

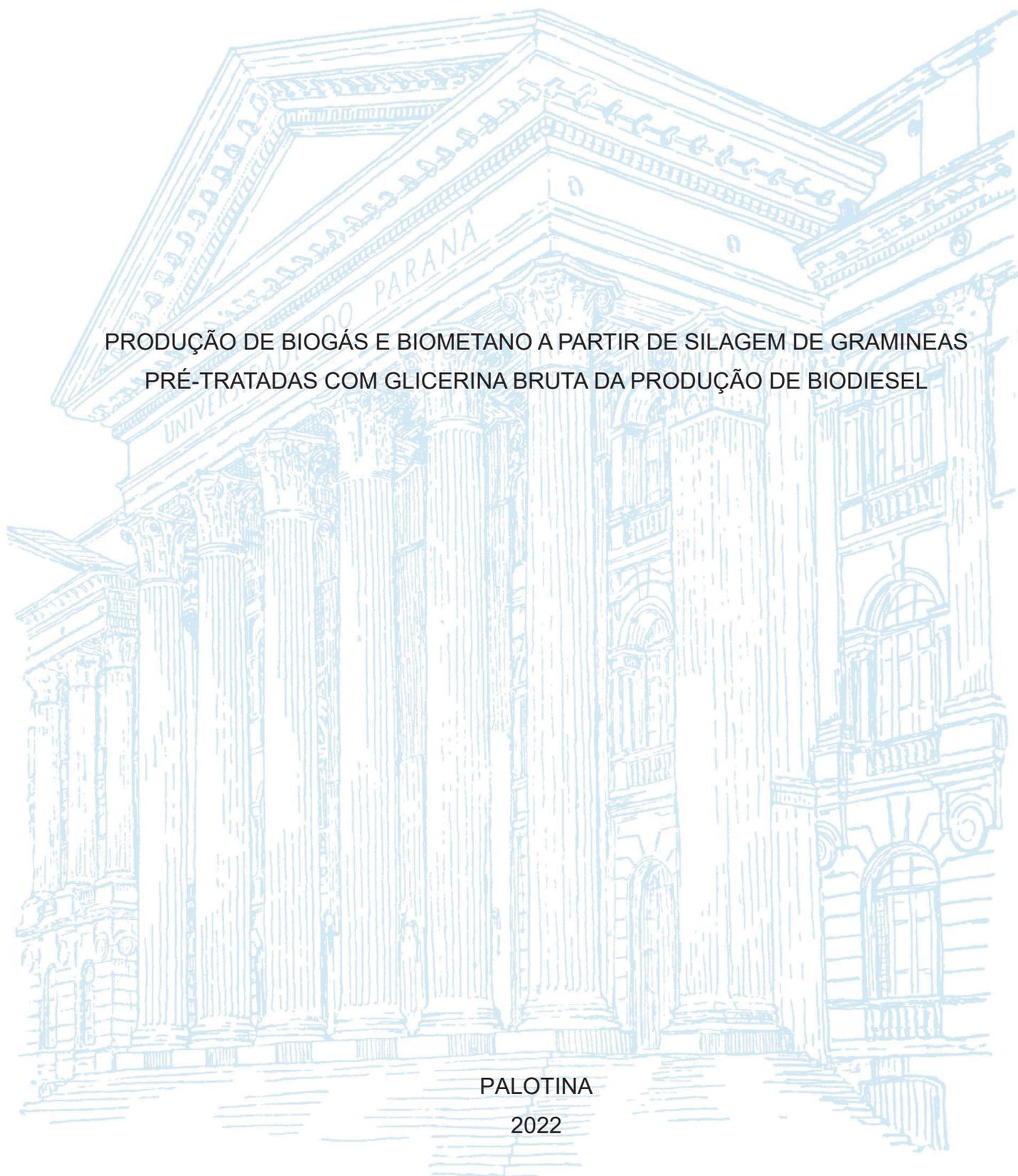
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ERNESTO RODRIGO BAUTE ESPÍNDOLA

PRODUÇÃO DE BIOGÁS E BIOMETANO A PARTIR DE SILAGEM DE GRAMINEAS  
PRÉ-TRATADAS COM GLICERINA BRUTA DA PRODUÇÃO DE BODIESEL

PALOTINA

2022



ERNESTO RODRIGO BAUTE ESPÍNDOLA

PRODUÇÃO DE BIOGÁS E BIOMETANO A PARTIR DE SILAGEM DE GRAMINEAS  
PRÉ-TRATADAS COM GLICERINA BRUTA DA PRODUÇÃO DE BODIESEL

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Bioenergia, Setor de Palotina, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Bioenergia.

Orientador: Prof. Dr. Jonathan Dieter

Coorientador: Prof. Dr. Jiam Pires Frigo

PALOTINA

2022

Universidade Federal do Paraná. Sistemas de Bibliotecas.  
Biblioteca UFPR Palotina.

E77 Espíndola, Ernesto Rodrigo Baute  
Produção de biogás e biometano a partir de silagem de gramíneas  
pré-tratadas com glicerina bruta da produção de biodiesel / Ernesto  
Rodrigo Baute Espíndola.– Palotina, PR, 2022.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná,  
Setor Palotina, PR, Programa de Pós-Graduação em Bioenergia.  
Orientador: Prof. Dr. Jonathan Dieter.  
Coorientador: Prof. Dr. Jiam Pires Frigo.

1. Biogás. 2. Biodigestor. 3. Lignocelulósico. 4 Silagem.  
I. Dieter, Jonathan. II. Frigo, Jiam Pires. III. Universidade Federal  
do Paraná. IV. Título.

CDU 620.9



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR PALOTINA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO BIOENERGIA - UEL -  
UEM - UEPG - UNICENTRO - UNIOESTE - UFPR -  
40002012041P8

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação BIOENERGIA - UEL - UEM - UEPG - UNICENTRO - UNIOESTE - UFPR da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **ERNESTO RODRIGO BAUTE ESPÍNDOLA** intitulada: **PRODUÇÃO DE BIOGÁS E BIOMETANO APARTIR DE SILAGEM DE GRAMINEAS PRÉ-TRATADAS COM GLICERINA BRUTA DA PRODUÇÃO DE BIODIESEL**, sob orientação do Prof. Dr. JONATHAN DIETER, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Palotina, 28 de Fevereiro de 2022.

Assinatura Eletrônica

02/03/2022 15:54:08.0

JONATHAN DIETER

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

04/04/2022 15:41:29.0

SILVIO CESAR SAMPAIO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

02/03/2022 16:02:48.0

ELISANDRO PIRES FRIGO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Rua Pioneiro, 2153 - Palotina - Paraná - Brasil

CEP 85950-000 - Tel: (44) 3211-8529 - E-mail: ppgbioenergiaufpr@ufpr.br

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 157385

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp> e insira o código 157385

Dedico este trabajo a mis padres, María Nina y Fernando, que con amor y mucho esfuerzo, me dieron la vida y las herramientas para poder crecer como persona en este mundo. A Ana Flavia, por ser mi compañera de vida y a los papas de Ana, Eulinda y Falcão, por apoyarme y cuidarme todos estos años en el Brasil.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço principalmente a os Professores, Técnicos e Servidores que estiveram me apoiando neste trabalho, principalmente a meus orientadores pela ajuda;

A UFPR por ser uma grande universidade, orgulhoso se ter estudado nesta instituição e que a mesma tenha ajudado á UNILA se desenvolver;

A fundação CAPES por ter me apoiado no financiamento da pesquisa;

Ao povo Brasileiro por me acolher todos estes anos e pelo grande carinho;

Os nossos pais amam-nos porque somos seus filhos, é um fato inalterável. Nos momentos de sucesso, isso pode parecer irrelevante, mas as ocasiões de fracasso oferecem um consolo e uma segurança que não se encontram em qualquer outro lugar. (Russell, B. 1930, p. 249).

