactérias convertem os compostos orgânicos formados na fase anterior (ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono) em metano, principal constituinte do biogás.

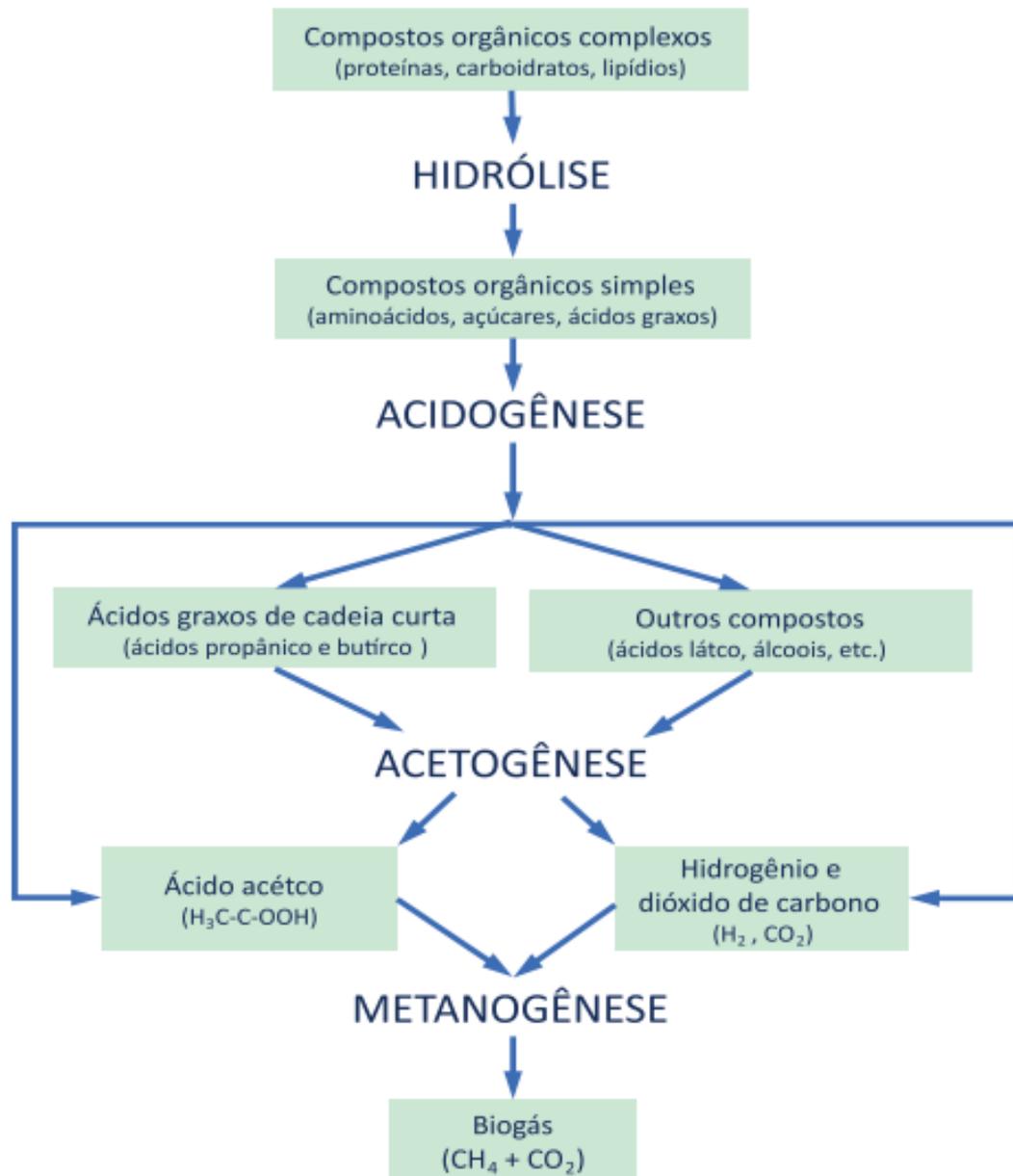


Figura 1 - Fluxograma do processo de digestão anaeróbia  
Fonte: Coelho *et al.* (2018).

### 2.3.1 Utilização do Biogás

O biogás pode ser utilizado na produção de energia térmica, de energia elétrica, na substituição de combustíveis fósseis convencionais em veículos e também na injeção em redes de distribuição de gás natural (COELHO *et al.*, 2018).

A energia térmica obtida pela queima direta do biogás tem aplicações como o aquecimento doméstico ou industrial, o aquecimento de estábulos, a aplicação no uso de secador de grãos, em fogões e até mesmo em sistemas de refrigeração (COIMBRA-ARAÚJO *et al.*, 2014).

A conversão do biogás em energia elétrica pode obtida por meio de diversos equipamentos. As microturbinas a gás e os motores de combustão interna de ciclo Otto são as tecnologias mais utilizadas para esse tipo de conversão energética, porém, a utilização de microturbinas ainda apresenta custos elevados e o seu tempo de vida útil operando com biogás ainda é baixo (COELHO *et al.*, 2018).

Em motores de combustão, boa parte de energia é dissipada em forma de calor, e essa energia normalmente não é aproveitada. Pensando na melhor eficiência energética de um determinado sistema, o conceito de cogeração tem recebido muita atenção devido à sua capacidade de produzir duas formas de energia com perdas mínimas (HAKAWATI *et al.*, 2017). Surge, assim, o conceito de planta *Combined Heat and Power* (CHP), que consiste na geração simultânea de eletricidade e energia térmica de uma única fonte de combustível. O sistema requer menor quantidade de combustível, promove alta rentabilidade e alta eficiência de conversão, normalmente acima de 75% e podendo chegar a 90% (YIN *et al.*, 2019).

Recentemente, o uso do biogás como combustível em veículos, bem como substituição ao gás natural em rede de gás, tornou-se possível com a conversão do biogás em biometano. Essa conversão se dá por meio do processo de purificação do biogás, no qual são retirados, principalmente, umidade, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, siloxanos e outros contaminantes (COELHO *et al.*, 2018; RAVINA *et al.*, 2019).

Ao final do processo, o biometano apresenta concentração de CH<sub>4</sub> entre 90 a 95%, contra 55 a 65% do biogás. Apresenta características físico-químicas semelhantes às do gás natural, tornando possível seu uso em veículos e injeção nas redes de gás (COELHO *et al.*, 2018).

É notável o grande avanço que ocorreu no desenvolvimento de tecnologias relacionadas ao biogás, que abrangem desde o tratamento da biomassa até a

logística e o uso de biogás (OLIVEIRA; NEGRO, 2019). Percebe-se o reflexo de tal avanço no uso do biogás, principalmente na geração de energia elétrica, de forma que esse passou a receber apoio econômico e financeiro em determinados países, como subsídios, tarifas de alimentação e investimento nas instalações, que incentivam o seu uso e popularização (RAVINA *et al.*, 2019).

## 2.4 SISTEMA DE LIMPEZA DO BIOGÁS

A limpeza do biogás consiste na remoção de substâncias não combustíveis, como sulfeto de hidrogênio, siloxanos, água, oxigênio, nitrogênio e partículas em suspensão. A presença de impurezas causa problemas de corrosão e de desgaste mecânico nos equipamentos. Além disso, a água e o dióxido de carbono prejudicam o processo de queima, tornando-o menos eficiente (BORSCHIVER; SILVA, 2014; COELHO *et al.*, 2006). Outro agravante é a emissão de gases poluentes gerados na queima do biogás, como óxido de Nitrogênio (NO) e dióxido de Enxofre (SO<sub>2</sub>), sendo este diretamente relacionado à quantidade de H<sub>2</sub>S presente no biogás (SOUZA, *et al.*, 2016).

O Quadro 1 apresenta as técnicas de limpeza tradicionalmente utilizadas para eliminação de elementos como o H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>.

Quadro 1 - Tecnologias de purificação e limpeza do biogás

<b>Impureza</b>	<b>Tecnologia de limpeza</b>
Sulfeto de Hidrogênio (H <sub>2</sub> S)	Precipitação, absorção química, adsorção em carvão ativado, tratamento biológico.
Siloxanos	Resfriamento, absorção em mistura líquida de hidrocarbonetos, adsorção em carvão ativado, alumínio e sílica gel, cosseparação com sulfeto de hidrogênio.
Água	Resfriamento, compressão, absorção e Adsorção.
Oxigênio e Nitrogênio	Adsorção em carvão, peneira molecular ou membranas.
Amônia (NH <sub>3</sub> )	Eliminado enquanto o gás é seco ou está em processo de ajuste de poder calorífico
Particulados	Filtro Mecânico

Fonte: Borschiver e Silva (2014).

O impacto desses contaminantes em motores de combustão é sua rápida degradação, causado pela presença de água, dióxido enxofre e principalmente o gás sulfídrico, causando corrosão em diversas partes do motor, desgaste de partes móveis e possíveis contaminação de óleo lubrificante (BERTINATTO, 2014).

A amônia ( $\text{NH}_3$ ) é outro componente corrosivo do biogás, e reage com o  $\text{H}_2\text{O}$ , formando  $\text{NH}_4\text{OH}$  (Hidróxido de amônio), o qual apresenta potencial corrosivo aos componentes que contêm alumínio e cobre. Dessa forma, bronzinas e buchas que, usualmente, são produzidas com esses metais são suscetíveis à corrosão (SANTOS, 2016).

Dentre os métodos existentes para remoção de  $\text{H}_2\text{S}$  do biogás, a dessulfurização biológica é um método de remoção parcial de compostos de enxofre que se baseia na injeção de ar no digestor para a degradação do  $\text{H}_2\text{S}$ , na razão de 8 a 12% do fluxo de gás. Pode atingir rendimentos de 80 a 99%, no entanto, se a concentração de entrada de  $\text{H}_2\text{S}$  for muito elevada, pode não atingir os valores recomendados pelos fabricantes de motores a gás, que são da ordem de 100 a 500 ppm de  $\text{H}_2\text{S}$  no biogás (COELHO *et al.*, 2018).

Os siloxanos são contaminantes tipicamente presentes no biogás de tratamento de esgoto. Trata-se de um composto de sílica proveniente de produtos de higiene pessoal e cosméticos. Quando presente no biogás injetado em motores ou microturbinas, finas partículas de sílica se formam na câmara de combustão, e são carregadas pelos gases por meio dos componentes do equipamento em velocidades elevadas. Com o passar do tempo, essas partículas abrasivas causam erosão em algumas das superfícies metálicas com que entraram em contato (COELHO *et al.*, 2006).

## 2.5 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou, em abril de 2012, a Resolução Normativa nº 482/2012, que regulamenta uma nova classe de geradores/consumidores: micro e minigeração distribuída.

Segundo a ANEEL (2016), a geração distribuída consiste na produção de energia elétrica de pequenas centrais geradoras conectadas à rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras. Divide-se em duas categorias: micro e minigeração. A microgeração distribuída tem potência instalada menor ou

igual a 75 quilowatts (kW), e a minigeração distribuída tem potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5 megawatt (MW). Caracterizam-se ainda pela utilização de fontes renováveis, como hidráulica, solar, eólica e biomassa.

A difusão e a implantação das plantas mini e microgeradoras no sistema de geração distribuída têm contribuído para o aumento da produção de energia elétrica a partir do biogás no país ( GARCEZ, 2015; FERREIRA *et al.*, 2018; FREITAS *et al.*, 2019).

Outra importante modalidade regulamentada pela Resolução Normativa nº 482/2012 é o sistema de compensação de energia elétrica. Esse sistema permite que a energia excedente gerada pela unidade consumidora com micro ou minigeração seja injetada na rede da distribuidora.

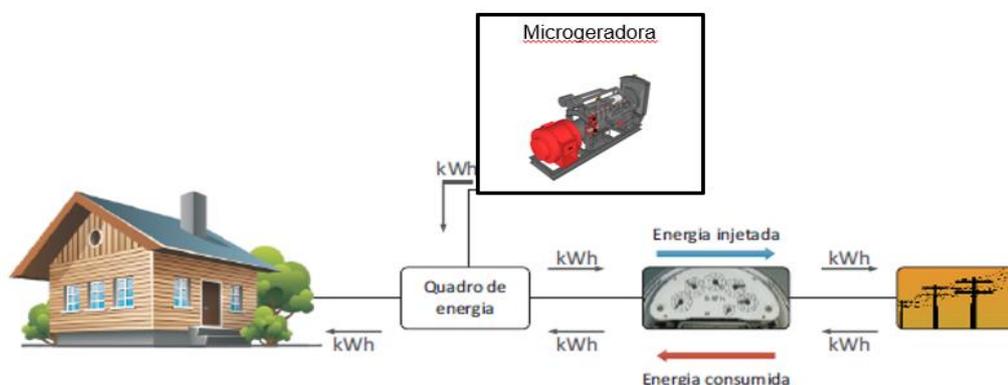


Figura 2 - Representação de um sistema de produção/consumo de energia elétrica conectada à rede de distribuição de eletricidade

Fonte: Adaptada de ANNEL (2016).

A Figura 2 representa um sistema de geração de eletricidade no modo geração distribuída. A energia elétrica gerada é enviada à rede de distribuição da concessionária. Um sistema de medição bilateral contabiliza o consumo e a geração de energia elétrica da unidade. A energia elétrica excedente é cedida à distribuidora local, sendo posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica dessa mesma unidade consumidora ou de outra de mesma titularidade.

## 2.6 BIODIGESTORES

Define-se um biodigestor, independente do modelo ou da tecnologia empregada, como um local fechado, em que a degradação de matéria orgânica que

ocorre naturalmente no meio ambiente pode ser reproduzida. O processo de digestão anaeróbia no reator requer um determinado tempo de retenção, que depende do tipo de matéria orgânica, da temperatura e condições físicas do reator, como disponibilidade de agitação ou não (FREITAS *et al.*, 2019).

Existe uma gama de variáveis que influencia na produção de Biogás e novas tecnologias surgem para melhorar a eficiência dos processos. A produção de Biogás passou por extensas pesquisas, resultando em uma infinidade de trabalhos que tratam de temas como a melhoria da produção de biogás e diferentes configurações de processos (HAVUKAINEN *et al.*, 2014).

Por exemplo, a codigestão, que consiste na digestão simultânea de misturas de duas ou mais matérias primas, pode melhorar o desempenho do processo de digestão anaeróbia por meio de uma oferta balanceada de nutrientes. Apresenta também o benefício de utilizar os resíduos disponíveis em uma determinada área, estendendo os benefícios ambientais do tratamento de resíduos para a região (HORVÁTH *et al.*, 2016).

Alguns exemplos de utilização de codigestão, inclusive com transporte de diferentes substratos em uma determinada área, já podem ser encontrados na região Oeste do Paraná. É o caso de plantas de pequenas propriedades rurais, onde os dejetos de suínos, bovinos e resíduos de laticínios são misturados para a produção de biogás.

Existem diferentes modelos de biodigestores, mantendo quase o mesmo princípio de funcionamento, sendo os sistemas mais difundidos a lagoa coberta e mistura completa (SILVA; TREVISAN, 2019).

#### 2.6.1 Biodigestor de lagoa coberta – tubular

Popularmente conhecido como modelo canadense, tubular ou biodigestor de lona, o biodigestor de lagoa coberta é um tanque escavado no solo, impermeabilizado e coberto por uma membrana flexível capaz de acumular gás. Sua geometria é de base retangular de seção trapezoidal. Geralmente, tem uma relação largura/comprimento igual ou superior a 1:5 (FEIDEN *et al.*, 2004). Essa característica dimensional, aliada ao regime de alimentação semicontínuo, gera configurações de fluxo que variam entre laminar e pistonado. É considerado de baixo nível tecnológico, com facilidade de construção e de operação (KUNZ;

STEINMETZ; AMARAL, 2019).

Esse tipo de biodigestor passou por alterações para melhor atender às necessidades de cada localidade, como a implantação de sistemas de agitação. Na região Oeste do Paraná, o biodigestor tubular tipo Reichl, desenvolvido por Johann Reichl, utiliza um sistema de agitação cinético para uniformizar a massa líquida que se encontra mais aquecida na superfície, evitando a formação de crosta na superfície e uniformizando a temperatura (FEIDEN *et al.*, 2004).