## RESUMO

Este trabalho busca ter uma melhor compreensão do uso da biomassa lignocelulósica para seu uso na biodigestão anaeróbia. Estamos em uma região do planeta onde a produção de biomassa é significativa, sendo necessário seu correto tratamento para que não gere problemas ambientais. No mês de fevereiro, foi identificado um terreno dentro do campus da UFPR, em Palotina, onde foram obtidos 35 quilos de capim Panicum (*Panicum maximum* cv). Este capim foi levado ao CEPER para processamento onde foi determinado o grau de umidade, seguido de 24 horas de secagem para redução da umidade. Uma vez determinada a umidade final, o capim foi processado por uma forrageira para reduzir a granulometria (1,5 cm). Uma vez determinada a quantidade de massa de capim e glicerina necessária, iniciou-se o processo de silagem dos quatro tratamentos propostos (controle, G5%, G10%, G15%) com cinco repetições, totalizando um total de 20 silos. Esses silos foram construídos com tubos de PVC utilizados na construção civil, uma vez que os reatores estivessem cheios, os silos foram fechados por quatro meses, tempo que durou o processo de ensilagem. Após o processo de ensilagem, iniciou-se o estudo da biodigestão anaeróbia da silagem de capim. Os reatores foram abertos em meados de julho, retirando-se amostras para análise e obtendo-se a quantidade de massa de silagem para incubar os reatores a serem utilizados. Os tratamentos controle e G5% começaram no final de julho e uma semana depois G10% e G15% nos biodigestores do LPB, esse processo durou entre 30 a 55 dias onde amostras de biogás foram obtidas e analisadas pelo LABMATER para determinar as taxas de metano gerado pelos tratamentos. Foi determinado que o tratamento G15% teve a maior taxa de geração de biogás, com potencial para gerar 39 m<sup>3</sup>N Biogás.Ton<sup>-1</sup>SV com taxas de metano de quase 95%. Terminado o experimento, trabalhou-se no processamento dos dados obtidos.

Palavras-chave: Silagem. Biogás. Biometano. Biodigestor. Lignocelulósico.

## ABSTRACT

This work seeks to have a better understanding of the use of lignocellulosic biomass for its use in anaerobic biodigestion. We are in a region of the planet where the production of biomass is significant, and its correct treatment is necessary so that it does not generate environmental problems. In February, a piece of land was identified within the UFPR campus, in Palotina, where 35 kilos of Panicum grass (*Panicum maximum* cv) were obtained. This grass was taken to CEPER for processing; first the degree of humidity was determined, followed by 24 hours of drying to reduce humidity. Once the final moisture content was determined, the grass was passed through forage to reduce the granulometry (1.5 cm). Once the amount of grass mass and glycerin required was determined, the silage process of the four proposed treatments was started (control, G5%, G10%, G15%) with five replications, totaling 20 silos. These silos were built with PVC pipes used in civil construction. Once the reactors were full, the silos were closed for four months, during which the ensiling process lasted. After the silage process, the study of anaerobic biodigestión of grass silage began. The reactors were opened in mid-July, taking samples for analysis and obtaining the amount of silage mass to incubate the reactors to be used. Control and G5% treatments started at the end of July and a week later G10% and G15% in the LPB biodigesters, this process lasted between 30 and 55 days when biogas samples were obtained and analyzed by LABMATER to determine the rates of methane generated by the treatments. It was determined that the G15% treatment had the highest rate of biogas generation, with the potential to generate 39 m<sup>3</sup>N Biogas.Ton<sup>-1</sup> SV with methane rates of almost 95%. After the experiment, work was done on the processing of the data obtained.

Keywords: Silage. Biogas. biomethane. Biodigester. Lignocellulosic.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Matriz Energética do Brasil de 2020 .....	21
FIGURA 2 – fases da digestão anaeróbia: hidrólise, acidogênese, acetogênese e matanogênese. ....	31
FIGURA 3 – Esquema representativo do modelo BLC .....	35
FIGURA 4 – Esquema de funcionamento do modelo UASB .....	36
FIGURA 5 – Etapas de tratamento e purificação do biogás .....	40
FIGURA 6 – Corte de Gramíneas .....	46
FIGURA 7 – Secado das Gramíneas .....	47
FIGURA 8 – Diminuição do tamanho das Gramíneas .....	48
FIGURA 9 – Amostras dos quatro tratamentos com seus cinco repetições .....	49
FIGURA 10 – Construção dos silos para silagem .....	51
FIGURA 11 – Silo Controle na hora de preenchimento .....	52
FIGURA 12 – Silos fechados já com seus tratamentos .....	53
FIGURA 13 – Apertura de silo 1G5% .....	54
FIGURA 14 – MS de silagem (Controle) .....	55
FIGURA 15 – Os reatores no Biodigestor .....	56
FIGURA 16 – Poço de extração de Digestato na granja Miotto .....	57
FIGURA 17 – Medição da quantidade de água e inóculo .....	57
FIGURA 18 – Biodigestores usados no LPB .....	58
FIGURA 19 – Cromatografo a Gás (CG) .....	59
FIGURA 20 – Apertura dos reatores depois da digestão anaeróbia .....	60
FIGURA 21 – Comparação da cor do EE% Controle .....	65
FIGURA 22 – Tratamento Controle com formação de Fungos .....	69
FIGURA 23 – Imagem Cinza Glicerina Bruta de Biodiesel .....	71
FIGURA 24 – Imagem Cinza Biofertilizante “T” .....	85
FIGURA 25 – Imagem Silagem “G5%” .....	85
FIGURA 26 – Imagem Grama “G10%” .....	86

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – Biogás na triplicata de Controle .....	72
GRÁFICO 2 – Biogás na triplicata de G5% .....	73
GRÁFICO 3 – Biogás na triplicata de G10% .....	74
GRÁFICO 4 – Biogás na triplicata de G15% .....	74
GRÁFICO 5 – Biogás Acumulado Comparação Tratamentos.....	75
GRÁFICO 6 – Geração Biogás Controle .....	87
GRÁFICO 7 – Geração Biogás G5% .....	87
GRÁFICO 8 – Geração Biogás G10% .....	88
GRÁFICO 9 – Geração Biogás G15% .....	88
GRÁFICO 10 – Gráfico estatístico Controle .....	89
GRÁFICO 11 – Gráfico estatístico G5% .....	89
GRÁFICO 12 – Gráfico estatístico G10% .....	90
GRÁFICO 13 – Gráfico estatístico G15% .....	90

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – Caracterização de biomassa Lignocelulósica.....	49
QUADRO 2 – Caracterização da silagem .....	55
QUADRO 3 – Gases analisados pelo cromatografo .....	60



## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

LPB	- Laboratório de Produção de Biocombustíveis
TECPAR	- Instituto de Tecnologia do Paraná
LABMATER	- Laboratório de Materiais e Energias Renováveis
ANCAP	- Administração Nacional de Combustíveis e Cimento Portland
CEPER	- Centro de estudos em pequenos ruminantes
ST%	- Porcentagem de Sólidos Totais
MS%	- Porcentagem de Matéria seca
SV%	- Porcentagem de Sólidos Voláteis
SF%	- Porcentagem de Sólidos Fixos
pH	- Potencial de Hidrogeno
EE%	- Extrato Etéreo
NDF	- Fibra Detergente Neutro
ADF	- Fibra Detergente Acido
PB	- Proteína Bruta
RM	- Resíduo Mineral
Ntotal	- Nitrogênio Total
DQO	- Demanda Química de Oxigênio
TOC	- Carbono Orgânico
PB	- Proteína Bruta
STS	- Sólidos Suspensos Totais
CG	- Cromatografia a Gás
MEV	- Microscopia Eletrônica de Varredura
EDS	- Energy Dispersive Spectroscopy
PC	- Poder Calorífico
Na	- Sódio
K	- Potássio
KOH	- Hidróxido de Potássio
NaOH	- Hidróxido de Sódio
TRH	- Tempo de retenção hidráulica
BLC	- Biodigestor de Lagoa Coberta
UASB	- Upflow Anaerobic Sludge Blanket
CSTR	- Continuous Stirred Tank Reactor

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	17
1.2 OBJETIVOS .....	19
1.2.1 Objetivo geral .....	19
1.2.2 Objetivos específicos.....	19
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>20</b>
2.1 BIOGÁS: ENERGIA LIMPA.....	20
2.2 BIOGAS NO BRASIL .....	21
2.3 RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS .....	23
2.4 PRÉ-TRATAMENTO E MICROBIOLOGIA APLICADA .....	27
2.4.1 Microbiologia da silagem .....	28
2.4.2 Microbiologia no biodigestor.....	30
2.4.3 Principais variáveis na biodigestão anaeróbia.....	32
2.5 TIPOS DE BIODIGESTORES COMERCIAIS .....	34
2.6 GLICERINA BRUTA DO BIODIESEL NA SILAGEM.....	37
2.7 BIOGÁS E SUBPRODUTOS DO PROCESSO.....	38
2.8 TRATAMENTO DE BIOGAS .....	40
2.9 BIBLIOGRAFIA DA EXPERIMENTAÇÃO .....	41
2.9.1 Caracterização da biomassa .....	41
2.9.2 Silos para biomassa .....	43
2.9.3 Biodigestores Experimentais .....	44
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>45</b>
3.1 LOCAL DA EXPERIMENTAÇÃO .....	46
3.2 MATÉRIA PRIMA E PREPARAÇÃO.....	47
3.2.1 Secagem da Grama coletada.....	47
3.2.2 Diminuição da granulometria da grama.....	48
3.2.3 Caracterização da matéria prima .....	49
3.2.4 Caracterização da Glicerina Bruta.....	50
3.3 ENSILAGEM DAS AMOSTAS.....	51
3.3.1 Silos para silagem de grama .....	51
3.3.2 Preparação da biomassa para ensilagem controle .....	52
3.3.3 Ensilagem dos tratamentos com glicerina 5%, 10% e 15%.....	53