### 2.6.2 Biodigestor CSTR

O Biodigestor *Continuous Stirred Tank Reactor* (CSTR), em português, Reator com Tanque Agitado Continuamente, é um modelo caracterizado pelo seu sistema de agitação, que permite a homogeneização do seu conteúdo. É a configuração mais utilizada em plantas de biogás, principalmente quando existe a codigestão, e representam cerca de 90% dos reatores implantados na Europa (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019).

No Brasil, também são conhecidos como biodigestores de mistura completa. De geometria circular, são construídos abaixo do solo, revestidos em alvenaria ou em Polietileno de Alta Densidade (PEAD). Têm agitação contínua ou intermitente, por mecanismos pneumáticos ou mecânicos (PELLIZZER, 2017).

A mistura da matéria melhora a performance da digestão anaeróbia, criando uma distribuição mais homogênea não só dos substratos solúveis, mas também do pH e da temperatura (TOBO *et al.*, 2020).

### 2.6.3 Variáveis de controle de biodigestores

O processo de digestão anaeróbia envolve diferentes tipos de microrganismos, que podem ser afetadas por diferentes fatores operacionais. Condições específicas devem ser respeitadas e seguidas para possibilitar o correto funcionamento dos biodigestores (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019).

Para Gaida, Wolf e Bongards (2017), os parâmetros de controle devem estar alinhados com os objetivos da planta de digestão anaeróbia. Por exemplo, em plantas de biogás na agricultura, o objetivo é a produção de energia. Já em plantas de tratamento de água, o objetivo é a redução de poluentes. Os parâmetros de

controle existentes são capazes de atender a um ou dois dos principais critérios:

- Maximização da produção de metano: critério econômico;
- Minimização da demanda química de oxigênio (DQO): critério ambiental;
- Controle de estabilidade do processo.

### 2.6.3.1 Indicadores de eficiência do processo.

A eficiência de um biodigestor pode ser mensurada em função da produção de biogás, da produtividade de metano, do consumo dos nutrientes disponíveis na biomassa, entre outros. Estão representados no Quadro 2 os indicadores de critério econômico, ou seja, parâmetros que auxiliam na análise financeira.

Quadro 2 - Indicadores de eficiência do processo de produção de biogás

Produção de biogás (Pb)	L/dia ou m <sup>3</sup> /d
Composição do biogás	%CH <sub>4</sub> , % CO <sub>2</sub>
Produtividade de Biogás (PdB)	$\frac{m_{Biogás}^3}{m_{reator}^3 * d}$
Produtividade de Metano (PdM)	$\frac{m_{CH4}^3}{m_{reator}^3 * d}$

Fonte: Adaptado de Kunz, Steinmetz, Amaral (2019).

### 2.6.3.2 Indicadores de estabilidade do processo

As características do substrato, do modelo e das condições de operação do biodigestor, podem provocar um desequilíbrio no biodigestor, pois interferem em fatores como pH, alcalinidade e ácidos voláteis, os quais definem as condições de estabilidade da digestão anaeróbia.

A maioria dos problemas na digestão anaeróbia pode ser atribuída ao acúmulo de ácidos voláteis e, conseqüentemente, à queda do pH. As arqueas metanogênicas, responsáveis pela conversão do carbono contido na biomassa em metano e dióxido de carbono, são extremamente sensíveis ao pH (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019).

Para a devida manutenção de um ambiente favorável para os microrganismos, alguns parâmetros devem ser monitorados:

- pH: A produção de ácidos e a composição de sua mistura têm grande influência no desempenho do processo. O pH está diretamente relacionado às concentrações de ácidos orgânicos voláteis no meio, resultando do equilíbrio entre populações de microrganismos e a alcalinidade total do sistema. A maioria dos microrganismos acidogênicos não sobrevive em ambientes extremamente ácidos ou alcalinos (SOARES; FEIDEN; TAVARES, 2017; DEBIASI *et al.*, 2018). Cada grupo de microrganismo tem um valor diferente de pH ótimo, e, para as arqueas metanogênicas, o valor ótimo é entre 6,7 e 7,5. Em condições acima ou abaixo dessa faixa, a produção de metano decresce, tendendo a cessar (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019);
- Al/AP: A alcalinidade de um sistema representa a capacidade de neutralizar ácidos. Alcalinidade elevada indica alta concentração de radicais alcalinos e, em função disso, tem elevado poder tamponante (DEBIASI *et al.*, 2018). O parâmetro monitorado, nesse caso, é a relação entre o acúmulo de ácidos orgânicos voláteis e a alcalinidade, conhecida pela relação Al/AP. Valores entre 0,3 a 0,4 são considerados ótimos; acima de 0,4 indica reator em sobrecarga; abaixo de 0,03 indica subcarga (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019);
- Tempo de retenção Hidráulica – TRH: é o tempo médio em que o substrato permanece no interior do biodigestor. Idealmente, é o tempo necessário para que o substrato seja totalmente digerido. Depende do tipo de biomassa, do tipo de biodigestor, temperatura, entre outros;
- Carga orgânica volumétrica – COV: relaciona a quantidade de substrato e a concentração de sólidos voláteis presentes no substrato, adicionados ao biodigestor em um determinado intervalo de tempo. Baixas COVs podem representar baixa relação alimento/microrganismo, resultando em baixa atividade biológica. Elevadas COVs podem apresentar elevada relação alimento/microrganismo, podendo levar ao acúmulo de ácidos orgânicos voláteis e falência do processo (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019). A COV tem influência direta sobre o pH, pois uma sobrecarga ocasiona a redução do pH, levando à acidificação do substrato (LINS, 2017).

## 2.7 ENERGIA DA BIOMASSA

Os meios de utilização da biomassa para produção de eletricidade consistem em métodos de transformação química ou física da matéria. Cada substrato tem características físico-químicas que dão origem à matéria orgânica, conferindo-lhe certa particularidade (BARRETO; RENDEIRO; NOGUEIRA, 2008).

Determinar a energia contida na biomassa não é simples, pois muitos fatores influenciam o processo. O processo de digestão anaeróbia depende da atividade de microrganismos que são influenciados pela quantidade de nutrientes disponíveis na matéria, pela temperatura e manejo adotado (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019).

Entre as diferentes abordagens encontradas na literatura para mensurar essa energia está a proposta de Kunz e Oliveira (2006 *apud* MITO *et al.*, 2018) por meio da Equação 1. A expressão estabelece uma relação direta entre a capacidade máxima de produção de metano e sólidos voláteis (B0 e SV) com o volume de dejetos produzidos diariamente, considerando apenas as características do substrato.

$$PrM = B0 * SV * Q \quad (1)$$

Em que:

PrM = produção diária de metano ( $m^3_{CH_4} \cdot dia^{-1}$ );

B0 = capacidade máxima teórica de produção de metano pelo dejetos ( $m^3_{CH_4} \cdot kg_{sv}^{-1}$ );

SV = concentração de sólidos voláteis ( $g_{sv} \cdot L^{-1}$  ou  $kg_{sv} \cdot m^{-3}$ );

Q = volume total de dejetos produzidos ao dia ( $m^3 \cdot dia^{-1}$ ).

### 2.7.1 Caracterização química do substrato

A caracterização química dos efluentes e afluentes é o método mais utilizado para avaliar o processo de digestão anaeróbia, por meio da análise de parâmetros, tais como Sólidos Totais (ST), Sólidos Voláteis (SV), Nitrogênio Total Kjeldahl (TKN), Carbono Orgânico Total (TOC), Fosforo (P), entre outros (SCHIEVANO *et al.*, 2008).

Sólidos Totais (ST) referem-se a toda a matéria presente no dejetos quando é retirada a água. São divididos em sólidos voláteis (SV), que compreendem o material carbonáceo, capaz de ser digerido ou consumido em combustão, e sólidos fixos (SF), que são os resíduos e representam a matéria inorgânica e mineral.

Quanto maior for a fração volátil presente no substrato, maior será o seu potencial de geração de metano.

### 2.7.2 Potencial bioquímico de metano

O Potencial Bioquímico de Metano (PBM) é definido como o volume máximo de CH<sub>4</sub> produzido por sólidos voláteis, e pode ser utilizado para avaliar o potencial de produção de biogás de um determinado substrato (IPCC, 2006).

O PBM considera tanto as características quantitativas do substrato (ST e SV) como as características qualitativas (natureza das moléculas orgânicas contidas) (SCHIEVANO *et al.*, 2008; SCHIEVANO *et al.*, 2011a). O método para medir o PBM de um resíduo consiste basicamente em incubar uma pequena quantidade de resíduos com um inóculo anaeróbico e medir a geração de metano, por meio de medições do volume e composição de gás produzido (HANSEN *et al.*, 2004). Esses testes são demorados, em torno de 60 a 90 dias para serem realizados.

A capacidade máxima de produção de metano (B0) de um determinado substrato varia conforme a espécie do animal e a sua alimentação. Além disso, Matinc *et al.* (2017) observaram que a codigestão potencializa a produção do biogás e a concentração de metano, no tocante à digestão isolada dos substratos.

É aconselhável, portanto, buscar dados obtidos nas publicações locais (IPCC, 2006). Assim, a Tabela 1 apresenta valores obtidos por meio de pesquisas realizadas no Brasil.

Tabela 1 - Potencial de produção de metano de dejetos bovinos e suínos

Material	B0 (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / kgsv)	Fonte
Esterco de bovino leiteiro	0,204	(KAFLE; CHEN, 2016)
Esterco suíno	0,323	
Esterco de bovino leiteiro	0,13	(IPCC, 2006)
Esterco suíno	0,29	
Esterco suíno Gestação	0,170	(AMARAL, 2017)
Esterco Suíno Creche	0,642	

Esterco Suíno Engorda	0,303	
Esterco de bovino leiteiro	0,395	
Esterco suíno	0,346	(MATINC <i>et al.</i> , 2017)
70%suíno 30%Bovino	0,408	
Esterco de bovino Corte	0,237	(ORRICO JÚNIOR <i>et al.</i> , 2001)
Esterco suíno	0,427	

Fonte: A autora.

## 2.8 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

O método comumente utilizado e reportado na literatura para estimar a performance energética de um determinado sistema se dá por meio do cálculo do balanço energético, que consiste em contabilizar a energia produzida e consumida em um determinado sistema, de forma a mensurar sua eficiência ( NISHIMURA, 2009; HAVUKAINEN *et al.*, 2014).

Já para o processo de digestão anaeróbica, a eficiência dos processos de digestão anaeróbica normalmente é mensurada através da análise da degradação da matéria orgânica e a razão entre os sólidos voláteis de entrada e saída, utilizados como indicadores de rendimento do processo (SCHIEVANO *et al.* 2011a).

No caso dos biodigestores, a demanda energética varia significativamente entre diferentes digestores anaeróbicos, e, ao realizar o balanço de energia em um sistema de biogás, pesquisadores encontram dificuldades em encontrar bases de comparação devido à variedade de abordagens e fronteiras do sistema (NISHIMURA, 2009; PÖSCHL; WARD; OWENDE, 2010; HAVUKAINEN *et al.*, 2014).

### 2.8.1 Balanço de massa

Os processos dentro de um determinado sistema são descritos por leis de equilíbrio, ou seja, equações que explicam todas as mudanças dentro do sistema, bem como o transporte através o limite do sistema. A lei de equilíbrio mais simples conhecida é a lei de conservação da massa (STRUCHTRUP, 2014).

A primeira lei da termodinâmica, a lei de conservação de energia, afirma que a energia não pode ser criada ou destruída, possibilitando apenas a conversão entre as diferentes formas de energia. Da mesma forma, a lei de conservação da massa

afirma que ela não pode ser criada ou destruída, apenas transferida para dentro ou para fora dos limites de um sistema.

O balanço de massa consiste então em contabilizar a quantidade de massa que passa por um determinado processo, com as fronteiras devidamente delimitadas, em que ocorrem reações químicas que alteram a composição do material, mas não a sua massa (STRUCHTRUP, 2014).

Em um sistema fechado, não há transferência de massa sobre os limites, conseqüentemente, a massa em um sistema fechado é constante. Em um sistema aberto, ela pode entrar ou sair pela fronteira, alterando a sua quantidade dentro do sistema.

Ainda, em um sistema fechado, a quantidade total de massa não altera no tempo. Em um sistema aberto, no qual a massa entra e sai por meio dos limites, a alteração da sua quantidade no tempo é causada pelo fluxo de entrada e fluxo de saída. Ou seja, a taxa de variação da massa no tempo ocorre devido à diferença líquida do fluxo de entrada e de saída do sistema, conforme a seguinte equação:

$$\frac{dm}{dt} = \sum_{in} \dot{m}_e - \sum_{out} \dot{m}_s \quad (2)$$

Em que:

$\frac{dm}{dt}$  = taxa de variação de massa no tempo ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ );

$\dot{m}_e$  = vazão mássica de entrada ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ );

$\dot{m}_s$  = vazão mássica de saída ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

### 2.8.1.1 *Balanço de massa de biodigestores*

O desempenho do processo de digestão anaeróbica é obtido pelo balanço de massa do biodigestor. A diferença entre os fluxos de entrada e saída são resultado das reações bioquímicas da digestão anaeróbica que acontecem dentro do biodigestor (SCHIEVANO *et al.*, 2011b). A redução de sólidos obtida no balanço de massa permite a avaliação do processo de degradação, sendo comum encontrar na literatura avaliações de desempenho em função da redução de sólidos.

### 2.8.2 Medida de desempenho

O desempenho de um processo pode ser expresso como relações de taxa, de forma a quantificar a eficiência. Para um processo de conversão de energia, relaciona-se energia produzida e a energia fornecida, ou seja, saída e entrada do sistema (STRUCHTRUP, 2014). Usa-se, para tanto, a seguinte equação:

$$\eta = \frac{\sum E_{saída}}{\sum E_{entrada}} \leq 1 \quad (3)$$

Em que:

$\eta$  = eficiência (%);

$E_{saída}$  = energia produzida pelo sistema (kWh);

$E_{entrada}$  = energia consumida pelo sistema (kWh).

### 2.8.3 Desempenho de plantas de geração de energia a partir do biogás

Existem diferentes abordagens para estimar a performance energética de plantas de biogás por meio da aplicação de fronteiras do sistema. Análises de balanço energético no ciclo de vida dos sistemas a biogás muitas vezes carecem de bases para comparação, devido a diferentes limites dos sistemas estabelecidos. Além disso, o consumo de energia dos equipamentos varia conforme o arranjo da planta (BERGLUND; BORJESSON, 2006; HAVUKAINEN *et al.*, 2014; MACHTIG; MOSCHNER; HARTUNG, 2019).

Segundo Berglund e Borjesson (2006), diferenças nas suposições feitas sobre o método de alocação, sobre o projeto e tamanho da planta e sobre os limites do sistema escolhidos demonstram afetar significativamente a produção líquida de energia.

De acordo com Pöschl, Ward e Owende (2010), muitos estudos sobre balanço energético têm focado em matérias-primas específicas, em sistemas específicos de biogás, em diferentes estratégias de gestão de resíduos e em opções específicas de utilização para biogás, mas poucos abordam todo o ciclo de vida.

A Figura 3 mostra o limite do estudo utilizado por Pöschl, Ward e Owende (2010), baseado em dados de literatura relevantes para as condições na Alemanha.

O sistema abrange recursos como matéria-prima, colheita e transporte, operação de usinas de biogás, tecnologias de conversão biogás em diferentes formas de energia, e o manuseio de digestão.

O balanço de energia foi avaliado pela razão entre energia primária de entrada e saída (*Primary Energy Input to Output - PEIO*), para determinar a eficiência e a sustentabilidade dos processos. A energia primária de entrada consiste no cultivo, no tratamento, na coleta e no transporte da biomassa, nas operações da planta de biogás e na utilização e no processamento do biogás. A energia de saída foi avaliada como a soma do potencial de conversão de energia de cada matéria prima. Os resultados indicaram taxas correspondentes de 10,5 a 64,0% para monodigestão e 34,1 a 55,0% para codigestão. Quanto menor o valor de PEIO, maior a eficiência do sistema.

No Brasil, Piñas *et al.* (2018) estimaram o desempenho de diferentes plantas e em diferentes cenários (monodigestão e codigestão). A análise consistiu em realizar o balanço de massa e de energia, bem como o dimensionamento dos principais processos da planta. O cálculo da demanda energética e perda de calor foi realizado, e, a partir dos dados, traçou-se uma curva logarítmica, que prevê eficiência, no intervalo de 37,79 a 41,56% na conversão de energia elétrica, e eficiência térmica no intervalo de 46,04 a 41,42 %.

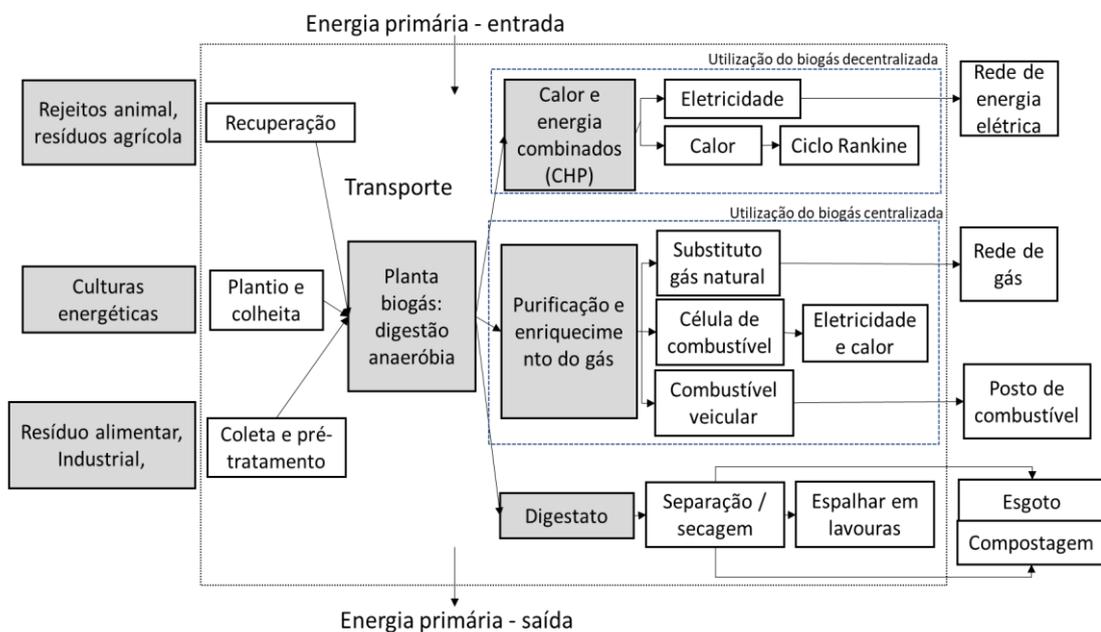


Figura 3 – Fronteira do sistema de estudo e fluxos de material e energia que atravessam a fronteira

Fonte: Adaptado de Pöschl, Ward e Owende (2010).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO

Para calcular a eficiência energética da planta, o trabalho foi dividido em três etapas, conforme Figura 4. Primeiramente, foram identificados todas as atividades e os equipamentos envolvidos na produção de biogás e sua conversão em energia elétrica a partir de visitas à propriedade.

Posteriormente, foram definidos os limites do sistema, determinando quais atividades fazem parte do sistema para esta análise. Na sequência, foram definidos as variáveis a serem monitoradas e os equipamentos necessários.

As análises físico-químicas das amostras coletadas forneceram os dados necessários para cálculo do balanço de massa dos biodigestores. Por fim, com a junção de todos os dados coletados no período de monitoramento, foi calculada a eficiência da planta por meio do balanço energético.

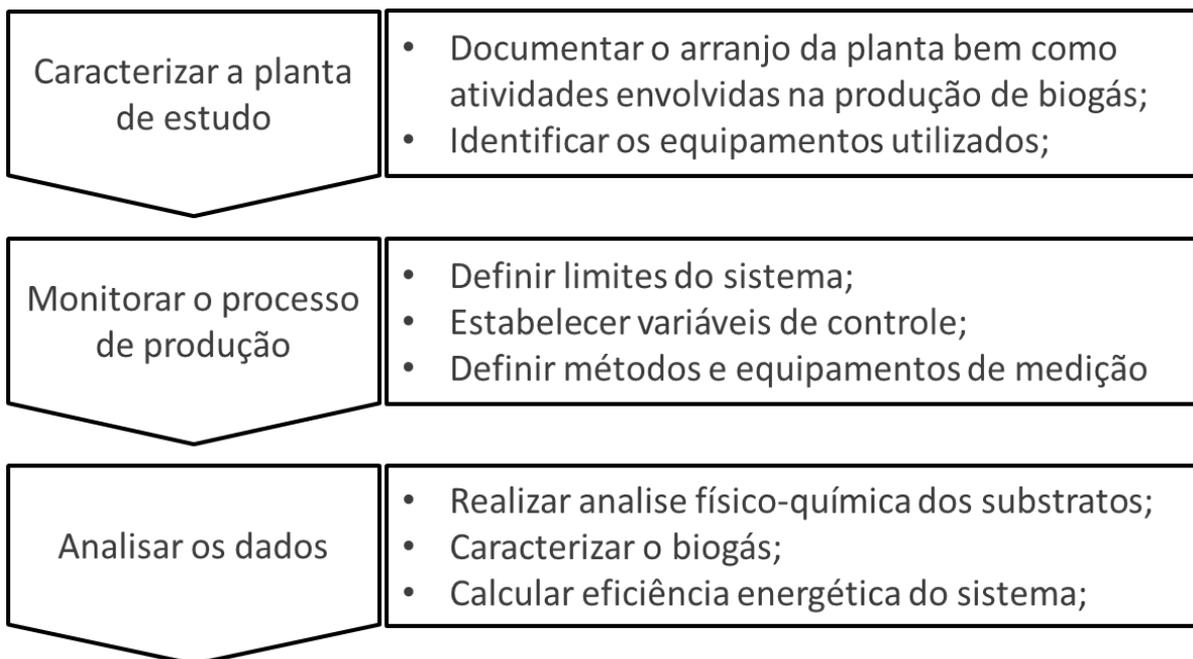


Figura 4 - Atividades a serem realizadas em campo durante execução do trabalho

Fonte: A autora.

#### 3.2 DESCRIÇÃO DA PLANTA EM ESTUDO

A propriedade rural analisada está localizada no município de Toledo, na

região Oeste do estado do Paraná, cuja principal atividade econômica é a suinocultura. A propriedade tem uma planta geradora de eletricidade a partir do biogás, com capacidade nominal de produção de 75 kW, conectada à rede de distribuição de energia. A energia produzida é consumida na propriedade; por isso, a planta se enquadra na categoria microgeradora com consumo local.

Conta com dois biodigestores, alimentados com dejetos suínos terminação da própria granja, de dejetos bovinos leiteiro e suínos de fase creche de propriedades vizinhas, como indica a Figura 5.



Figura 5 - Localização da planta e propriedades vizinhas  
Fonte: Google Earth (2021).

A granja, ponto A na Figura 5, aloja 1.800 suínos terminação, distribuídos em quatro pocilgas do tipo lâmina d'água. O manejo desse tipo de alojamento prevê limpeza diária dos dejetos. O dejetos bovinos é proveniente de uma propriedade vizinha (ponto B) distante 400 metros, com 60 vacas leiteiras, que permanecem no sistema de confinamento, necessitando de raspagem e limpeza das instalações diariamente. O dejetos de leitão de creche é fornecido de outra propriedade vizinha

(ponto C), distante 600 metros, que aloja 8.000 leitões. Na creche, é utilizado o sistema de grelha (baia suspensa), no qual a remoção dos dejetos e a limpeza das canaletas acontecem conforme a reposição de animais. A reposição de animais é parcial e semanal.

A alimentação dos biodigestores é via tubulações, por meio de gravidade para os dejetos suínos de terminação e creche, e via bomba, para o dejetos bovino. O efluente (biofertilizante) é transportado por meio de bomba para um depósito na lavoura (ponto D), posteriormente utilizado para fertilização e irrigação.

### 3.2.1 Descrição do Biodigestores

A planta tem dois biodigestores de geometria diferentes descritos no Quadro 3. O biodigestor A é do tipo mistura completa, cuja geometria circular prevê a que a matéria orgânica permaneça homogênea com o auxílio de misturadores. O biodigestor B é do tipo tubular, de geometria retangular com seção trapezoidal, características que geram fluxo pistonado no seu interior.

Os biodigestores são de geometrias diferentes, mas têm a mesma forma de construção, ou seja, ambos são escavados em solo e revestidos com manta PEAD. A cobertura que desempenha a função de gasômetro também é de manta tipo PEAD.

O biodigestor A é projetado para receber um misturador mecânico de haste longa. Foi instalado um sistema de recirculação de dejetos por bomba para desempenhar a função.

Quadro 3 – Descrição dos biodigestores

	Biodigestor A	Biodigestor B
		
Modelo	Mistura Completa; Geometria circular	Tubular; Geometria retangular de seção

		trapezoidal
Dimensões	Diâmetro: 21m Profundidade: 4,2m	Comprimento: 25 m Largura: 10m Profundidade: 2,6m
Volume	700 m <sup>3</sup>	420 m <sup>3</sup>
Alimentação	Monodigestão, Dejeto suíno terminação	Codigestão, Dejeto bovino + leitão
Frequência de alimentação	Alimentação diária	Dejeto bovino: alimentação diária; Leitão: batelada, uma por semana.
Agitação	Agitação intermitente, através de recirculação de substrato por motobomba.	Não possui

Fonte: A autora.

### 3.2.2 Sistema de limpeza do biogás

A planta utiliza um sistema de drenagem para retirada da umidade do biogás. A tubulação de gás está enterrada no solo, proporcionando o resfriamento do gás e condensação da umidade. A água condensada se concentra na parte mais baixa da tubulação, onde um dreno foi instalado para remoção periódica (Figura 6). Essa água também auxilia na lavagem do gás para remoção de impurezas.



Figura 6 - Sistema de remoção de água do biogás

Fonte: A autora.

Para a remoção de H<sub>2</sub>S do biogás, a planta utiliza um sistema de dessulfurização biológica, onde um compressor radial injeta de ar no gasômetro do biodigestor A. O biogás do biodigestor B é também enviado ao gasômetro do biodigestor A, de forma que a mistura biogás e ar seja homogenizada para consumo no conjunto motor gerador.

### 3.2.3 Descrição dos equipamentos

Todos os equipamentos envolvidos na produção de biogás e conversão em energia elétrica estão descritos no Quadro 4. Esses dados posteriormente foram utilizados para calcular o consumo dos equipamentos.

Quadro 4 - Equipamentos utilizados na produção de biogás e de energia elétrica da planta

Equipamento	Descrição	Alimentação
<p>Motor Gerador</p> 	<p>Motor Cummins 6 cilindros, potência nominal 120 kVA, adaptado para biogás. Acoplado ao gerador da marca Weg de potência nominal 75kW, 60 Hz</p>	<p>Biogás</p>
<p>Bomba de entrada</p> 	<p>Bomba Draga 3 polegadas acoplada a motor AP 1.8, 105 cv, Original gasolina, adaptado para gás.</p>	<p>GLP</p>
<p>Bomba de saída</p> 	<p>Bomba de 4 polegadas, acoplada a motor diesel Perkins 6 cilindros, 110 cv.</p>	<p>Diesel</p>

<p>Bomba de Agitação</p> 	<p>Motor Elétrico de 3 cv (2,2 kW), 1735 rpm, 220/380V, trifásico.</p>	<p>Elétrico</p>
<p>Dessulfurizador</p> 	<p>Compressor Radial 0,3 cv (0,23 kW). Marca: Asten.</p>	<p>Elétrico</p>

Fonte: A autora.

### 3.3 MONITORAMENTO DO PROCESSO

Os parâmetros essenciais para determinar o desempenho do processo foram definidos e listados no Quadro 5.

Quadro 5 – Variáveis de controle do processo

Parâmetro	Unidade	Método	Equipamento
Vazão de Dejetos	$m^3 \cdot dia^{-1}$	Manual	Réguas
Volume Biogás Produzido	$m^3 \cdot dia^{-1}$	Equipamentos de controle	Transmissor de Fluxo de Massa de Dispersão Térmica - Magnetrol TA2
Energia Elétrica Produzida	$kWh \cdot dia^{-1}$	Equipamentos de controle	Acumulador Painel de controle Geração Distribuída
Consumo Bomba 1	$kWh \cdot m^{-3}$	Manual	Registro de horas de funcionamento, vazão e consumo de combustível
Consumo Bomba 2	$kWh \cdot m^{-3}$	Manual	Registro de horas de funcionamento
Consumo Bomba 3	$kWh \cdot dia^{-1}$	Manual	Registro de horas de funcionamento

Fonte: A autora.

### 3.3.1 Mensuração da vazão de dejetos

O dejetos suíno terminação alimenta exclusivamente o biodigestor B, por meio de tubulações enterradas no solo, tornando inviável a mensuração do volume de dejetos na entrada do biodigestor. Optou-se, então, por medir a saída, considerando-se que o volume de dejetos que entra é o mesmo que sai.

As dimensões da lagoa de saída foram tomadas, e com auxílio de ferramentas de desenho, foi determinado o volume da lagoa em relação à profundidade, permitindo assim estimar o volume por meio de uma régua. O ponto de instalação da régua está identificado por uma flecha vermelha na Figura 7.

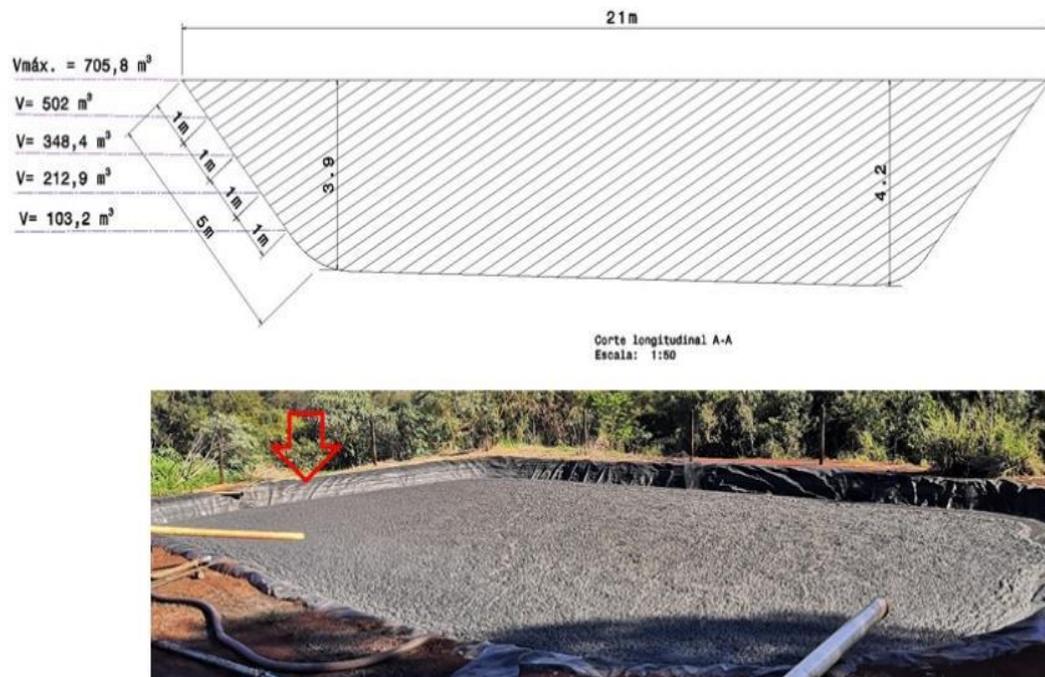


Figura 7 - Determinação do volume por profundidade da lagoa de saída  
Fonte: A autora.

Da mesma forma, o biodigestor A (modelo tubular) teve suas dimensões reproduzidas em desenho e seu volume relacionado a uma régua, conforme Figura 8. Esse biodigestor tem uma caixa de nível, que é utilizada para liberar espaço no biodigestor para receber o dejetos de creche em forma de batelada. É possível liberar  $100\text{m}^3$  de dejetos do biodigestor, que equivale a profundidade 45 cm na caixa de nível. Por meio desse nível, foi estimado o volume de dejetos produzidos na creche. No caso de transbordo, esse é verificado na régua da lagoa de saída.