3.4 APERTURA DOS SILOS.....	53
3.4.1 Caracterização do material ensilado .....	54
3.5 BIODIGESTÃO DO MATERIAL ENSILADO .....	55
3.5.1 Inoculo bacteriano .....	56
3.5.2 Preparação dos tratamentos de silagem .....	57
3.5.3 Análise do Biogás e biofertilizante.....	58
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>61</b>
4.1 ESTUDO DA SILAGEM DE GRAMINEAS .....	61
4.1.1 Perdas na silagem.....	61
4.1.2 Determinação de MS%, SV%, SF% .....	62
4.1.3 Extrato Etéreo .....	64
4.1.4 Determinação de NDF%, ADF% e PB% .....	66
4.1.5 pH.....	68
4.1.6 Análise de EDS .....	70
4.2 ESTUDO DO BIOGÁS E BIOMETANO.....	72
4.2.1 Geração Acumulada de Biogás.....	72
4.2.2 Geração acumulada comparação .....	75
4.2.3 Composição do Biogás.....	76
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>79</b>
<b>ANEXO .....</b>	<b>85</b>
FOTOS MICROSCOPIA DE VERREDURA ELETRÔNICA (EDS).....	85
CÁLCULO DA GRAMA E GLICERINA PARA SILAGEM .....	86
GERAÇÃO DE BIOGÁS.....	87
GRÁFICOS DE CORRELAÇÕES .....	89

## 1 INTRODUÇÃO

A biomassa é um material composto por resíduos sólidos urbanos, sendo estes resíduos de origem animal, vegetal, industrial e florestal, destinados à geração de energia. Para o seu aproveitamento energético, é necessário desenvolver diferentes tecnologias que possam aproveitar a energia desses resíduos, entretanto, o problema da diversificação deste tipo de bioenergia é afetado pelo preço da biomassa e pela eficiência na cadeia produtiva (CORTEZ, LUÍS AUGUSTO BARBOSA; LORA; AYARZA, 2008).

Um resíduo gerado com grande potencial para a geração de biogás é a poda de grama. Nas grandes cidades, esse tipo de resíduo é gerado sem nenhum tipo de tratamento ou geralmente na incorreta eliminação deste resíduo, gerando problemas ambientais (MINISTÉRIO DE MEIO AMBIENTE, 2012).

O crescente uso da biodigestão anaeróbia ajudaria a reduzir significativamente os resíduos orgânicos gerados nas cidades e a biomassa gerada pelas agroindústrias, reduzindo os custos monetários e ambientais da destinação final desses resíduos orgânicos, obtendo produtos com valor energético como o biogás e subprodutos com valor agregado como o biofertilizante (VARNERO, 2011), (SEPPÄLÄ *et al.*, 2009).

A Região Oeste do Paraná é uma área com importante indústria alimentícia abastecida por bovinos, ovinos e aves que geram grande quantidade de resíduos orgânicos (BIASI *et al.*, 2018). A forragem produzida para alimentação animal não é uniforme ao longo do ano, sendo necessária a silagem de forragens para poder ter alimento fresco no período de seca, onde a disponibilidade de alimento é menor (RIGUEIRA *et al.*, 2017).

No período das chuvas (outubro a março) é possível observar um desenvolvimento mais saudável dos animais, isso devido à abundância de forragem e ter melhor valor nutricional, porém, em épocas de seca (abril a setembro), a carência das chuvas gera uma diminuição significativa na produção de forragem fresca, gerando perda de peso e problemas na alimentação dos animais. Para contornar esse problema, busca-se o manejo mais inteligente de forragens, fazendo com que a silagem de forragem no período chuvoso possa ter ração para o gado na estação seca (MARI, 2003).

Esse fenômeno também ocorre com gramíneas e leguminosas que crescem naturalmente, no verão é necessário cortar a grama com muito mais frequência do que no inverno. Para a utilização desses resíduos de gramíneas na biodigestão anaeróbia, é necessária uma produção constante dessa biomassa ao longo do ano para o bom funcionamento do biodigestor.

Para este trabalho, pretende-se estudar a silagem de gramíneas com o auxílio de aditivos (glicerina bruta de biodiesel) e estudar como o aditivo ajuda a manter a biomassa fresca na estação seca. Após análise do processo de silagem de gramíneas, esta será utilizada para determinar a geração de biogás em biorreatores de bancada. Permitindo assim não só analisar o uso de um aditivo para silagem de biomassa, mas também como ele influencia na biodigestão anaeróbia.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A necessidade do tratamento da biomassa é de grande importância tanto nos grandes centros urbanos quanto no meio agrícola. Esses resíduos descartados incorretamente geram a proliferação de odores desagradáveis, pragas e poluição do ar, indo à contraposição ao plano de resíduos sólidos urbanos do Brasil que discute a destinação correta dos resíduos (MINISTÉRIO DE MEIO AMBIENTE, 2012).

O uso da biomassa na fabricação de biocombustíveis permite a utilização deste material para uso tanto na indústria para geração de calor quanto no uso automotivo (PETROBRÁS, 2007). Um dos biocombustíveis usados em automóveis é a purificação do biogás, o biometano.

O processo de biodigestão anaeróbica não deve ser tratado apenas como um processo exclusivo de obtenção de energia através do biogás e biometano, deve-se ter em mente que se trata principalmente de um processo para o correto tratamento de resíduos orgânicos (agrícolas e urbanos) reciclando nutrientes que voltam para a terra (LAMBAIS, 1992).

A biomassa como forragem é amplamente utilizada na alimentação do gado. Segundo Ribeiro, (2007), a silagem deste material permite aumentar a eficiência de uso do material em épocas de escassez de forragem, sendo este um problema que envolve as espécies vegetais localizadas nos trópicos meridionais.

O tratamento de resíduos orgânicos por meio da decomposição anaeróbia a ser aplicada em biodigestores deve atender vários parâmetros como temperatura,

pH, relação C/N, Dentre esses parâmetros, a relação carbono-nitrogênio (C/N) é a variável mais importante, pois controla o valor do pH da matéria orgânica a ser tratada (DIOHA *et al.*, 2013).

A glicerina bruta, gerada através da transesterificação de óleos e gorduras para a geração de biodiesel, pode ser aplicada em diferentes processos e fonte de carbono para a geração de biogás (MINHO *et al.*, 2012). Este subproduto da geração do biodiesel é composto por (metanol, ácidos graxos, óleo, NaOH, KOH) sendo necessário um descarte correto deste material, pois seu uso indevido pode causar problemas ambientais (ARAÚJO, 2012).

Essa glicerina também pode ser aplicada na silagem da grama para auxiliar e beneficiar a silagem (SAMPAIO, PINTO, *et al.*, 2017); por possuir alto valor carbônico, sendo considerado um carbono degradável, pode auxiliar no processo de digestão com outros materiais biodegradáveis, tornando seu uso economicamente viável (ARAÚJO, 2012). Atualmente, a silagem de capim com glicerina bruta é utilizada para alimentação do gado, gerando benefícios na pecuária como uma maior eficiência energética por hectare de grama (ORRICO JUNIOR *et al.*, 2017).

A utilização do biogás como fonte de energia e renda é de grande importância para as indústrias que geram toneladas de resíduos e são obrigadas a tratá-los, exemplo disso é dado pelos autores (ZAPPI, FORTELA, *et al.*, 2019). Eles propõe para a indústria pesqueira mudar o tratamento dos resíduos, a ideia é mudar de um tratamento aeróbio para um tratamento anaeróbio. Isto permite aproveitar o biogás gerado para diminuição do capital necessário para o tratamento desses resíduos.