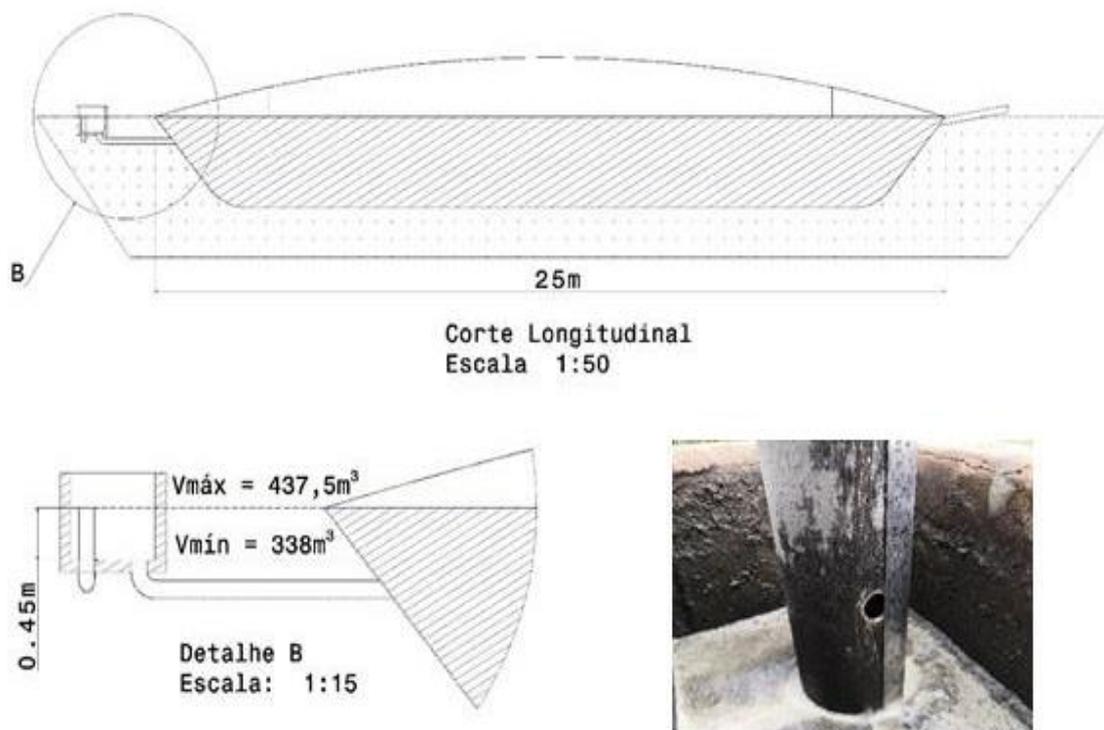


Figura 8 - Determinação do volume por profundidade do biodigestor B (tubular)  
Fonte: A autora.

O dejetto bovino é direcionado a uma caixa armazenadora que alimenta a bomba de envio. As medidas dessa caixa foram tomadas e seu volume calculado conforme a profundidade, como ilustrado na Figura 9.

O volume útil de armazenamento é de  $7,44\text{ m}^3$ . Uma curva na tubulação de alimentação da bomba faz com que existe um volume não aproveitado no fundo da caixa, onde os sólidos grosseiros são depositados. Esporadicamente, esses sólidos são eliminados.

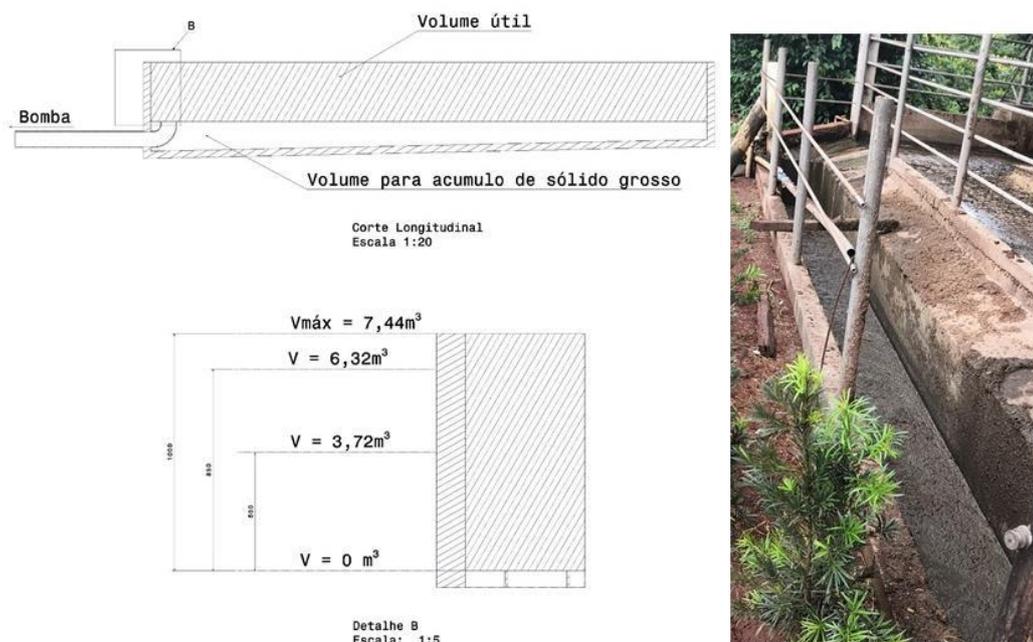


Figura 9 - Caixa armazenadora de dejetos bovinos

Fonte: A autora.

### 3.3.2 Produção de biogás

Para medir a vazão de biogás, foi utilizado um transmissor de fluxo térmico de massa, marca Magnetrol, modelo TA2. O equipamento realiza a medição de vazão mássica por meio da dispersão térmica. A faixa de medição de vazão do equipamento é de 0,05 a 275 Nm/s, com precisão de +- 1% da leitura +0,5% da calibração.



Figura 10 - Medidor de vazão do biogás

Fonte: A autora.

O aparelho foi instalado na linha de gás próxima à admissão do motor, de forma que mede a vazão consumida pelo motor durante a operação. O aparelho mede a vazão instantânea e tem um acumulador. No final de cada período de operação do motor, o valor do acumulador foi registrado manualmente.

### 3.3.3 Produção de energia elétrica

O sistema de geração de energia conectado à rede de distribuição tem um controlador microprocessado, modelo GC600 Mains, que integra o painel de comando do grupo gerador. Esse controlador tem a função de supervisionar e proteger o sistema de geração de energia elétrica. Conta com um acumulador, e, ao final de cada período de operação do conjunto motogerador, o valor foi registrado manualmente em planilhas de controle.



Figura 11 – Controlador do painel de comando do grupo gerador  
Fonte: A autora.

## 3.4 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA

Durante o período de observação, amostras dos afluentes e efluentes foram coletadas, armazenadas em garrafas pet e posteriormente realizadas as análises no laboratório de Saneamento Ambiental da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste), *campus* Cascavel. Foram determinados:

- Sólidos totais, sólidos voláteis e sólidos fixos;
- pH;
- Alcalinidade parcial e intermediária (AI/AP)

O pH foi determinado com o uso de um potenciômetro. A alcalinidade foi aferida pelo método volumétrico com detecção potenciométrica, em que é feita a titulação com solução padronizada de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, até atingir um pH pré-fixado.

A determinação dos sólidos foi realizada por meio do método 2540B (APHA, 1998), que consiste em quantificar a matéria orgânica presente no substrato, excluindo-se a água. Para isso, utilizou-se uma estufa, conforme mostra Figura 12. O teor de sólidos totais (ST) é obtido pela pesagem do resíduo após evaporação da água.

$$ST = \frac{(P_2 - P_1) * 1000}{V} \quad (4)$$

Em que:

ST = sólidos Totais (g.L<sup>-1</sup>);

P<sub>1</sub> = peso do cadinho vazio (gramas);

P<sub>2</sub> = peso do cadinho com amostra seca (gramas);

V= volume da amostra (mL).

Na sequência, essa matéria seca foi submetida à ignição em uma mufla a 560° (Figura 13). A pesagem do resíduo após ignição identifica os Sólidos Fixos (SF). A diferença entre Sólidos Totais e Fixos são os Sólidos voláteis (SV).

$$SF = \frac{(P_3 - P_1) * 1000}{V} \quad (5)$$

Em que:

SF = Sólidos Fixos (g.L<sup>-1</sup>);

P<sub>1</sub> = peso do cadinho vazio (gramas);

P<sub>3</sub> = peso do cadinho com cinzas pós-incineração (gramas);

V= volume da amostra (mL).

Por fim, os Sólidos voláteis (SV) são obtidos pela diferença entre Sólidos Totais e Fixos:

$$SV = ST - SF \quad (6)$$

Em que:

SV = sólidos voláteis (g.L<sup>-1</sup>);

ST = sólidos Totais (g.L<sup>-1</sup>);

SF = Sólidos Fixos (g.L<sup>-1</sup>).



Figura 12 - Estufa com recirculação de ar para remoção de água das amostras  
Fonte: A autora.



Figura 13 – Mufra utilizada para combustão da amostra seca  
Fonte: A autora.

### 3.5 CARACTERIZAÇÃO DO BIOGÁS

O biogás foi analisado na propriedade por meio de um monitor de extração de gases portátil, Modelo Landtec GEM 5000. O equipamento identifica a concentração de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S no biogás.



Figura 14 - Monitor de gás portátil modelo Landtec GEM 5000  
Fonte: QED Environmental Systems, Inc.

### 3.6 DEFINIÇÃO DOS LIMITES DO SISTEMA

Os limites do sistema para este estudo foram determinados de forma a englobar todos os equipamentos e os processos envolvidos na produção de biogás e sua conversão em energia elétrica.

Na planta em questão, existe a entrada de substratos de propriedades vizinhas no sistema, com o objetivo de produzir energia elétrica. O resíduo dessa atividade precisa ser removido do sistema. Os equipamentos necessários para esse transporte são essenciais para o funcionamento da planta, e foram considerados dentro dos limites do sistema.

Os fluxos de massa e energia que atravessam a fronteira do sistema estão representados na Figura 15. O fluxo de entrada do sistema consiste na biomassa (afluente) que alimenta os dois biodigestores e a energia fornecida para os equipamentos. O fluxo de saída é a energia elétrica produzida pela planta e o biofertilizante. Pode ser dividido em dois subsistemas: o processo de digestão

anaeróbica (subsistema 1); e o processo de conversão do biogás em energia elétrica (subsistema 2).

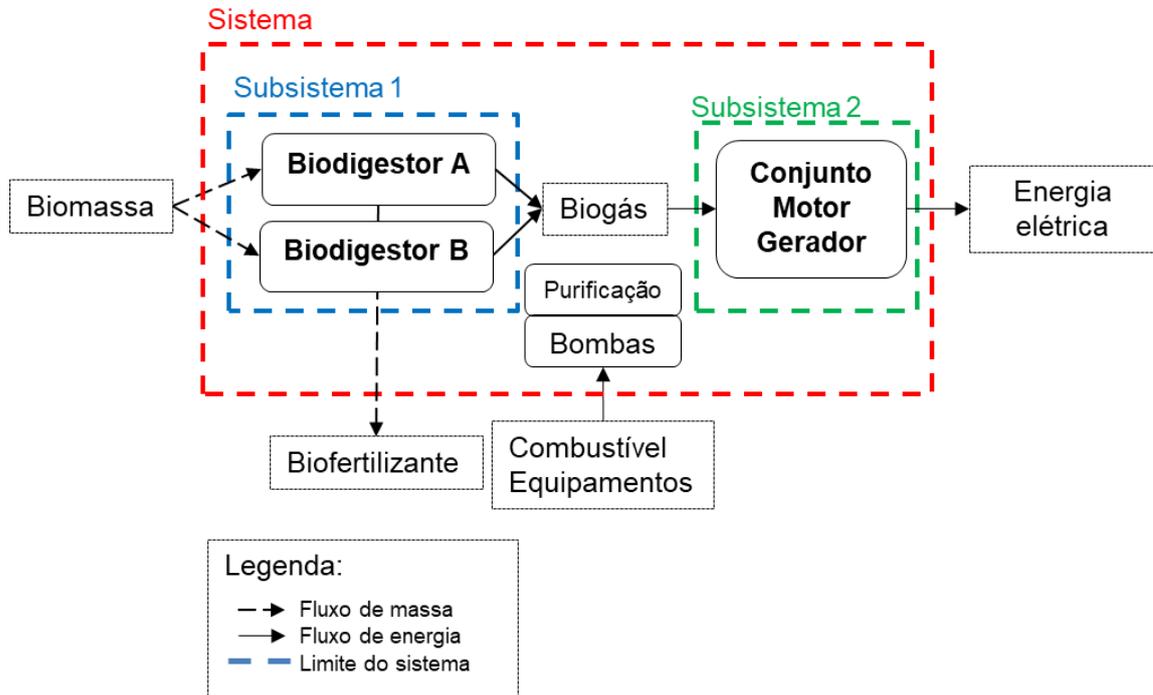


Figura 15 – Diagrama do sistema de produção e conversão do biogás em energia elétrica

Fonte: A autora.

### 3.7 MÉTODO DE CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DO BIODIGESTOR

Dentre os métodos mais utilizados para determinar a eficiência do processo de digestão anaeróbica de uma planta de biogás está a taxa de degradação da matéria orgânica. Ela é obtida pelo balanço de massa do biodigestor, em que o fluxo de entrada consiste no total de afluentes, matéria orgânica de alimentação do biodigestor. O fluxo de saída consiste no total de efluentes, matéria orgânica que sai do biodigestor ou o chamado digestato.

A análise de sólidos do afluente e efluente determinará o desempenho do biodigestor em função da redução de sólidos, ou seja, a parcela de energia que foi aproveitada do substrato.

$$Db = \frac{(SV_e - SV_s)}{SV_e} * 100 \quad (7)$$

Em que:

$Db$  = Desempenho do biodigestor (%);

$SV_e$  = sólidos voláteis na entrada do biodigestor ( $g.L^{-1}$ );

$SV_s$  = sólidos voláteis na saída do biodigestor ( $g.L^{-1}$ ).

### 3.8 MÉTODO DE CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DO CONJUNTO MOTORGERADOR

O desempenho do motogerador (DM), Equação 8, também é medido pela razão entre os fluxos de energia que atravessam a fronteira do sistema. A entrada consiste na energia contida no biogás ( $E_b$ ), obtida pela Equação 9, e a saída a energia elétrica produzida ( $E_E$ ).

$$DM = \frac{E_E}{E_b} \quad (8)$$

$$E_b = P_b * PCI_b \quad (9)$$

Em que:

$E_b$  = Energia do biogás (kWh);

$E_E$  = Energia elétrica (kWh);

$P_b$  = produção de biogás ( $m^3.dia^{-1}$ );

$PCI_b$  = poder calorífico inferior do biogás ( $kWh.m^{-3}$ ).

O poder calorífico inferior do biogás foi calculado em função da concentração de metano presente no biogás, por meio da Equação 10:

$$PCI_{biogás} = \%_{CH_4} \cdot \rho_{CH_4} \cdot PCI_{CH_4} \quad (10)$$

Em que:

$\rho_{CH_4}$  = densidade do metano ( $0,71746 \text{ kg } m^{-3}$ );

$\%_{CH_4}$  = concentração de metano no biogás (%);

$PCI_{CH_4}$  = poder calorífico inferior do metano ( $13,9 \text{ kWh } kg^{-1}$ ).

O PCI obtido para o biogás é um valor médio, pois a caracterização do biogás foi realizada a cada 7 ou 10 dias. Entende-se que nesse intervalo existe variação nas concentrações de metano presente no biogás.

### 3.9 MÉTODO DE CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DA PLANTA

Para calcular o desempenho da planta, foram identificados todos os fluxos energéticos que atravessam a fronteira dos sistema, conforme ilustrado na Figura 16.

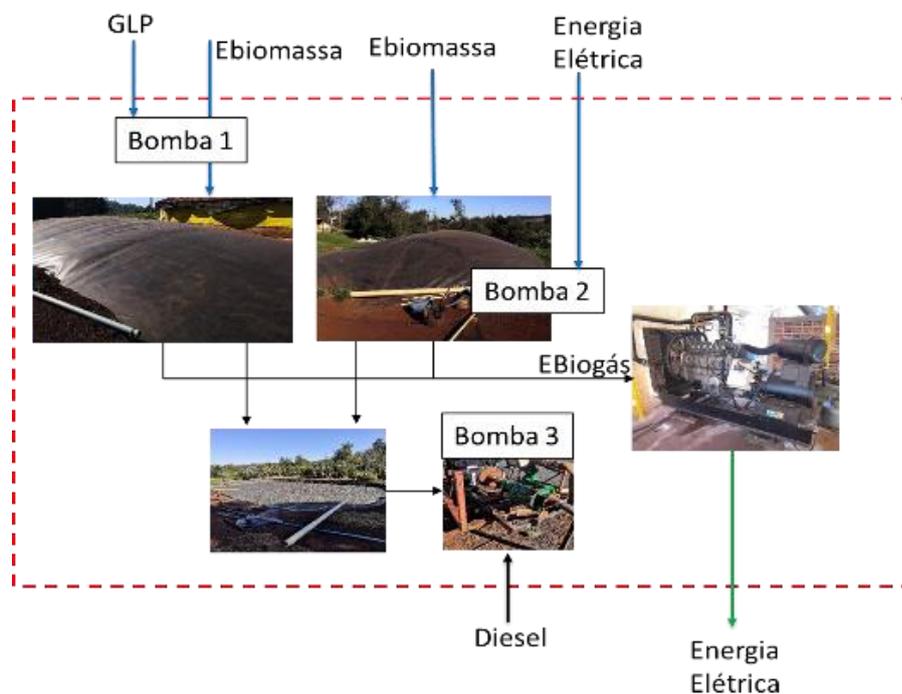


Figura 16 - Fluxos energéticos que atravessam a fronteira do sistema da planta de geração energia elétrica

Fonte: A autora.

A energia envolvida se apresenta de diferentes formas, como o combustível das bombas e a energia da biomassa. Foi necessária a conversão de todos os fluxos energéticos para a mesma unidade de medida, em kWh.

Para os combustíveis, a energia é representada pelo do PCI de cada combustível em kWh.kg<sup>-1</sup> ou kWh.L<sup>-1</sup>, e o consumo de cada equipamento foi determinado em campo, a partir da Equação 11:

$$C_{comb.} = \sum PCI * v \quad (11)$$

Em que:

$C_{comb}$  = consumo diário de combustíveis (kwh.d<sup>-1</sup>);

PCI = Poder calorífico inferior kWh.kg<sup>-1</sup>;

$v$  = volume diário (L ou kg).

Para o GLP, foi adotado o valor de PCI 13 kWh.kg<sup>-1</sup>. Para o diesel, foi adotado PCI 12 kWh.kg<sup>-1</sup> e densidade  $\rho = 837$  g.L<sup>-1</sup>.

Os equipamentos elétricos tiveram seu consumo estimado com base nas características de potência (CV) e rendimento dos motores, a partir da Equação 12:

$$C_E = \frac{P * 0,736}{Rend_{\%}} * 100\% * h \quad (12)$$

Em que:

$C_E$  = consumo equipamentos elétricos (kWh.d<sup>-1</sup>);

$P$  = potência (cv);

Rend = rendimento do motor (%);

$H$  = período de trabalho diário (h.d<sup>-1</sup>);

1 cv = 0,736 kW.

Já a biomassa que alimenta os biodigestores contém energia na forma de nutrientes, que alimentam os microorganismos presentes no biodigestor responsáveis pela produção de metano. Essa energia é estimada por meio da Equação 13:

$$E_{bm} = \sum_{n=1}^N (\dot{m}_{sv} * B_0 * PCI_{CH_4} * \rho_{CH_4}) \quad (13)$$

Em que:

$\dot{m}_{sv}$  = vazão mássica de sólidos voláteis (kg<sub>sv</sub>.dia<sup>-1</sup>);

$B_0$  = potencial bioquímico de metano (m<sup>3</sup><sub>CH<sub>4</sub></sub>.kg<sub>sv</sub><sup>-1</sup>);

$PCI_{CH_4}$  = poder calorífico inferior do metano padrão (13,9 kWh.kg<sup>-1</sup>);

Fonte: ANTONIOLIMA (20?).

$\rho_{CH_4}$  = densidade do metano (0,71746 kg.m<sup>-3</sup>);

Fonte: ANTONIOLIMA (20?).

Após a mensuração de todos os fluxos de energia e a conversão para a mesma unidade de medida, a taxa de desempenho da planta foi descrita pela Equação 14:

$$\eta = \frac{\sum Saídas}{\sum Entradas} = \frac{E_E}{E_{bm} + E_{equ}} \quad (14)$$

Em que:

$E_E$  =energia elétrica produzida pela planta (kWh);

$E_{equ}$  = energia consumida pelos equipamentos envolvido na produção(kWh);

$E_{bm}$  = energia presente na biomassa (kWh).

Além das relações de entrada de saída definidas para o limite do sistema, é importante relacionar a energia fornecida ao sistema, por meio do consumo dos equipamentos e a energia produzida. Para tanto, utilizou-se a Equação 15:

$$\eta_2 = \frac{E_{equip}}{E_E} \quad (15)$$

Em que:

$E_{equ}$  = energia consumida pelos equipamentos envolvido na produção(kWh);

$E_E$  =energia elétrica produzida pela planta (kWh).

### 3.10 COLETA DOS DADOS

O monitoramento da planta iniciou no dia 09 de agosto de 2020 e finalizou em 15 de outubro 2020, totalizando um intervalo 80 dias. Durante esse período, foram coletados diariamente os dados de produção de biogás e de produção de energia elétrica, sendo que ocorreram duas paradas de produção, acarretando três dias sem produção de energia elétrica. Dessa forma, o número de amostras no período foi de 77 dias.

Ao longo desse período, foram realizadas coletas de material orgânico para a caracterização físico-química, bem como leituras de composição do biogás.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 PARÂMETROS DO PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA

Primeiramente, foram determinados os indicadores da digestão anaeróbia, ou seja, os parâmetros que indicam se as atividades microbiológicas dentro do reator estão em equilíbrio.

A vazão de dejetos diários médio na planta, obtidos durante o período de monitoramento, está representada na Figura 17. A porção azul representa o dejetos suíno da granja tipo terminação, o vermelho o dejetos bovino e o verde de dejetos de leitões.

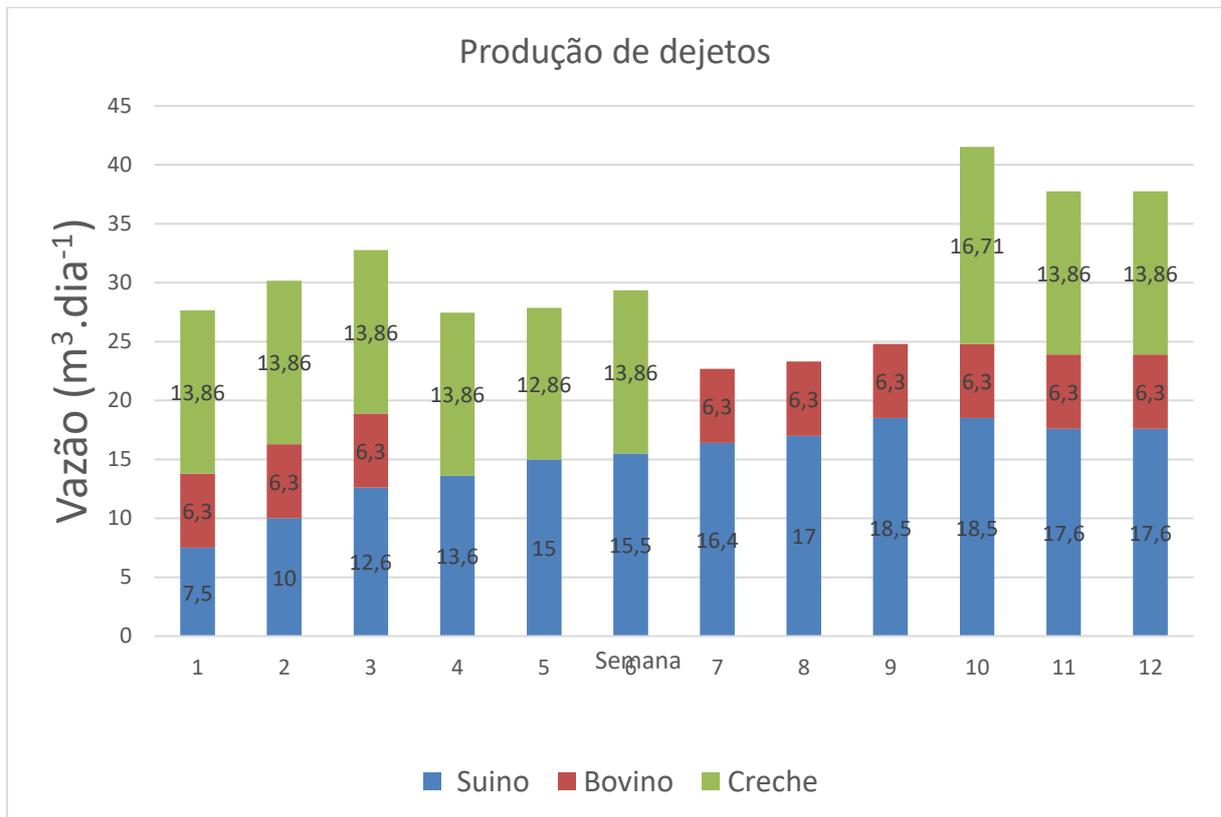


Figura 17 - Volume de alimentação do biodigestor

Fonte: A autora.

Na primeira semana de coleta, os suínos da granja terminação estavam alojadas em torno de 14 dias. A produção de dejetos média foi de 7,5 m<sup>3</sup> no início, com máxima de 18,5 m<sup>3</sup>. O bovino produz em média 6,3m<sup>3</sup> por dia. O envio foi interrompido por defeito na bomba. O dejetos de leitão proveniente da creche é

recebido em batelada, entre 95 e 110 m<sup>3</sup> a cada sete dias, média de 13,9 a 16 m<sup>3</sup> por dia. O abastecimento foi interrompido por necessidade de manejo nas tubulações.

A partir dos dados de vazão, foi possível calcular o TRH. O biodigestor B, em condições normais de alimentação, opera com TRH em torno de 21 dias. O biodigestor A, no início do alojamento dos suínos, opera com TRH de 93 dias e 37 dias no final do alojamento.

O TRH ideal depende das características do biodigestor e da concentração de sólidos. D'Aquino *et al.* (2019) observaram, em ensaios de um reator de mistura completa, que o TRH de 30 dias é mais eficiente em termos de eficiência de tratamento, mas, para fins energéticos, o TRH de 20 dias absorve melhor as variações de carga orgânica que naturalmente ocorrem no processo. Para Souza *et al.* (2008), um menor TRH proporciona maior produção volumétrica de metano.

Tabela 2 - Parâmetros do processo biológico de digestão anaeróbia

Parâmetro	Biodigestor A – circular	Biodigestor B-Tubular	Faixa ótima
TRH	93 a 37 dias	21 dias	
AI/AP	0,37 0,27 0,29 0,27 0,26	0,30 0,32 0,25 0,36	0,3 – 0,4
pH	7,95 7,99 8,28 7,95 7,98	7,80 7,83 7,80 7,86	6,7 – 8,0

Fonte: A autora.

O pH é de extrema importância na produção de biogás, sendo a faixa de operação para biodigestores de 6,0 a 8,0, tendo como ponto ideal pH 7,0, que ocorre normalmente quando o reator está funcionando bem (QUADROS *et al.*, 2010).

O biodigestor A apresenta um registro de pH 8,28 acima do recomendado; os demais valores permanecem estáveis entre 7,95 e 7,99. O biodigestor B

apresenta estabilidade de pH, com valores entre 7,80 e 7,86. Ambos os biodigestores apresentam pH perto do limite máximo, acima do ponto ideal, o que ocasiona menor produção de metano.

A relação AI/AP no biodigestor A está menor que 0,3, ou seja, está abaixo do recomendado. Esse valor demonstra subcarga no biodigestor, ou seja, falta de nutrientes. Ambos os parâmetros, TRH e a relação AI/AP, indicam que o reator A está subutilizado, e pode influenciar a produção de biogás. O alto pH indica baixa produção de metano.

A relação AI/AP para o biodigestor B apresenta apenas um valor menor que 0,3, mas os demais se encontram dentro da faixa ideal. O processo biológico desse biodigestor se encontra mais estável que o biodigestor A.

Entende-se que a qualidade do biogás produzido no biodigestor A pode ser melhorada por meio da melhor distribuição dos dejetos entre os dois biodigestores. No início do alojamento dos suínos de terminação, o volume de dejetos produzido é baixo. É possível, nesse período, conduzir parte das outras fontes de biomassa para esse biodigestor, reduzindo, dessa forma, o TRH e aumentando a quantidade de nutrientes fornecidos.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA BIOMASSA

Para o biodigestor A, foram realizadas cinco coletas de amostras de substratos da entrada e da saída. Para o biodigestor B, foram realizadas apenas três coletas nas entradas e na saída, pois esse biodigestor depende do envio do material da creche, que foi interrompido durante determinado período.

As amostras permaneceram congeladas e, posteriormente, foram analisadas no laboratório de Saneamento Ambiental da Unioeste, *campus* Cascavel (PR). A Figura 18 ilustra as amostras já descongeladas, para, na sequência, realizar-se a análise de sólidos, no referido laboratório, conforme descrição realizada na seção 3.4 desta pesquisa. As Figuras 19 e 20 mostram partes de execução do método. A Tabela 3, por sua vez, apresenta os dados obtidos para as amostras no laboratório de saneamento da Unioeste.



Figura 18 - Amostras de substrato preparadas para análise de sólidos  
Fonte: A autora.



Figura 19 - Amostras de substratos em processo de secagem utilizando estufa com recirculação de ar  
Fonte: A autora.



Figura 20 – Cinzas das amostras após processo de secagem e combustão em mufla  
Fonte: A autora.

Tabela 3 – Concentração de sólidos totais, sólidos voláteis e sólidos fixos dos substratos

Tipo de Substrato	Sólidos Totais (ST) g/L	Sólidos Voláteis (SV) g/L	Sólidos Fixos (SF) g/L
	46,10	29,35	16,74
	57,43	42,59	14,84
Suíno – terminação	36,72	26,28	10,44
	30,98	22,12	8,86
	29,20	19,60	9,60
Média	40,08	27,99	12,10
Dp	11,72	8,98	3,48
	31,13	23,40	7,73
Leitão - Creche	23,22	14,94	8,28
	15,20	9,20	6,00
Média	23,18	15,85	7,34
Dp	7,96	7,14	1,19
	20,26	14,28	5,98
Bovino	17,47	12,70	4,77
	46,80	38,80	8,00
Média	28,18	21,93	6,25
Dp	16,19	14,63	1,63

Fonte: A autora.

Tabela 4 - Pesquisa bibliográfica para concentrações de Sólidos Totais e Voláteis de dejetos suíno

Tipo de Substrato	Sólidos Totais (g.L <sup>-1</sup> )	Sólidos Voláteis (g.L <sup>-1</sup> )	Fonte
Suíno	58,08 ± 14,25	44,02 ± 11,34	(TAVARES, 2012)
	60,52 ± 14,72	45,73 ± 11,73	
	63,02 ± 15,43	47,67 ± 12,16	
	75,12 ± 16,7	56,31 ± 18,8	
Bovino	42,472	30,445	(MENDONÇA, 2009)
		32,66 ± 7,58	(WEBER, 2014)

Fonte: A autora.

O dejetos de suíno terminação apresenta massa de SV de 29,35 g.L<sup>-1</sup> no início do monitoramento e declínio até 19,60 g.L<sup>-1</sup>, ou seja, ao longo do crescimento e engorda dos animais, aumentou a quantidade de água presente nos dejetos. A relação AI/AP observada para esse biodigestor indica falta de nutrientes, e a baixa concentração de sólidos voláteis do dejetos demonstra que o dejetos suíno produzido pela granja está bem diluído.

Buscou-se na literatura concentrações de SV e ST para dejetos suínos produzidos em condições similares de manejo para verificar a qualidade do substrato da planta. É possível verificar que a média obtida para o dejetos suíno desta planta está abaixo do encontrado por Oliveira e Higashihara (2006) e Tavares (2012) e, reportados na Tabela 4.

A quantidade de água no dejetos pode ser influenciada pelo tipo e manejo das instalações. A granja utiliza sistemas de gotejamento de água e nebulizador para o conforto térmico dos animais. No período de monitoramento, entre agosto e outubro de 2020, ocorreu estiagem e altas temperaturas, intensificando o uso das técnicas de resfriamento do ambiente e aumentando o desperdício de água pelos animais.