A China e a Índia foram os primeiros países a utilizarem o biogás como fonte de energia, a partir da segunda metade do século XIX, eram utilizados restos de comida e dejetos em geral como matéria-prima, o biocombustível era utilizado para iluminação e cocção (KARLSSON *et al.*, 2014). O biogás pode ser uma fonte de energia elétrica e térmica, capaz de reduzir custos, contribuir para a diminuição dos impactos ambientais, ser uma fonte diversificada de renda e promover o desenvolvimento econômico de maneira sustentável.

Este trabalho não é apenas um estudo da silagem de grama para a geração de biogás em biodigestores anaeróbios, mas também para estudar como a glicerina por meio da silagem pode auxiliar a manter uma carga constante de grama fresca sendo que tem estações de maior e menor crescimento da grama no ano.

A eliminação de resíduos orgânicos e da glicerina bruta de forma ambientalmente amigável não só gera benefícios ambientais, mas também pode ser obtido um biocombustível que pode ser aplicado em uma variedade de processos, gerando um valor extra aos resíduos orgânicos.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Pesquisar de forma experimental se a silagem de gramíneas com glicerina bruta é uma opção viável como pré-tratamento e estoque de biomassa, para sua utilização em biodigestores para geração de biogás, biometano e biofertilizante.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Obter silagem de grama com glicerina bruta de boa qualidade para ser usado no processo de biodigestión anaeróbia;
- Fazer caracterização do material lignocelulósico da grama e da silagem para entendimento do processo da silagem;
- Estudo do processo de biodigestão anaeróbia de material lignocelulósico;

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 BIOGÁS: ENERGIA LIMPA

Toda energia gerada a partir de fontes renováveis, sem emissão de poluentes e impactos ao meio ambiente são consideradas fontes de energia limpa. A energia renovável é aquela “(...) obtida a partir de fontes renováveis, ou seja, fontes que podem se recompor num ritmo capaz de suportar sua utilização sem restrições ou risco de esgotamento” (PETROBRÁS, 2007, p. 7).

Ao contrário de um combustível fóssil, que contribui para emissão de gases do efeito estufa que afetam negativamente o ambiente, pois quando queimados liberam carbono (CO<sub>2</sub>) armazenado por milhões de anos. Os combustíveis fósseis são limitados, uma fonte esgotável de energia que causam grandes impactos ambientais e por isso devem ser substituídos, por exemplo, o gás natural (KARLSSON *et al.*, 2014). Uma das formas de diminuir os impactos ambientais causados por esse tipo de combustível, além de outras fontes de energia não renováveis, é a utilização de biocombustíveis.

Os biocombustíveis são produzidos a partir da biomassa (matéria orgânica), fontes renováveis, a partir de produtos vegetais ou compostos de origem animal, os biocombustíveis são biodegradáveis provocando menor impacto ambiental (PETROBRÁS, 2007).

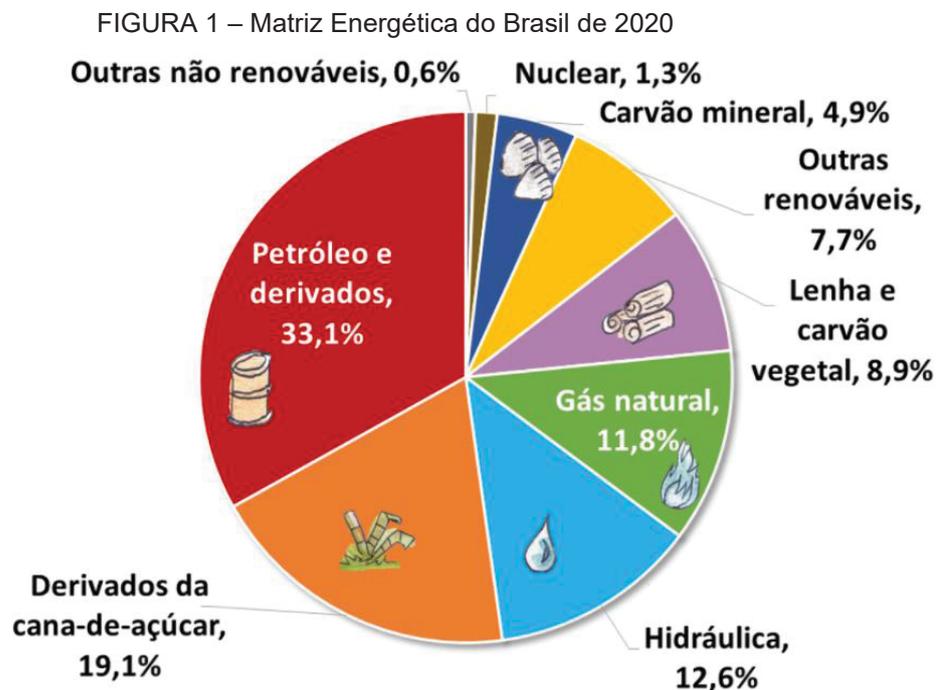
O biogás é um biocombustível que pode substituir o gás natural, por exemplo. O processo de formação de ambos é o mesmo, a partir da decomposição anaeróbia da matéria orgânica, a diferença é que o gás natural não é formado por material orgânico presente na superfície terrestre, e quando o gás natural é queimado o carbono retorna para seu ciclo na atmosfera, causando grandes impactos ambientais, já o biogás não libera adicional de dióxido de carbono e aproveita o potencial energético armazenado na matéria orgânica (KARLSSON *et al.*, 2014).

A crise do Petróleo nos anos de 1970 fez com que os países percebessem a necessidade de revisão de novos modelos energéticos, aqueles que dependiam de energia externa passaram a buscar novas fontes de energia alternativas. Isso fez com que novas pesquisas fossem realizadas acerca do processo de digestão anaeróbia de matéria orgânica. A partir dos anos de 1980 começaram a difundir os

benefícios desse tipo de digestão, o que fez com que o processo se tornasse mais popular nos anos de 1990 entre os países. A China e a Índia desenvolveram muitos projetos, alimentados por resíduos industriais e outros (KARLSSON *et al.*, 2014).

## 2.2 BIOGAS NO BRASIL

O Brasil é considerado um país de referência na produção de energia, nos últimos anos a produção de energias renováveis no país tem aumentado significativamente, concomitantemente a demanda por energia também cresce, mesmo diante de uma diversidade na matriz energética do Brasil, o petróleo ainda é uma das fontes mais utilizadas (HALMEMAN; RODRIGUES, 2012) citado por (CREMONEZ *et al.*, 2013). A matriz energética do Brasil demonstra que o país possui um grande potencial de produção de energias renováveis comparado a outros países:



Fonte: Balanço Energético Nacional Interativo (BEN, 2021).

O Brasil também é um grande produtor de resíduos agroindustriais que se descartados incorretamente podem causar sérios impactos ao meio ambiente (CREMONEZ *et al.*, 2013). Com isso, uma das matérias-primas utilizadas na produção de fontes alternativas de energias renováveis é a biomassa.

A biomassa é um material orgânico, que armazena a energia solar na forma de energia química. Sua origem são plantas, resíduos florestais e da agropecuária, óleos vegetais, resíduos urbanos e industriais e outros (PETROBRÁS, 2007). “A biomassa voltada para fins energéticos abrange a utilização desses vários resíduos para a geração de fontes alternativas de energia. O Brasil é um grande produtor de produtos agrícolas (...)” que geram a biomassa (PETROBRÁS, 2007, p. 8).

Entre as fontes de energia da biomassa estão o grupo de materiais lignocelulósicos, como a biomassa florestal. Tal matéria-prima é utilizada na produção de biogás através do processo de biodigestão anaeróbia, considerado um tratamento com potencial de eficiência e baixo custo, capaz de reduzir o teor de matéria orgânica de efluentes ao produzir energia pela valorização do metano (ANGELIDAKI et al., 1993) citado por (CREMONEZ *et al.*, 2013).

Karlsson *et al.*, (2014) apresenta de forma resumida que o biogás é constituído pela mistura do gás metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e para a produção do biogás são necessárias combinações de microrganismos para atuarem junto a uma série de fatores (pH, temperatura e tipo de substrato) que interferem na composição do biogás produzido. O biogás, produzido pela conversão da matéria orgânica contida no ciclo natural da terra, deve ser decomposto de modo que não emita gases que contribuam para o aumento do efeito estufa.

No Brasil a utilização de biodigestores são importantes devido aos aspectos de saneamento e energia, além disso, estimulam a reciclagem de nutrientes (OLIVEIRA (1993a); LUCAS JUNIOR (1994); OLIVEIRA (2004a)), citado por (OLIVEIRA; HIGARASHI, 2006).

A tentativa de instalação de biodigestores no Brasil começou entre as décadas de 1970 e 1980, muitos fatores contribuíram para o insucesso dos biodigestores nesse período, entre eles a falta de conhecimento técnico, além do custo de manutenção e implantação elevados.

Nos anos 2000 os biodigestores ressurgiram, devido a disponibilidade de novos materiais para a construção desses biodigestores, pela dependência de energia das propriedades em função do aumento da capacidade de produção e do aumento de custos da energia tradicional (OLIVEIRA; HIGARASHI, 2006). “A utilização das mantas plásticas na construção dos biodigestores, material de alta versatilidade e baixo custo, é o fator responsável pelo barateamento dos

investimentos de implantação e da sua disseminação” (OLIVEIRA; HIGARASHI, 2006, p. 11).

Além disso, a mudança climática dos últimos tempos tem feito com que os países começassem a realizar ações para diminuir os impactos ambientais. A partir de 2005 programas oficiais passaram a estimular a implantação de biodigestores focados na geração de energia e para participarem do mercado de carbono, buscando diminuir o impacto ambiental (OLIVEIRA; HIGARASHI, 2006).

Na última década no Brasil o biogás tem sido muito utilizado como fonte de energia nacional, devido ao incentivo do mercado de créditos de carbono, que busca reduzir emissões do metano (componente do biogás que contribui para o efeito estufa) (DA SILVA; MEZZARI, 2019).

Diferentes pesquisas têm utilizados materiais diversificados como substrato para a produção do biogás, tais pesquisas são essenciais visto que o potencial desse tipo de produção energética tem sido viabilizado para o futuro. Pode haver variações na produção do biogás a partir dos testes realizados com os substratos, tal variação deve-se ao inóculo, local em que se concentram os microrganismos que realizam a degradação do substrato, esses apresentam capacidades diferentes para decomposição do material. A temperatura da degradação também influencia na produção do biogás (KARLSSON *et al.*, 2014).

Entre os substratos utilizados para produção do biogás está a biomassa lignocelulósica “(...) inclui culturas energéticas, resíduos agrícolas florestais e a fração orgânica de resíduos urbanos” (CREMONEZ *et al.*, 2013, p. 23).

### 2.3 RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS

Os resíduos lignocelulósicos são renováveis, disponíveis em abundância em várias matérias-primas, além disso, esses materiais podem ser obtidos a custos baixos e em grande variedade (TAHERZADEH; KARIMI, 2007) citado por (MORAIS; ROSA; MARCONCINI, 2010). Além disso, a lignocelulose é um recurso com grande potencial para produção de energia no futuro (CREMONEZ *et al.*, 2013). Rodrigues, (2020) ressalta que os resíduos lignocelulósicos são os materiais mais abundantes da biosfera e representam em torno de 60% da biomassa.

Este tipo de resíduos são classificados em seis grupos distintos: resíduos de colheita, como palha de milho e bagaço de cana; madeira de lei, por exemplo,

álamo; madeira de conífera, como pinheiro; resíduos celulósicos, lodo de papel, papel reciclado e outros; biomassa herbáceas e resíduos sólidos municipais (RODRIGUES, 2020).

Os materiais lignocelulósicos apresentam uma composição de lignina (de 10% a 30%), hemicelulose (15% a 35%) e celulose (30% a 50%), as composições desses elementos variam de acordo com o resíduo. O principal componente é a celulose, “(...) polissacarídeo formado por moléculas de glicose unidas através de ligações  $\beta$ -1,4-glicosídicas” (RODRIGUES, 2020, p.37).

A celulose é um composto orgânico renovável, “(...) contribui para a resistência da parede celular das células vegetais. Também é uma fonte de carboidratos para os ruminantes” (MORAIS; ROSA; MARCONCINI, 2010, p. 41).

Os resíduos lignocelulósicos podem ser utilizados para produção de combustível, alimentos, bens de consumo, insumos químicos, enzimas e outros (RODRIGUES, 2020).

Para a escolha de um determinado tipo de biomassa, diversos fatores devem ser levados em consideração onde irão determinar a produção de biogás. Entre esses fatores está o rendimento energético líquido por hectare. Este parâmetro é extremamente importante para obter a maior geração de biogás por unidade de terra utilizada e é definido como o rendimento na geração de biometano a partir da quantidade de matéria seca (MS) obtida por hectare. Outros fatores também influenciam no aumento da eficiência das terras agrícolas, como o rendimento da biomassa utilizada, armazenamento da biomassa, insumos agrícolas, aditivos usados, entre outros, (SEPPÄLÄ *et al.*, 2009).

Praticamente toda biomassa conhecida é adequada para uso em biodigestores, no aproveitamento de biomassa fibrosa como pastagens, forragens, palha, etc. Deve ser dada atenção especial, pois tende a formar uma camada que flutua dentro do biodigestor, impedindo a correta liberação do biogás e desestabilizando o correto funcionamento, que pode culminar na parada total da produção do biogás (SEIXAS; FOLLE; MARCHETTI, 1981).

A matéria orgânica apresenta um ciclo de vida inerente a toda matéria viva (crescimento, desenvolvimento e morte), e ao longo desse processo são emitidos gases de efeito estufa. Os autores fazem uma comparação de qual cultura emitirá a menor quantidade de gases de efeito estufa, dentre esses cultivos está a silagem de grama plantado, milho e grama natural. Os resultados mostraram que a grama

natural emite menos quantidade de gases de efeito estufa em comparação com as culturas de grama e milho, sendo que nessas culturas, o uso de máquinas consome energia dos combustíveis, gerando gases de efeito estufa para a atmosfera (MEYER-AURICH *et al.*, 2016).

Os autores Mrůzek; Groda, (2011) em seu trabalho sobre "*Analysis of biogas production from grass silage, depending on its quality*", realizam um estudo sobre a produção de biogás relacionada à qualidade da silagem da grama. Nos testes, são colhidas amostras de grama de 11 localidades da República Tcheca, fazendo a silagem da biomassa e posterior obtenção de biogás e biometano, comparando os resultados entre si e correlacionando com as propriedades iniciais de cada silagem, ou seja, a presença de KOH, Na, K, P, Mg, Ca, ácido láctico, ácido butírico, etc. Eles também fazem uma comparação com a capacidade do trato digestivo de ruminantes, isto permite obter modelagens para plantas de produção de biogás e direcionar as pesquisas atuais.

Com relação ao uso de grama para obter disponibilidade ao longo do ano, Mceniry *et al.*, (2014) realizam o estudo de um tipo de cultura para obter biomassa durante o ano todo para instalações de produção de biogás e biometano. Os autores observam e detectaram um aumento na formação de biometano a partir dos produtos gerados pela fermentação butírica, no entanto, questionam se é viável a partir das perdas causadas na forma de calor e gases formados pela fermentação butírica, já que os gases e calor são emitidos para o meio ambiente.

Barr; Roberts, (2010) desenvolvem sua pesquisa na cidade de Christchurch, na Nova Zelândia, eles desenvolvem seu estudo em volta de cinco pontos importantes no processo de silagem. Grama sem tratamento, com agregado de glicerina, análise dos lixiviados produzidos pelas silagens, efeitos dos herbicidas presentes nas folhas das plantas e a viabilidade de geração de biogás naquela cidade a partir do uso de grama cortado no município.

Monteiro *et al.*, (2011) realizam o estudo da silagem de capim elefante com seis tratamentos diferentes. Eles realizam as silagens de capim elefante sem aditivo, aditivo bacteriano, casca de soja, cana de açúcar, fubá de milho e casca de arroz. Os autores verificaram que os aditivos melhoraram a estabilidade da silagem e que a silagem com casca de arroz proporcionou maior proteína bruta em relação ao controle, também obtiveram valores de pH e nitrogênio amoniacal nos valores aptos para uma silagem de boa qualidade.

Avaliando diferentes tipos de gramíneas para uso de forragem, Gerdes *et al.*, (2000) estudaram as alterações no teor de matéria seca (MS) dos capins Marandu, Setária e Tanzânia, observaram que a quantidade de MS aumenta nas estações secas (outono e inverno). Enquanto isso, na produção por hectare, as três gramíneas tiveram uma queda de mais de 70% na MS gerada por hectare, comparando o verão (maior produção de MS) com o inverno.

Sobre como a proporção de lignina difere nas estações de verão e inverno, o autor Ribeiro, (2007) observou em seu trabalho um aumento de lignina na silagem de capim *Brachiaria brizantha* de um 88% no teor de lignina, comparando a silagem de inverno com a silagem no verão.