Os dejetos de leitões proveniente da propriedade vizinha apresentam uma grande variação na concentração de SV, entre 23,40 g.L<sup>-1</sup> e 9,20 g.L<sup>-1</sup>. Da mesma forma, o dejetos bovino varia entre 14,28 g.L<sup>-1</sup> e 38,80 g.L<sup>-1</sup>. Dessa forma, a média obtida é inferior ao reportado por Mendonça (2009) e Weber (2014). Entende-se que essas variações podem sofrer interferência do manejo das granjas ou da falta de homogeneização do substrato.

Ainda, segundo Amaral (2017), os longos tempos de estocagem do dejetos dentro das instalações contribuem para redução dos sólidos voláteis no dejetos. Devido ao manejo adotado na unidade de creche, o dejetos permanece estocado por um longo período, o que pode contribuir para a baixa concentração e para as altas variações nos valores de SV dos dejetos.

#### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DO BIOGÁS

O biogás dos dois biodigestores é misturado no gasômetro do biodigestor A, e recebe adição de ar para diminuir a concentração de H<sub>2</sub>S. O biogás já homogeneizado é consumido no motogerador. Esse biogás foi analisado com

equipamento portátil, tendo ponto de coleta próximo à admissão do motor. As características identificadas são descritas na Tabela 5.

Tabela 5 - Composição do Biogás

Data	CH <sub>4</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> S (ppm)	PCI biogás (kWh.m <sup>3</sup> )
31/07/2020	57,1	33,7	176	5,7
07/08/2020	59,9	32,8	666	6,0
19/08/2020	59,4	34,1	169	5,9
28/08/2020	57,0	33,6	3856	5,7
09/09/2020	61,9	33,4	3363	6,2
18/09/2020	57,5	32,5	3892	5,7
29/09/2020	51,9	33,4	1412	5,2
04/10/2020	55,1	29,7	1971	5,5
média	57,5	32,9	1938,1	5,7
Dp	2,9	1,3	1588,2	0,3

Fonte: A autora.

O metano apresenta concentração média a 57,5%, com mínimo de 51,9%, máxima de 61,9% e desvio padrão de 2,9. Observa-se pouca variação até meados de setembro, iniciando uma queda nos números no final do mesmo mês, período que coincide com a queda na concentração de SV do substrato.

Silva (2015a) obteve concentração de metano média de  $68,3 \pm 3,7\%$  ao monitorar a produção de biogás por dejetos suínos. Weber (2014) obteve produção média de metano de 60,27% para dejetos bovinos. Em comparação a outros estudos, a concentração de metano do biogás é baixa. Isso implica baixo poder calorífico inferior do biogás, em média 5,7 kWh.m<sup>3</sup>.

A concentração de H<sub>2</sub>S presente no biogás demonstrou ser instável, apresentando um salto para mais de 3000ppm a partir do dia 28 de agosto de 2020, na quinta semana, quando o volume de produção de biogás ultrapassou 700 m<sup>3</sup> diários.

Segundo Coelho *et al.* (2018), para realizar a dessulfurização biológica do biogás, a injeção de ar deve ser na razão de 8 a 12% do fluxo de gás. O compressor utilizado na planta tem capacidade de injetar 2 m<sup>3</sup> de ar por hora no

biodigestor, operando 24h diariamente, o que totaliza 48 m<sup>3</sup> de ar por dia.

A partir da vazão média de biogás produzido diariamente, foram calculados os valores mínimos recomendados de injeção de ar, apresentados na Tabela 6. Verifica-se que, na quinta semana, a vazão necessária de ar supera a capacidade do compressor radial, e a concentração de H<sub>2</sub>S passa a níveis muito acima do recomendado.

Ademais, o rendimento desse tipo de limpeza do biogás pode ser baixo se a quantidade de H<sub>2</sub>S presente no biogás antes do tratamento for muito elevada. Dessa forma, os dados da Tabela 6 mostram que o sistema de remoção de H<sub>2</sub>S do biogás não atende às necessidades da planta. Os níveis de H<sub>2</sub>S apresentados no biogás podem reduzir consideravelmente a vida útil do motor, aumentar os custos de manutenção e gerar perda de produção pela parada das máquinas.

Tabela 6 - Vazão de ar recomendada para a remoção de H<sub>2</sub>S do biogás no sistema de dessulfurização biológica

Semana	Produção média de biogás (m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup> )	H <sub>2</sub> S (ppm)	Vazão de ar mínima recomendada: 8% (m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup> )
1	474,58	176	37,97
2	424,27	666	33,94
3	436,07	666	34,89
4	544,22	169	43,54
5	721,37	3856	57,71
6	733,89	3363	58,71
7	920,52	3363	73,64
8	673,65	3892	53,89
9	597,92	1412	47,83
10	812,07	1971	64,96
11	547,91	1971	43,83
12	715,08	1971	57,21

Fonte: A autora.

#### 4.4 EFICIÊNCIA DO BIODIGESTOR

Após a caracterização dos substratos de entrada e saída, realizou-se o

balanço de massa dos biodigestores para determinar a eficiência da digestão anaeróbia.

Tabela 7 - Redução de ST e SV desempenhado pelos biodigestores A e B

Data	A – Circular				B – Tubular			
	Redução ST		Redução SV		Redução ST		Redução SV	
	g.L <sup>-1</sup>	%						
14/08/2020	29,88	64,81%	22,14	75,43%	15,84	56,85%	14,61	70,68%
03/09/2020	34,19	59,54%	28,00	65,75%	-	-	-	-
18/09/2020	20,91	56,95%	17,65	67,19%	-	-	-	-
04/10/2020	13,43	43,34%	10,94	49,46%	13,10	60,93%	10,67	74,77%
10/10/2020	17,00	58,22%	13,60	69,39%	10,88	44,08%	10,28	56,86%
<b>Média</b>	<b>23,08</b>	<b>56,57%</b>	<b>18,47</b>	<b>65,44%</b>	<b>13,27</b>	<b>53,95%</b>	<b>11,85</b>	<b>67,44%</b>
Dp	8,73	7,98%	6,81	9,67%	2,48	8,79%	2,39	9,39%

Fonte: A autora.

O biodigestor A, que tem alimentação diária de dejetos suínos terminação, apresenta eficiência média de 56,57% para redução de ST e 65,44% para SV.

O biodigestor B, alimentado com dejetos bovinos e de leitão na proporção de 30% e 70%, e não tem fluxo contínuo, teve um período menor de avaliação por interrupção na alimentação. Esse biodigestor apresentou eficiência média de 53,95% na redução de ST e 67,44% na redução de SV.

Ambos apresentam médias muito próximas, e, para verificar se estatisticamente as médias são iguais, foi realizado o teste de hipóteses.

Optou-se por utilizar o teste t de Student, com o auxílio do *software RStudio*. O teste t de Student pode ser calculado de duas formas, considerando as variâncias dos tratamentos estatisticamente iguais ou desiguais. Para tanto, primeiramente foi realizado o teste F, apresentado na Tabela 8, para verificação das variâncias.

O teste F apresentou p-valor >0,05, ou seja, as variâncias dos biodigestores são estatisticamente iguais ao nível de significação de 5%.

Realizou-se, então, o teste t de Student, considerando as variâncias estatisticamente iguais. O resultado apresentou p-valor de 0,7849, sendo maior que 0,05. Conclui-se, então, que as médias de redução de SV obtidas nos biodigestores

A e B são estatisticamente iguais ao nível de significância de 5%.

Tabela 8 - Teste -F para comparar variâncias de dois tratamentos diferentes

Biodigestor	Variância	p-valor
A	93,45	0,9238
B	88,14	

Fonte: A autora.

Tabela 9 - Teste t de comparação de médias de dois tratamentos diferentes

Biodigestor	Média	p-valor
A	65,44	0,7849
B	67,44	

Fonte: A autora.

Os resultados obtidos condizem com valores reportados por diferentes autores para biodigestores na região Oeste do Paraná. Feiden *et al.* (2004), por exemplo, obtiveram redução de sólidos totais de 68,67% para um biodigestor tubular com agitação e de 52,11% para um biodigestor tubular sem agitação, alimentados com água residuária da suinocultura. Angonese *et al.* (2005) verificaram redução de sólidos totais de 45% e 59% de sólidos voláteis também para um biodigestor alimentado com dejetos de suínos. Silva *et al.* (2015b) reportaram remoção de sólidos voláteis de 61% para biodigestor tubular com dejetos suínos. E Weber (2014) obteve média de 55,10%, na remoção dos sólidos voláteis para um biodigestor operando com dejetos bovinos.

#### 4.5 PRODUÇÃO DE BIOGÁS

O volume de biogás produzido pela planta foi mensurado diariamente. No entanto, o aparelho mede a vazão consumida pelo grupo gerador, e esse opera por algumas horas no dia, conforme o gasômetro se enche e se esvazia. O volume mensurado tem a influência do horário de início e fim da operação, já que é feita manualmente.

Optou-se por tratar os dados de forma semanal para minimizar esse efeito. A

Figura 21 apresenta a média de produção para cada sete dias.

Tabela 10 – Valores obtidos para o volume de biogás produzido planta

Variável	Média $\text{m}^3\text{-dia}^{-1}$	Desvio Padrão	Mínimo $\text{m}^3\text{-dia}^{-1}$	Máximo $\text{m}^3\text{-dia}^{-1}$
Volume Biogás	626,04	160,51	424,28	920,60

Fonte: A autora.

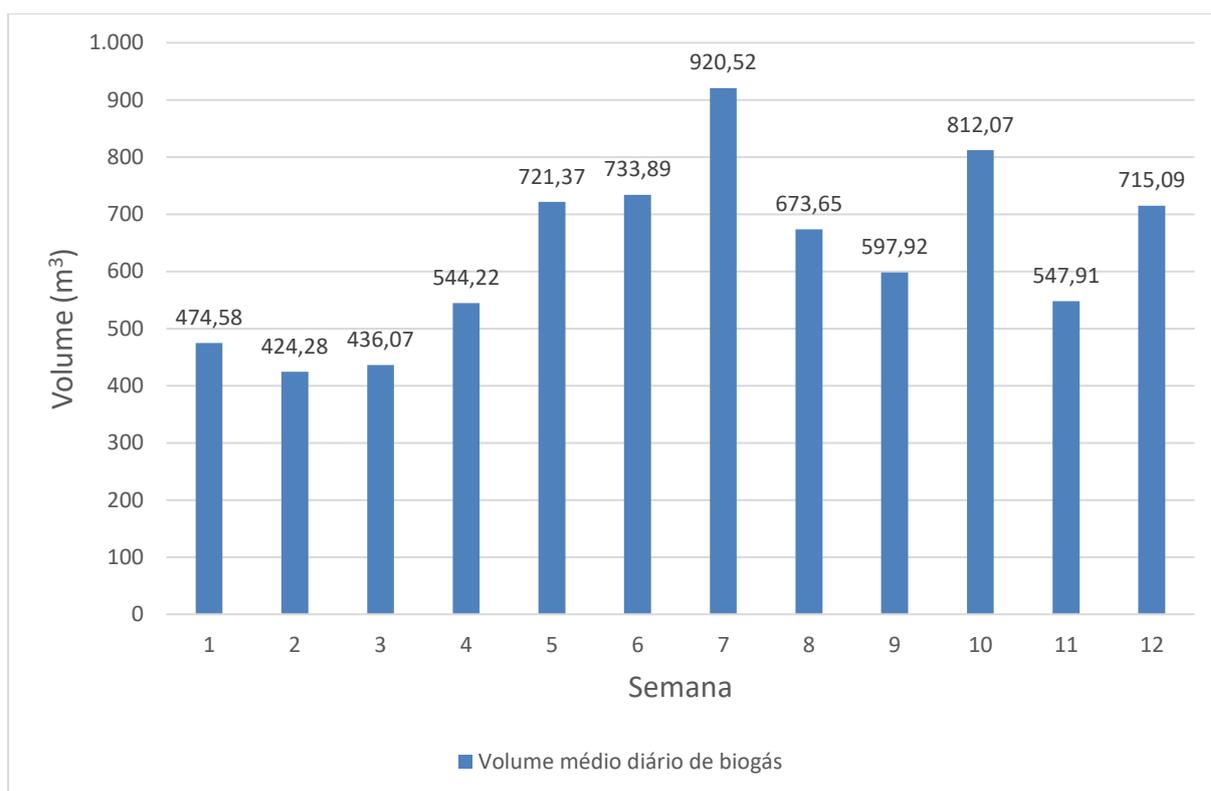


Figura 21 - Volume médio diário de biogás produzido pela planta no período monitorado

Fonte: A autora.

Conforme observações de Souza *et al.* (2008), a redução do TRH proporciona maior produção volumétrica de metano devido à maior carga orgânica volumétrica. Isso pode ser observação na Figura 21, pois há uma tendência de aumento da produção de biogás ao longo do crescimento dos suínos da granja terminação. Com o crescimento e engorda dos suínos, aumenta-se o volume de dejetos e diminui-se o TRH no biodigestor, potencializando, desse modo, a produção volumétrica de biogás.

## 4.6 PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Assim como a produção de biogás, a produção de energia elétrica depende das horas de operação do grupo gerador, sem horário fixo de produção. Os dados também foram tratados de forma semanalmente, calculando-se a média a cada sete dias.

Tabela 11 - Valores obtidos para a produção de energia elétrica da planta

Variável	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Energia Elétrica kWh.dia <sup>-1</sup>	851,10	206,99	599,43	1293,14
Relação kWh.m <sup>-3</sup>	1,37	0,07	1,23	1,46

Fonte: A autora.

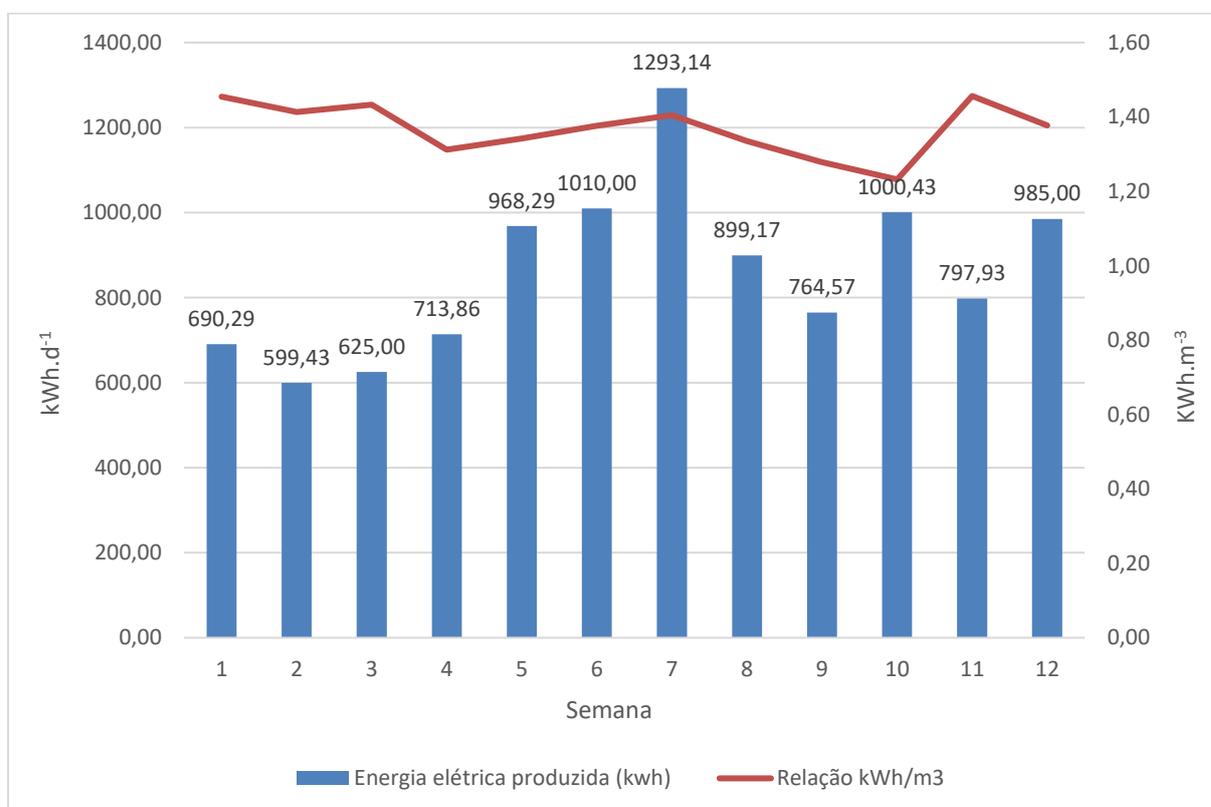


Figura 22 - Produção de energia elétrica da planta durante o período de monitoramento

Fonte: A autora.