Comparando os valores de celulose, hemicelulose e lignina, o autor observou que comparando a biomassa ensilada no verão (estação chuvosa) com a biomassa ensilada no inverno (estação seca), o valor da celulose foi maior na estação chuvosa do que na seca (33,1% vs. 27%), sendo valores de hemicelulose e lignina com pouca diferença entre as estações. O autor justifica esses resultados pelas condições climáticas em que a forragem teve que se desenvolver devido ao aumento da temperatura, maior quantidade de água de chuva, maior foto-período, entre outras variáveis que permitem o aumento estrutural da planta, (MARI, 2003).

Em algumas circunstâncias pode trazer benefícios para a forragem ter um longo período de crescimento, isso implica em aumento dos (ST) e maior produtividade por hectare, porém, esse aumento de sólidos totais também gera aumento na quantidade de lignina forrageira, levando a uma queda na produção de biometano, (SEPPÄLÄ *et al.*, 2009).

O rendimento na produção de biogás e biometano é fortemente influenciado pelos sucessivos cortes ou colheitas que são realizados na forragem. Comparando o tempo de corte de diferentes forragens com a produção de biometano, Seppälä *et al.*, (2009) calcularam o rendimento específico de metano entre a primeira e a segunda colheita, os valores diminuíram entre 25-47% em todas as variedades de gramíneas analisadas.

Comparando a geração de biogás entre as duas estações com maior crescimento de biomassa, os autores fizeram pesquisas na grama fresca coletada nas estações de primavera e verão. Eles percebem que a quantidade de biogás não muda, mas sim a qualidade desse biogás, que é menor no verão (devido à maior quantidade de lignina na biomassa). Porém, o aumento da produção de capim no

verão foi quatro vezes maior do que na primavera, obtendo-se uma quantidade maior de biogás por hectare plantado. Os autores finalizam incentivando o uso de resíduos de gramíneas como biomassa que gera biogás e pode ser complementada com outros resíduos (CHIUMENTI *et al.*, 2018).

O efeito da umidade nas forragens é de extrema importância, conforme Ribeiro, (2007), onde realizou a secagem da espécie de *Brachiaria brizantha*, comumente chamada de capim-marandu. O autor relata que após 5 horas de secagem da forragem (estudo realizado tanto no inverno quanto no verão) obteve um aumento da MS de 51% e 97% respectivamente, sendo essa diferença claramente favorecida pelas estações do ano e suas características.

O processo de secagem, além de proporcionar uma maior quantidade de MS na forragem, também contribui para aumentar o teor de FDN conforme relatado por Ribeiro, (2007), esse aumento foi acompanhado por uma diminuição no teor de CHOs, perdas bioquímicas relacionadas à respiração celular.

Amon, T. *et al.*, (2004) fizeram sua pesquisa com grama de trevo e milho para gerar biogás e biometano. Ao combinar as duas culturas diferentes, eles obtiveram um produto que permite uma geração mais eficiente de biogás, através do uso de culturas rotativas e do uso de pradarias naturais. Os autores destacam ainda que para a utilização do milho, se apenas a espiga for utilizada para gerar biogás, haverá entre 43 a 70% menos geração de biometano por hectare.

## 2.4 PRÉ-TRATAMENTO E MICROBIOLOGIA APLICADA

Neste trabalho o processo de ensilagem será considerado como um pré-tratamento para resíduos da poda de gramíneas, esse tipo de prática é vista por diversos autores não apenas como uma forma de armazenamento de biomassa para alimentação, mas também como um processo que auxilia na estabilização biológica do material, permitindo a obtenção de material fresco para biodigestão.

Para realizar uma boa ensilagem, três variáveis de fundamental importância devera ser levadas em consideração, a primeira é obter um tamanho de partícula de 1,5cm para melhor homogeneização do material, a segunda variável é a compactação do material para remover o ar que possa conter a massa a ser ensilada, e por último um correto fechamento do silo para evitar a entrada de ar,

preservando assim a silagem e evitando fermentações indesejáveis (RIGUEIRA *et al.*, 2017).

Kalac, (2011) em seu trabalho discute as características da silagem de milho e grama para a geração de biogás em instalações agrícolas. Entre as características da grama e do milho, deve-se levar em conta a maturação dos grãos, o corte de grama e milho, os processos térmicos ou mecânicos que demandam energia, observando também que para altas taxas de biometano precisa-se de uma boa silagem.

Um exemplo é o trabalho de Abu-Dahrieh *et al.*, (2011), eles propõem e recomendam o estudo da silagem de grama para a geração de biometano. Em seus estudos, eles observaram uma proporção de 70-80% de biometano na composição do biogás, o que gera um aumento na eficiência de conversão do metano a partir do biogás.

#### 2.4.1 Microbiologia da silagem

O principal produto do processo de fotossíntese das plantas é a formação de carboidratos, sendo estes os principais nutrientes para os microrganismos que atuam no ambiente natural. As enzimas iniciam o processo de degradação reduzindo as macromoléculas que constituem a biomassa. Nesse processo de degradação da biomassa, também atuam invertebrados e microrganismos que se encontram no trato digestivo dos animais, esses organismos degradam e consomem celulose e hemicelulose, sendo os principais constituintes da matéria vegetal (CARRILLO, 2003).

O ácido láctico na silagem de gramíneas é uma variável de grande importância para a obtenção do biogás, bem como uma variável sensível às mudanças atmosféricas. O aumento do ácido láctico na silagem mostrou-se diretamente relacionado ao aumento da produção de biometano (MRŮZEK; GRODA, 2011). Os autores afirmam ainda que os produtos da fermentação láctica, os monossacarídeos, são o principal aporte energético da planta, portanto, a presença de ácido láctico na silagem é indicativa da presença de moléculas mais simples, sendo utilizadas pelos organismos produtores de metano.

A silagem do material permite o desenvolvimento de bactérias lácticas, que passam a consumir os açúcares, secretando ácido láctico como produto final

(SOUSA *et al.*, 2011). Essas bactérias pertencem ao grupo de bactérias conhecidas como anaeróbios estritos, esses organismos obtêm sua energia por meio da fermentação, não sofrendo lesões quando há vestígios de oxigênio no ambiente anaeróbio (CARRILLO, 2003).

O autor Ribeiro, (2007) analisa a relação ácido láctico: ácido acético, destacando a necessidade de obtenção de silagem de forragem com alta relação entre esses ácidos. Na experimentação com polpa cítrica na forma de pellets (PCP), obteve os maiores valores de ácido láctico utilizando o inoculo bacteriano com a cepa *L. plantarum* em silagens confeccionadas com forrageiras de inverno, com alto teor de MS. O autor explica que a obtenção desses valores se deve ao uso do PCP, material esse que forneceu os substratos necessários para o crescimento da bactéria ácido-láctica.

A estabilidade biológica da silagem é de fundamental importância, visto que nas silagens de gramíneas com grande estabilidade biológica a geração de biometano foi maior, porém, em silagens pobres ou com pouca estabilidade biológica (desenvolvimento de fermentações secundárias como a butírica) a produção de biometano foi menor. Em resumo, quanto mais estável a silagem em longo prazo, maior será a geração de biometano. (MRŮZEK; GRODA, 2011).

Na busca por reduzir as perdas geradas no processo de fermentação na silagem de capim *Brachiaria brizantha*, os autores adicionaram diferentes níveis de glicerina bruta do biodiesel, esse tratamento permitiu um aumento significativo de bactérias lácticas com o aumento da adição da glicerina bruta, além disso, auxiliou na silagem do material com maior material seco. Os autores concluem que a adição de glicerina bruta permitiu aumentar o valor nutricional da silagem de capim, além de reduzir as perdas de gases (ORRICO JUNIOR *et al.*, 2017).

A acidez do chorume gerados na silagem de gramíneas é uma variável relacionada ao aumento na produção de metano. Foram analisadas diferentes silagens comparando a acidez do chorume e a produção de biometano gerado, os autores identificaram uma forte relação, quanto mais ácido o chorume maior a produção de biometano e vice-versa (MRŮZEK; GRODA, 2011).

A geração e perda de gases na silagem de biomassa estão relacionadas ao tipo de microrganismo que atua no momento, além da qualidade da silagem, densidade do material compactado, presença de ar, etc. Bactérias homofermentativas utilizam a glicose para gerar ácido láctico como produto final,

porém, bactérias heterofermentativas geram ácido láctico, assim como outros compostos indesejáveis, permitindo o surgimento de fermentações indesejáveis, como a fermentação butírica, composta em sua maioria por bactérias do tipo *Clostridium* (RIGUEIRA *et al.*, 2018).

#### 2.4.2 Microbiologia no biodigestor

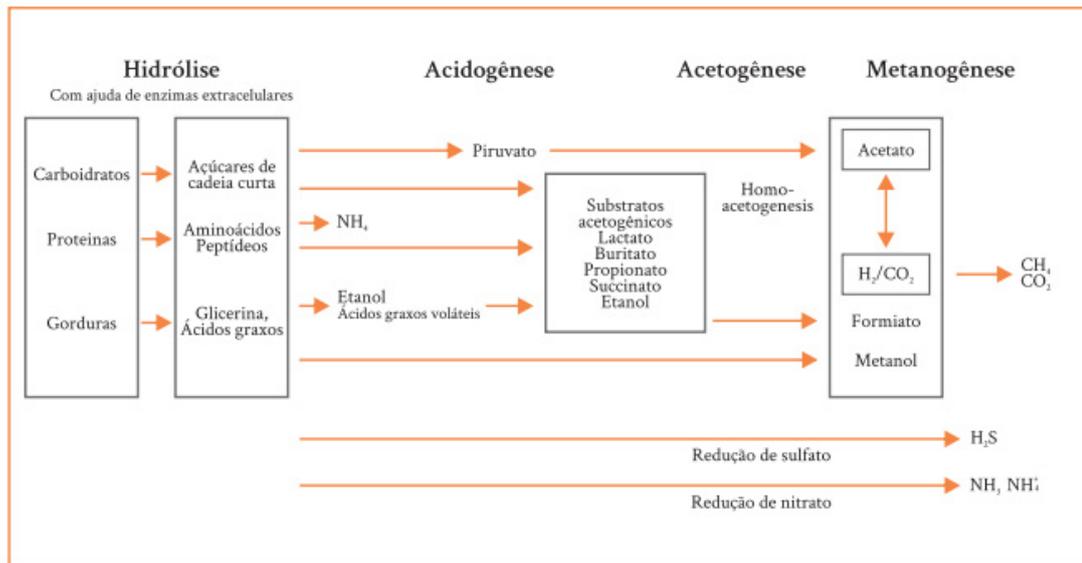
A digestão anaeróbia é um processo biológico complexo que envolve a associação de diferentes microrganismos e transforma compostos orgânicos em dióxido de carbono e metano (DA SILVA; MEZZARI, 2019). “A biodigestão ocorre na ausência de oxigênio molecular, onde se tem consórcios de diferentes tipos de microrganismos interagindo estreitamente para promover a transformação de composto orgânico complexos, em simples” (CREMONEZ *et al.*, 2013, p. 23).

A digestão anaeróbia é um processo em que resíduos orgânicos em um processo bioquímico e com ausência de oxigênio faz com que diferentes microrganismos produzam o biogás (SANDERSON, 2013).

No processo de fermentação anaeróbia alguns nutrientes podem ser fundamentais para a síntese celular. “As bactérias podem ser classificadas segundo a utilização de substratos ou características metabólicas ou fisiológicas comuns. No processo de produção de biogás, são classificadas como mesofílicas e/ou termofílicas, anaeróbias, dentre outras” (SANDERSON, 2013, p. 9).

Através da digestão anaeróbia é possível obter o biogás, a partir dos resíduos orgânicos, além de ser capaz de produzir a biomassa utilizada como biofertilizante na agricultura (SANDERSON, 2013). A digestão anaeróbia pode ser dividida em quatro fases: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metagênese. Conforme Figura 2.

FIGURA 2 – fases da digestão anaeróbia: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.



Fonte: Adaptado de (Deublein; Steinhauser, 2011), citado por (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019, p. 14).

No processo de hidrólise, as moléculas complexas (proteínas, carboidratos e lipídios) que compõem a matéria orgânica são reduzidas a moléculas mais simples formando açúcares e ácidos graxos, essas moléculas mais simples fornecem alimento para bactérias acidogênicas, gerando ácidos graxos de cadeia curta, álcoois, hidrogênio e dióxido de carbono. Esses produtos intermediários são consumidos por bactérias acetogênicas, gerando ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono servindo como compostos finais para bactérias metanogênicas, gerados como principais produtos metano e dióxido de carbono, (VARNERO, 2011).

Na etapa da acidogênese os monômeros formados na fase da hidrólise são usados como substratos por diferentes bactérias anaeróbias e facultativas, que são degradados nessa etapa a ácidos orgânicos de cadeia curta, moléculas de um a cinco carbonos, álcoois, óxidos de nitrogênio, sulfeto de hidrogênio, dióxido de carbono e hidrogênio. “A pressão parcial de hidrogênio durante o processo afeta diretamente o estado de oxidação dos produtos. Se for muito elevada, resultarão em produtos com maior quantidade de carbono” (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019, p. 15).

A terceira etapa é a acetogênese é uma fase complexa do processo conduzida por bactérias denominadas acetogênicas, suas ações são endotérmicas.

As bactérias acetogênicas estabelecem relação de simbiose com as arqueas metanogênicas e as bactérias homoacetogênicas. Nessa etapa os ácidos de cadeia longa são transformados em ácidos com apenas um ou dois átomos de carbono (fórmico e acético), com a concomitante produção de hidrogênio e dióxido de carbono. As bactérias homoacetogênicas regem o equilíbrio da direção da reação de consumo de hidrogênio e gás carbônico para produção de acetato. Para que a formação de ácidos de cadeia curta seja termodinamicamente favorável, esta deve ocorrer associada ao consumo de hidrogênio gasoso pelas arqueas metanogênicas. A simbiose entre organismos dos grupos microbianos distintos possibilita que ambos apresentem crescimento, assegurando a viabilidade de produção de acetato a partir de ácidos orgânicos (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019, p. 16).

A quarta etapa metanogênese acontece em condições anaeróbias, o carbono da biomassa é convertido em dióxido de carbono e metano a partir da ação das arqueas metanogênicas. “O domínio arquea é polimórfico, de modo que possa ser distinguida a partir dos outros domínios apenas pela sequência de 16S rRNA. As reações que ocorrem na metanogênese são exotérmicas” (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019, p. 17).

As arqueas metanogênicas são divididas a partir de suas vias metabólicas em acetoclásticas e hidrogenotróficas, as acetoclásticas convertem acetato a metano e as hidrogenotróficas convertem hidrogênio e dióxido de carbono a metano, as reações são exotérmicas (DA SILVA; MEZZARI, 2019).

#### 2.4.3 Principais variáveis na biodigestão anaeróbia

Nas diferentes etapas da biodigestão, a metanogênese é a etapa mais sensível, exigindo cuidados e correções no processo para se obter sempre a maior quantidade de biogás. Vários são os fatores ambientais em que as bactérias param de gerar metano, entre os fatores estão a quantidade de matéria seca (MS), pH, temperatura, tempo de retenção, quantidade de sólidos voláteis (SV), relação C / N, presença de substâncias tóxicas, entre outros fatores (COMASTRI FILHO, 1981).

Dependendo do material utilizado para a produção do biogás, este pode afetar a estabilidade e a eficiência do processo de biodigestão anaeróbia, a escolha do material utilizado interfere no resultado do processo e na maximização de uma produção de energia de qualidade (KARLSSON *et al.*, 2014). “A composição dos substratos tem quantidades diferentes de matéria orgânica e, portanto, a energia contida no material difere, ou seja, a quantidade de biogás a ser produzida e o teor de metano presente serão diferentes dependendo do substrato. Os microrganismos

atuantes na digestão anaeróbia consomem pequenas quantidades de energia para seu crescimento e o restante de energia contida no substrato é convertido em biogás e metano” (KARLSSON *et al.*, 2014, p. 20).

De acordo com Lambais, (1992), esses fatores no processo de biodigestão pode levar à produção máxima de biogás ou ao colapso total do sistema, esses fatores são os seguintes:

**Temperatura:** Existem duas faixas de temperatura diferentes onde as bactérias metanogênicas funcionam melhor, uma faixa que corresponde a temperaturas entre 30 e 37°C denominada mesofílica e a outra faixa é entre temperaturas de 50 a 65°C com o nome de termofílica. No trabalho feito por (COMASTRI FILHO, 1981) identifica-se três grupos de bactérias metanogênicas. Os psicofílicos que se desenvolvem em temperaturas abaixo de 20°C, as bactérias mesófilas com ponto ótimo de geração de metano que é 35°C e finalmente as bactérias mesófilas, onde o ponto ótimo de temperatura é 54°C. A velocidade máxima de crescimento desses grupos difere no sentido de que quanto maior a temperatura, maior será a capacidade de crescimento dessas bactérias, sendo que cada grupo possui uma faixa de temperatura onde a produção de biogás é maior (VARNERO, 2011).