A relação entre energia elétrica produzida por volume de biogás consumido

obteve média de  $1,37 \text{ kWh.m}^{-3}$ . Esse valor condiz com o valor reportado por ER\_BR (2017 *apud* COELHO *et al.*, 2018), em que onde um motor de potência 77 kW, operando com biogás de 53% metano, equivalendo a PCI de  $4.500 \text{ Kcal.Nm}^{-3}$  ( $5,23 \text{ kWh.Nm}^{-3}$ ), apresenta uma relação de  $1,35 \text{ kWh.Nm}^{-3}$ .

#### 4.7 BALANÇO DE ENERGIA DO GRUPO GERADOR

A taxa de desempenho do grupo gerador é determinada pela razão entre a energia elétrica produzida e a energia do biogás, estimada pelo PCI do biogás.

Utilizaram-se as médias diárias de produção de energia elétrica e volume de biogás, e o biogás com concentração de metano de 57,5%, que equivale à PCI de  $5,7 \text{ kWh.m}^{-3}$ .

A eficiência média obtida na conversão do biogás em energia elétrica para a planta foi de 23,83%, e o desempenho obtido é satisfatório.

Tabela 12 - Valores obtidos para eficiência do grupo gerador

Variável	Média %	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Eficiência (%)	23,83	0,01	22,14	26,50

Fonte: A autora.

Segundo os fabricantes, a eficiência de conversão do biogás em energia elétrica para motores ciclo Otto é de aproximadamente 25% (CCE, 2000 *apud* SOUZA; PEREIRA; PAVAN, 2004), mas esse valor pode variar bastante dependendo das características do motor.

Silva (2015a), por meio de ensaios de eficiência para um motor MWM 6 cilindros operando a 70 kW, obteve eficiência global de 17%. Em situação similar, Souza *et al.* (2016) verificaram, para um motor Otto de 100kva operando a 70 kW, um consumo específico de  $0,76 \text{ m}^3.\text{kWh}^{-1}$  e eficiência de 21,84%. Ambos demonstram que, com o aumento da carga, melhora-se a eficiência do sistema, uma vez que se diminui o consumo específico de combustível ( $\text{m}^3.\text{kWh}^{-1}$ ).

Para motores diesel transformados em ciclo Otto, como é o caso deste estudo, a razão de compressão tem grande influência no desempenho do sistema.

Os motores passam por alterações no sistema de alimentação e mistura do ar + combustível, e é desejável que a razão de compressão do motor seja aumentada para proporcionar um menor consumo de combustível e uma maior potência (SILVA; TREVISAN, 2019).

Portanto, ao se comparar a eficiência de diferentes motores, é necessário conhecer a tecnologia empregada, as alterações realizadas nos motores, a faixa de operação etc., pois essas características têm grande influência no desempenho dos mesmos.

Ademais, os valores obtidos para este estudo foram gerados a partir de médias de produção observadas em campo. Esses valores podem diferir de ensaios específicos de eficiência, em que as variáveis são controláveis.

#### 4.8 CONSUMO ENERGÉTICO DOS EQUIPAMENTOS

A bomba de entrada de afluentes teve a sua vazão determinada a partir do controle do tempo e volume de dejetos enviados em um dia de operação. O proprietário observou o consumo de 13kg de GLP em 20 dias.

A bomba de saída teve sua vazão determinada no ponto final da tubulação, em um reservatório na área de cultivo de grãos, distante 500m com ganho de elevação 20m. O consumo de combustível de 6L de diesel por hora foi observado pelo produtor.

Tabela 13 – Consumo energético dos equipamentos em kWh.d<sup>-1</sup>

Equipamento	Consumo	Vazão	Período	Consumo kWh.d <sup>-1</sup>
Bomba de entrada	64,87 kWh.h <sup>-1</sup>	48,37 m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	0,13h	8,45*
Bomba de saída	60,26 kWh.h <sup>-1</sup>	13,50 m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	2,27 h	137,04*
Bomba de Agitação	2,60 kWh.h <sup>-1</sup>		3 h	7,80
Dessulfurizador	0,38 kWh.h <sup>-1</sup>		24h	8,83
Total				162,12*

Fonte: A autora.

\* média

Todos os consumos estão representados na Tabela 13 em kWh.h<sup>-1</sup>. Observando-se o tempo de operação diária de cada equipamento, foi possível obter o consumo diário. As bombas de entrada e saída dependem do volume de dejetos, já a bomba de agitação e o dessulfurizador independem.

O consumo diário médio dos equipamentos totalizou 162,12 kWh. A maior parte desse consumo acontece na bomba utilizada para transportar o biofertilizante para a lavoura. O estudo de Dennehy *et al.* (2017) também aponta que o custo do descarte do biofertilizante, em particular para as plantas de codigestão, é o fator de maior peso nas despesas operacionais da planta.

A elevação do reservatório de destino implica grande perda de carga, resultando em baixa vazão da bomba. Devido às características geográficas do local e às necessidades da planta, não é possível direcionar o biofertilizante para outro local. Além disso, o transporte desse material não pode ser excluído da análise, pois, conforme definido nos limites do sistema, item 3.6 do capítulo anterior, a biomassa é transportada para a planta de propriedades vizinhas com o objetivo de produzir energia elétrica, e seu retorno também deve ser considerado.

No entanto, entende-se que é possível diminuir a energia consumida pelos equipamentos com a substituição da bomba de saída do efluente para equipamentos mais eficientes.

#### 4.9 DESEMPENHO DA PLANTA

Para realizar o balanço de energia da planta conforme apresentado na Figura 16 do item 3.9, é necessário estimar a energia contida na biomassa, a partir do cálculo que relaciona a quantidade de sólidos voláteis do substrato com sua capacidade máxima de produção de metano.

É preferível que seja realizado teste de PBM para determinar B<sub>0</sub> de cada substrato, pois a produção de metano depende da concentração e da qualidade dos sólidos voláteis do dejetos. Além disso, a cogeração potencializa a produção de metano, de fato que a soma da energia dos diferentes dejetos não aborda esse fator. Porém, na falta de valores reais de B<sub>0</sub>, adotaram-se os seguintes valores observados em pesquisas brasileiras:

- Suíno terminação: 0,303 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>.kg<sub>SV</sub><sup>-1</sup> (AMARAL, 2017);

- Suíno Creche:  $0,642 \text{ m}^3_{\text{CH}_4} \cdot \text{kg}_{\text{SV}}^{-1}$  (AMARAL, 2017);
- Bovino:  $0,395 \text{ m}^3_{\text{CH}_4} \cdot \text{kg}_{\text{SV}}^{-1}$  (MATINC *et al.*, 2017).

Estimou-se a média diária da energia contida na biomassa introduzida nos biodigestores, utilizando-se as informações de Sólidos Voláteis de cada substrato e o volume médio diário.

É importante observar que a soma das energias das diferentes biomassas não considera os efeitos da codigestão, que, segundo Matinc *et al.* (2017), potencializa a produção do biogás e a concentração de metano, em relação à digestão isolada dos substratos.

Tabela 14 - Estimativa diária da energia da contida na biomassa (Ebm) de alimentação dos biodigestores em kWh.d<sup>-1</sup>

Semana	Ebm Bovino	Ebm Creche	Ebm Terminação	Total kWh.d <sup>-1</sup>
1	183,05	2076,34	665,25	2924,64
2	183,05	2076,34	887,00	3146,39
3	183,05	2076,34	1117,62	3377,01
4	0,00	2076,34	1206,32	3282,66
5	0,00	1926,50	1330,50	3257,00
6	0,00	2076,34	1995,06	4071,39
7	183,05	0,00	2110,90	2293,95
8	183,05	0,00	2188,13	2371,18
9	183,05	0,00	2381,20	2564,25
10	162,80	1598,99	1469,31	3231,10
11	162,80	1325,66	1176,56	2665,02
12	497,37	816,34	1042,52	2356,22
<b>Média</b>				<b>2961,73</b>

Fonte: A autora.

Tabela 15 - Fluxos energéticos que atravessam o limite do sistema

Fluxo	Entrada (kWh.d <sup>-1</sup> )	Saída (kWh.d <sup>-1</sup> )
Ebm	2.961,73	
Eequip.	162,12	
Energia elétrica		851,10
Total	3.123,85	851,10

Fonte: A autora.

Para o cálculo do balanço de energia da planta, foram utilizadas as médias obtidas durante o período de monitoramento, conforme destaca a Tabela 15. A média obtida para a energia contida na biomassa foi de 2961,73 kWh.d<sup>-1</sup>, a média de energia elétrica produzida foi de 851,10 kWh.d<sup>-1</sup> e a energia consumida pelos equipamentos foi de 162,12 kWh.d<sup>-1</sup>.

A relação entre entrada e saída de energia por meio da fronteira do sistema foi de 0,2724, o que indica eficiência de 27,24% no aproveitamento de energia da planta.

Além das relações de entrada e saída definidas para o limite do sistema, é importante relacionar a energia fornecida ao sistema, por meio do consumo dos equipamentos, e a energia produzida. Essa relação é de 0,1946, ou seja, os equipamentos necessários ao funcionamento da planta consomem 19,46% da energia produzida pela planta.

Plantas com maior nível tecnológico costumam desfavorecer essa relação, como é o caso reportado por Havukainen *et al.* (2014), cuja relação é de 38% para uma planta na Finlândia. No estudo realizado por Piñas *et al.* (2018), a energia elétrica consumida no sistema por equipamentos como misturados, bombas, transporte de silagem e dessulfurização, que dependem do volume de biomassa adicionado no biodigestor, o consumo de eletricidade corresponde de 10,7% a 9,4% para sistemas de monodigestão, de 6,8% a 5,5%, e 6,6% a 5,7% em sistemas de codigestão.

A Figura 23 ilustra de forma resumida o desempenho da planta analisada neste estudo. Apesar de ser considerada de baixo nível tecnológico, os resultados obtidos são satisfatórios. A codigestão tem grande influência no desempenho apresentado pelos biodigestores, e, conseqüentemente, na eficiência da planta.

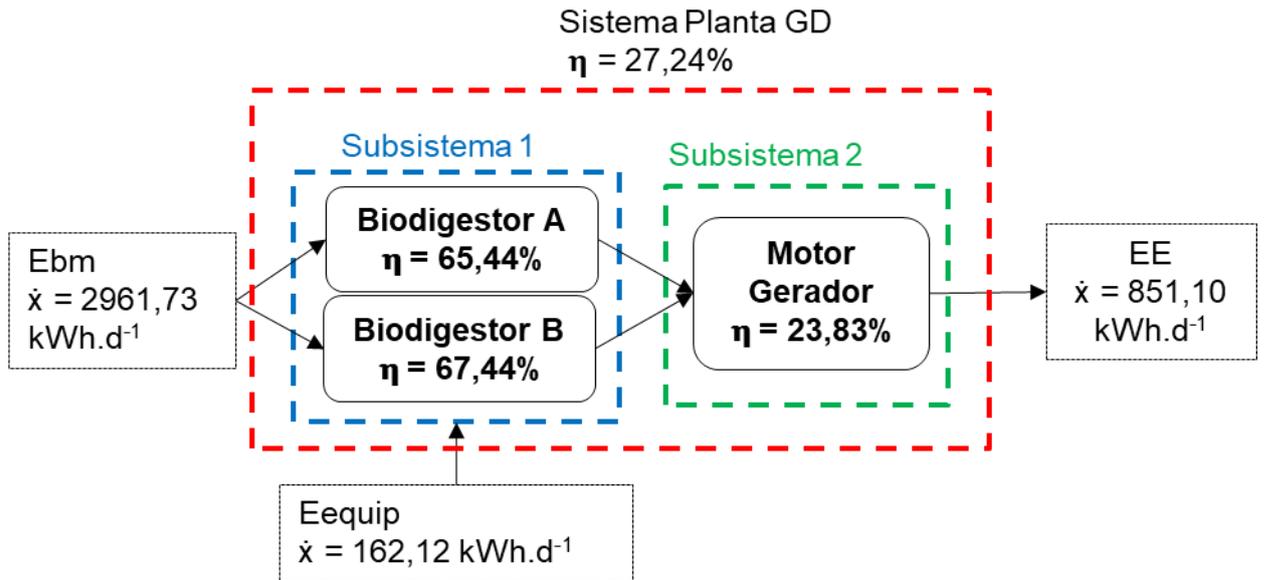


Figura 23 - Fluxo energético da planta de produção de energia elétrica a biogás.

Fonte: A autora.

## 5 CONCLUSÃO

Na região Oeste do Paraná, observam-se diferentes configurações de plantas, com diferentes modelos de biodigestores, e o uso da codigestão já é bastante empregado. Realizar o balanço energético para diferentes sistemas pode auxiliar na identificação das configurações mais eficientes e mais adequadas à realidade do produtor rural e da região.

O desempenho da digestão anaeróbia identificado na planta avaliada por esta pesquisa é similar a outras avaliações em plantas reais no Brasil. A produção de biogás apresenta grande variabilidade, e a qualidade do biogás em termos de concentração de metano está abaixo do desejado. O processo apresenta desequilíbrio, causado pela baixa concentração de sólidos do substrato. Apesar dos problemas identificados, o desempenho é satisfatório. Os indicadores sugerem que a produção e a qualidade do biogás podem ser melhoradas fazendo uma melhor distribuição dos substratos entre os biodigestores.

Já a eficiência de 23,8% do motor gerador condiz com os valores indicados na literatura para o motor Otto adaptado para biogás, porém, esse conjunto pode ter sua vida útil comprometida pela alta concentração de  $H_2S$  presente no biogás, pois o sistema de limpeza do biogás utilizado é insuficiente.

A planta envolve poucos equipamentos na produção de biogás e de energia elétrica, no entanto, esses consomem o equivalente a 19,46% da energia produzida. O valor pode ser reduzido substituindo-se alguns equipamentos por outros mais eficientes. É importante ressaltar que melhorias nos biodigestores, com a introdução de sistemas de agitação ou a adição de mais matéria orgânica que necessite de transporte, devem ser muito bem analisadas, pois o ganho em produção de biogás pode não ser suficiente para compensar o gasto energético.

O trabalho desenvolvido em campo identificou dificuldades para obter dados do processo de produção enfrentadas pelos proprietários de plantas, tanto pela falta de equipamentos adequados, quanto pela falta de acesso a serviços de laboratório. A metodologia utilizada neste estudo buscou formas simples de execução e de baixo custo, as quais podem ser replicadas em outras plantas.

Espera-se que, com a análise de outras plantas na região, observando-se os mesmos limites de abordagem, seja possível a comparação de diferentes projetos e arranjos de plantas rurais a biogás.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHLBERG-ELIASSON, K.; NADEAU, E.; LEVÉN, L.; SCHNÜRER, A. Production efficiency of Swedish farm-scale biogas plants. **Biomass and Bioenergy**, v. 97, p. 27–37, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.12.002>.

AMARAL, A. C. **Digestão anaeróbia de dejetos suíno: potencial bioquímico de metano e a influência de estratégias operacionais**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Micro e minigeração distribuída: sistema de compensação de energia elétrica**. 2.ed. Brasília: ANEEL, 2016.

ANGONESE, A. R.; CAMPOS, A. T.; PALACIO, S. M.; SZYMANSKI, N. Avaliação da eficiência de um biodigestor tubular na redução da carga orgânica e produção de biogás a partir de dejetos de suínos. *In: 6º ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL. Anais [...]*. Campinas, 2006, p. 1-7. Disponível em: [http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022006000100022&script=sci\\_arttext&tlng=pt](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022006000100022&script=sci_arttext&tlng=pt). Acesso em: 13 jul. 2020.

ANTONIOLIMA. **Geração Térmica**. Página inicial. 20? Disponível em: <http://www.antoniolima.web.br.com/arquivos/podercalorifico.htm>. Acesso em: 15 fev. 2021

BARRETO, E. J. F.; RENDEIRO, G.; NOGUEIRA, M. **Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida: Soluções Energéticas para a Amazônia**. Brasília - DF: Ministério de Minas e Energia, 2008.

BATSTONE, D. J.; KELLER, J.; ANGELIDAKI, I.; KALYUZHNYI, S. V.; PAVLOSTATHIS, S. G.; ROZZI, A.; SANDERS, W. T.; SIEGRIST, H.; VAVILIN, V. A. The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1). **Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research**, v. 45, n. 10, p. 65–73, 2002. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0292>.

BERGLUND, M.; BORJESSON, P. Assessment of energy performance in the life-cycle of biogas production. **Biomass and Bioenergy**, v. 30, p. 254–266, 2006. DOI 10.1016/j.biombioe.2005.11.011.

BERTINATTO, R. **Análise da contaminação e degradação do óleo lubrificante e desgaste de um motor otolizado alimentado por biogás**. 2014. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2014.

BOND, T.; TEMPLETON, M. R. History and future of domestic biogas plants in the developing world. **Energy for Sustainable Development**, v. 15, n. 4, p. 347–354, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2011.09.003>.

BORSCHIVER, S.; SILVA, A. L. R. DA. Mapeamento tecnológico para purificação de biogás e seu aproveitamento: panorama mundial e iniciativas nacionais. *In: XX*

CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA. **Anais [...]**. São Paulo, 2014, p. 8757–8765. DOI: <https://doi.org/10.5151/chemeng-cobeq2014-1453-19217-143735>.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. Brasília: MME/EPE, 2017.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética **Plano Decenal de Expansão de Energia 2029**. Brasília: MME/EPE, 2020.

COELHO, S. T.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; MARTINS, O. S.; ABREU, F. C. de. A conversão da fonte renovável biogás em energia. *In: V CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO*. **Anais [...]**, Brasília, 2006.

COELHO, S. T.; GARCILASSO, V. P.; JUNIOR, A. D. N. F.; SANTOS, M. M.; JOPERT, C. L. **Tecnologias de produção e uso de biogás e biometano** : Part. I Biogás; Part. II Biometano. São Paulo: Synergia editora, 2018.

COIMBRA-ARAÚJO, C. H.; MARIANE, L.; JÚNIOR, C. B.; FRIGO, E. P.; FRIGO, M. S.; ARAÚJO, I. R. C.; ALVES, H. J. Brazilian case study for biogas energy: Production of electric power, heat and automotive energy in condominiums of agroenergy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 40, p. 826–839, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.024>.

D'AQUINO, C. A.; MELLO, T. C.; COSTA JUNIOR, L. Efeito da variação da carga orgânica volumétrica natural na produção de biogás a partir de dejetos suínos em diferentes tempos de retenção hidráulica. **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 3, p. 613-617, 2019. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-41522019000300613&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522019000300613&lng=en&nrm=iso). Acesso em: 15 out. 2020.

DEBIASI, L.; MALINOWSKY, C.; RESTREPO, J. J. B.; BONATTO, I. da C.; JUNIOR, A. B. de C. Avaliação dos parâmetros: Ph, acidez e alcalinidade durante a fase acidogênica da digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos. *In: CONGRESSO SUL-AMERICANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUSTENTABILIDADE*. **Anais [...]**. Gramado: IBEAS - Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 2018, p. 1–7.

DENNEHY, C.; LAWLOR, P. G.; GARDINER, G. E.; JIANG, Y.; SHALLOO, L.; ZHAN, X. Stochastic modelling of the economic viability of on-farm co-digestion of pig manure and food waste in Ireland. **Applied Energy**, v. 205, p. 1528-1537, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.101>.

FEIDEN, A.; REICHL, J.; SCHWAB, J.; SCHWAB, V. Avaliação da Eficiência de um Biodigestor Tubular na Produção de Biogás a partir de Águas Residuárias de Suinocultura. *In: AGRENER - ENCONTRO DE ENERGIA NA MEIO RURAL E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA*. **Anais [...]**. Campinas, 2004, p. 7. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/pdf/agrener/n5v1/020.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2020.

FERREIRA, L. R. A.; OTTO, R. B.; SILVA, F. P.; SOUZA, S. N. M.; SOUZA, S. S.; ANDO JUNIOR, O. H. Review of the energy potential of the residual biomass for the

distributed generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, p. 440–455, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.034>.

FREITAS, F. F.; DE SOUZA, S. S.; FERREIRA, L. R. A.; OTTO, R. B.; ALESSIO, F. J.; DE SOUZA, S. N. M.; VENTURINI, O. J.; ANDO JUNIOR, O. H. The Brazilian market of distributed biogas generation: Overview, technological development and case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 101, p. 146–157, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.007>.

GAIDA, D.; WOLF, C.; BONGARDS, M. Feed control of anaerobic digestion processes for renewable energy production: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, p. 869–875, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.096>.

GARCEZ, C. A. G. What do we know about the study of distributed generation policies and regulations in the Americas? A systematic review of literature. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 1404–1416, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.129>.

HAKAWATI, R.; SMYTH, B. M.; MCCULLOUGH, G.; DE ROSA, F.; ROONEY, D. What is the most energy efficient route for biogas utilization: Heat, electricity or transport? **Applied Energy**, v. 206, p. 1076–1087, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.068>.

HANSEN, T. L.; SCHMIDT, J. E.; ANGELIDAKI, I.; MARCA, E.; JANSEN, J. L. C.; MOSBÆK, H.; CHRISTENSEN, T. H. Method for determination of methane potentials of solid organic waste. **Waste Management**, v. 24, n. 4, p. 393–400, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2003.09.009>.

HAVUKAINEN, J.; UUSITALO, V.; NISKANEN, A.; KAPUSTINA, V.; HORTTANAINEN, M. Evaluation of methods for estimating energy performance of biogas production. **Renewable Energy**, v. 66, p. 232–240, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.12.011>.

HORVÁTH, I. S.; TABATABAEI, M.; KARIMI, K.; KUMAR, R. Recent updates on biogas production - A review. **Biofuel Research Journal**, v. 3, n. 2, p. 394–402, 2016. DOI 10.18331/BRJ2016.3.2.4.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Agriculture, forestry and other land use. *In*: IGES. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Japan: IGES, 2006, p. 10.1–10.87.

KAFLE, G. K.; CHEN, L. Comparison on batch anaerobic digestion of five different livestock manures and prediction of biochemical methane potential (BMP) using different statistical models. **Waste Management**, v. 48, p. 492–502, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.10.021>.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. do (eds.). **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Concórdia, SC: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2019. DOI:

<https://doi.org/10.21452/978-85-93823-01-5.2019.01>.

LINS, M. A. **Efeito da carga orgânica volumétrica sobre a produção de biogás utilizando-se dejetos de suíno em diferentes configurações de reatores anaeróbios**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017.

MACHTIG, T.; MOSCHNER, C. R.; HARTUNG, E. Monitoring the efficiency of biogas plants-Correlation between gross calorific value and anaerobically non-degradable organic matter of digestates. **Biomass and Bioenergy**, v. 130, p. 105389, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105389>.

MATINC, C.; TONETTO, J. F.; HASAN, C.; KONRAD, O. Potencial de produção de biogás a partir da Co-digestão de dejetos da suinocultura e bovinocultura. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 8, n. 4, p. 154–161, 2017. DOI: <https://doi.org/10.6008/spc2179-6858.2017.004.0013>.

MENDONÇA, E. F. **Tratamento anaeróbico dos efluentes oriundos da bovinocultura de leite em biodigestor tubular**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2009.

MITO, J. Y. de L.; KERKHOFF, S.; SILVA, J. L. G.; VENDRAME, M. G.; STEINMETZ, R. L. R.; KUNZ, A. **Metodologia para estimar o potencial de biogás e biometano a partir de plantéis suínos e bovinos no Brasil**. Concórdia, SC: Embrapa Suínos e Aves, 2018.

NISHIMURA, R. **Análise de balanço energético de sistema de produção de biogás em granja de suínos: implementação de aplicativo computacional**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande 2009.

NSAIR, A.; CINAR, Ö.; QDAIS, H. A.; KUCHTA, K. Optimizing the performance of a large scale biogas plant by controlling stirring process: A case study. **Energy Conversion and Management**, v. 198, p. 111931, 2019. DOI [10.1016/j.enconman.2019.111931](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111931).

OLIVEIRA, P. A. V. de; HIGARASHI, M. M. **Geração e utilização de biogás em unidades de produção de suínos**. Concórdia, SC: Embrapa Suínos e Aves, 2006. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/58216/1/doc115.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2019.

OLIVEIRA, L. G. S.; NEGRO, S. O. Contextual structures and interaction dynamics in the Brazilian Biogas Innovation System. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 107, p. 462–481, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.030>. Acesso em: 21 abr. 2020.

ORRICO JÚNIOR, M. A. P.; ORRICO, A. C. A.; LUCAS JÚNIOR, J. Produção animal e o meio ambiente: uma comparação entre potencial de emissão de metano dos dejetos e a quantidade de alimento produzido. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.

31, n. 2, p. 399-410, 2011. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-69162011000200020&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162011000200020&lng=en&nrm=iso). Acesso em: 26 jan. 2021.

PELLIZZER, E. L. **Otimização da produção de biogás utilizando aquecimento e agitação com automação de biodigestores**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017.

PIÑAS, J. A. V.; VENTURINI, O. J.; LORA, E. E. S.; ROALCABA, O. D. C. Technical assessment of mono-digestion and co-digestion systems for the production of biogas from anaerobic digestion in Brazil. **Renewable Energy**, v. 117, p. 447–458, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.085>.

PÖSCHL, M.; WARD, S.; OWENDE, P. Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways. **Applied Energy**, v. 87, n. 11, p. 3305–3321, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.05.011>.

QED Environmental Systems, Inc., GEM5000 Gas analyzer operating manual, Dexter, MI. Disponível em: [http://www.geotechenv.com/Manuals/CES-Landtec\\_Manuals/GEM5000\\_Manual.pdf](http://www.geotechenv.com/Manuals/CES-Landtec_Manuals/GEM5000_Manual.pdf). Acesso em: 15 out. 2019.

QUADROS, D. G. de; OLIVER, A. de P. M.; REGIS, U.; VALLADARES, R.; SOUZA, P. H. F. de; FERREIRA, E. de J. Anaerobic digestion of goat and sheep wastes in a continuous reactor of flexible PVC. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 3, p. 326–332, 2010. DOI 10.1590/s1415-43662010000300014.

RAVINA, M.; CASTELLANA, C.; PANEPINTO, D.; ZANETTI, M. C. MCBioCH<sub>4</sub>: A computational model for biogas and biomethane evaluation. **Journal of Cleaner Production**, v. 227, p. 739–747, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.224>.

RICARDO, C. M.; CAMPOS, A. T.; MARIN, D. B.; VELOSO, A. V.; MATTIOLI, M. C. Avaliação econômica de um sistema de tratamento de resíduos da suinocultura contendo biodigestores tubulares. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 26, n. 6, p. 516–525, 2018. DOI: 10.13083/reveng.v26i6.799.

SANTOS, M. V. dos. **Principais problemas dos motores a biogás e tecnologias de biometanização**: estudo de caso. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Taubaté, Taubaté, 2016.

BERTINATTO, R. **Análise da contaminação e degradação do óleo lubrificante e desgaste de um motor ottolizado alimentado por biogás**. 2014. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2014.

SCHIEVANO, A.; POGNANI, M.; D'IMPORZANO, G.; ADANI, F. Predicting anaerobic biogasification potential of ingestates and digestates of a full-scale biogas plant using chemical and biological parameters. **Bioresource Technology journal**, v. 99, n. 17, p. 8112–8117, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.05.011>.

[//doi.org/10.1016/j.biortech.2008.03.030](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.03.030).

SCHIEVANO, A.; D'IMPORZANO, G.; SALATI, S.; ADANI, F. On-field study of anaerobic digestion full-scale plants (Part I): An on-field methodology to determine mass, carbon and nutrients balance. **Bioresource Technology journal**, v. 102, 2011a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.06.006>.

SCHIEVANO, A.; ORZI, V.; ADANI, F. On-field study of anaerobic digestion full-scale plants (Part II): New approaches in monitoring and evaluating process efficiency **Bioresource Technology journal**, v. 102, 2011b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.07.012>.

SILVA, A. C. G.; TREVISAN, G. D. M. Processo de produção e aproveitamento energético do biogás: uma revisão dos sistemas e tecnologias existentes no mercado. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 10, n. 2, p. 197–210, 2019. DOI: <https://doi.org/10.6008/cbpc2179-6858.2019.002.0017>.

SILVA, F. P. **Eficiência energética de uma unidade de microgeração de energia elétrica a partir do biogás da suinocultura**. 2015a. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2015.

SILVA, F. P.; BOTTON, J. P.; NELSON, S.; SOUZA, M. De; MARCOS, A.; HACHISUCA, M. Parâmetros Físico-Químicos na Operação de Biodigestores para Suinocultura. **Revista Tecnológica**, Edição Especial 2014, p. 33–41, 2015b. DOI: <https://doi.org/10.4025/revtecnol.v0i0.25893>.

SOARES, C. M. T.; FEIDEN, A.; TAVARES, S. G. Fatores que influenciam o processo de digestão anaeróbia na produção de biogás. **Nativa**, v. 5, p. 509–514, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5935/2318-7670.v05nespa10>.

SORDI, A.; SILVA, E. P. da; LOPES, D. G.; SOUZA, S. N. M. de. Análise termodinâmica de um ciclo de potência com célula a combustível sofc e turbina a vapor. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 28, n. 1, p. 65–71, 2006. DOI: <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v28i1.1287>.

SOUZA, C. F.; CAMPOS, J. A.; SANTOS, C. R.; BRESSAN, W. S.; MOGAMIS, C. A. Produção Volumétrica de Metano – Dejetos de Suínos. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 1, p. 219-224, 2008.

SOUZA, S. N. M. de; PEREIRA, W. C.; PAVAN, A. A. Custo da eletricidade gerada em conjunto motor gerador utilizando biogás da suinocultura. *In*: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, Campinas. **Anais [...]**. CAMPINAS: [s. n.], 2004. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/pdf/agrener/n5v1/042.pdf>. Acesso em: 2 set. 2019.

SOUZA, S. N. M.; LENZ, A. M.; WERNCKE, I.; NOGUEIRA, C. E. C.; ANTONELLI, J.; SOUZA, J. Gas emission and efficiency of an engine-generator set running on biogas. **Engenharia Agricola**, v. 36, n. 4, p. 613–621, 2016. DOI: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n4p613-621/2016.

STRUCHTRUP, H. **Thermodynamics and Energy Conversion**, Victoria, BC: Springer, 2014. DOI: [https://doi.org/DOI 10.1007/978-3-662-43715-5](https://doi.org/DOI%2010.1007/978-3-662-43715-5).

STÜRMER, B.; LEIERS, D.; ANSPACH, V.; BRÜGGING, E.; SCHARFY, D.; WISSEL, T. Agricultural biogas production: A regional comparison of technical parameters. **Biomass and Bioenergy**, v. 164, p. 171-182, 2021. DOI 10.1016/j.renene.2020.09.074.

STÜRMER, B.; SCHMID, E.; EDER, M. W. Impacts of biogas plant performance factors on total substrate costs. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, p. 1552-1560, 2011. DOI: 10.1016/j.renene.2020.09.074.

TAVARES, J. M. R. **Consumo de água e produção de dejetos na suinocultura**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

TOBO, Y. M.; REHMAN, U.; BARTACEK, J.; NOPENS, I. Partial integration of ADM1 into CFD: understanding the impact of diffusion on anaerobic digestion mixing. **Water Science and Technology**, v. 81, n. 8, p. 1658-1667, 2020. DOI: 10.2166/wst.2020.076.

WALLA, C.; SCHNEEBERGER, W. The optimal size for biogas plants. **Biomass and Bioenergy** v. 32, n. 6, p. 551-557, 2008. DOI: 10.1016/j.biombioe.2007.11.009.

WEBER, R. Produção de biogás com relação ao teor de sólidos voláteis dos dejetos de bovinocultura de leite. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 3, n. 1, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5380/rber.v3i1.33912>.

YIN, Y.; MA, Z.; NONG, G.; WANG, S. Strategies of energy management in a cassava starch plant for increasing energy and economic efficiency. **Journal of Cleaner Production**, v. 234, p. 1296–1305, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.309.