**pH:** A faixa ótima para o processo de metanogênese é entre 7 e 8, desde que se tome cuidado com os substratos utilizados, por exemplo: polpa de café.

O pH da silagem de gramíneas é um dos parâmetros mais facilmente identificáveis, esta variável está fortemente relacionada à produção de metano. Os autores Mruzek; Groda, (2011) compararam os valores de pH da silagem com a produção de biometano, o resultado mostrou que quanto menor o pH da silagem, maior a produção de biometano e vice-versa.

**Anaerobiose:** Bactérias metanogênicas são estritamente anaeróbicas, esses organismos não toleram a presença de oxigênio, sendo uma causa importante no colapso de um biodigestor (cessação da produção de metano).

**Relação C/N:** Para obter a maior produção de metano, a relação C/N deve estar entre os valores de 16 a 19. O nitrogênio é utilizado pelas bactérias para o crescimento celular, entretanto o excesso de nitrogênio pode favorecer o aparecimento de amônia.

Outros autores propõem diferentes valores C/N como no trabalho de Wang *et al.*, (2014) onde eles propõem uma relação C/N entre 25-30. Comastri Filho,

(1981) recomenda que os resíduos de baixo teor de carbono sejam suplementados com materiais de alto teor de carbono, isso é necessário para atingir um intervalo ideal entre 20 a 30 sendo uma proporção ideal. Uma relação C/N ótima para o material fresco a ser usado na digestão anaeróbica é 30, qualquer que seja o resíduo, deve ser complementado com outros resíduos orgânicos de forma que a relação C/N ótima seja obtida. (VARNERO, 2011).

Dioha *et al.*, (2013) testaram vários substratos com diferentes relações C/N comparando com a respectiva geração de biogás de cada substrato. Uma das conclusões foi a relação C/N com pH, se houver mais C na relação C/N, então uma maior quantidade de CO<sub>2</sub> será formada no biogás, diminuindo o pH no biodigestor. Enquanto isso, se a relação C/N for mais N, então haverá mais produção de amônia, aumentando o pH do biodigestor.

À granulometria do material influencia na geração de biogás como demonstram no trabalho (SZLACHTA *et al.*, 2018). Eles notam que nas diferentes granulometrias de diferentes biomassas, obtêm-se diferentes valores na geração de biogás, relacionado a maior área de contato disponível para as bactérias. O valor que deu o melhor resultado é uma granulometria de 10 mm para a biomassa vegetal, proporcionando assim um material que produz grande quantidade de biogás.

## 2.5 TIPOS DE BIODIGESTORES COMERCIAIS

Os biodigestores são classificados segundo seu regime de alimentação, forma de alimentação (batelada ou contínuo), ascendente ou laminar, concentração de sólidos no reator e sistema de agitação. Alguns biodigestores presentes no Brasil são o Biodigestor de Lagoa Coberta (BLC), trata-se de um tanque escavado no solo impermeabilizado coberto com material geosintético, possui baixa permeabilidade a fluídos e gases, além de possuir flexibilidade para acumular o biogás. Sua figura possui base retangular de seção trapezoidal com inclinação do talude variável de acordo com o solo (DA SILVA; MEZZARI, 2019).

FIGURA 3 – Esquema representativo do modelo BLC

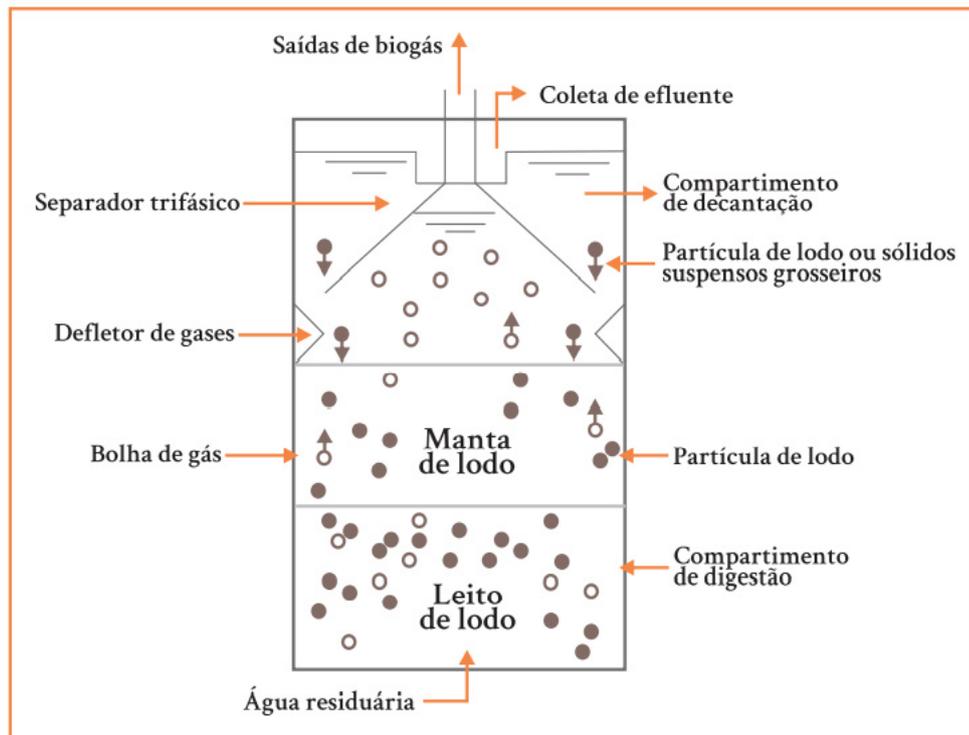


Fonte: (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019, p. 43).

No meio rural o BLC tem sido muito utilizado, principalmente com gerenciamento dos efluentes da produção animal. O BLC possui baixo nível tecnológico, de fácil construção e operação. Normalmente, esses biodigestores não possuem sistemas de aquecimento, nem de agitação. Além disso, esse biodigestor possui um maior tempo de retenção hidráulica (TRH). “A falta do sistema de aquecimento implica na variação da temperatura da biomassa do BLC em função da temperatura ambiente, ou seja, isto tem implicações diretas na capacidade de geração de biogás e será bastante afetado em regiões com inverno” mais rígido como na região sul (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019, p. 44).

O biodigestor UASB termo do inglês *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* ele tem um fluxo ascendente do efluente por uma lama de lodo até o topo do reator, em que há um separador trifásico (DA SILVA; MEZZARI, 2019).

FIGURA 4 – Esquema de funcionamento do modelo UASB



Fonte: (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019, p. 48).

Esses biodigestores possuem alta capacidade de retenção de biomassa e com baixo tempo de retenção hidráulica, leva de 4 a 72 horas, os reatores apresentam estabilidade em situações de variações das características do afluente e suporte à uma alta carga volumétrica, principalmente, em condições em que a matéria orgânica torna-se solúvel (DA SILVA; MEZZARI, 2019).

“Por questões hidrodinâmicas, o afluente do reator UASB deve apresentar baixa concentração de sólidos totais (<2%). Esse fato indica que, para o tratamento de efluentes da produção animal, muitas vezes é necessário um pré-tratamento” (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019, p. 49).

Outro biodigestor utilizado no Brasil é o modelo CSTR do inglês *Continuous Stirred Tank Reactor*, tal modelo suporta elevadas cargas orgânicas volumétricas, tem como característica seu conteúdo em homogeneização por causa do sistema de agitação. “Esta é a configuração de biodigestor mais utilizada em plantas de biogás, sobretudo quando se trata de codigestão (mistura de substratos) e com concentração de sólido mais elevada (próximo a 10% m.v<sup>-1</sup>)” (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019, p. 54). Esse modelo de reator anaeróbio possui:

(...) o tempo de retenção hidráulica (TRH) e o tempo de retenção de sólidos (TRS) são iguais, pois parte-se do pressuposto que não há acúmulo de lodo no reator. O TRH mínimo do reator geralmente é entre 15 e 20 dias, podendo variar bastante em função do tipo de substrato a ser digerido. Biodigestores CSTR sem recirculação de lodo são mais adequados para efluentes com altas concentrações de sólidos (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019, p. 54).

O CSTR necessita de um sistema de agitação o que acrescenta custos, porém auxilia na transferência de calor e mantém sólidos em suspensão. Os sistemas de aquecimento garantem maior capacidade de produção do biogás, além disso, colabora com a estabilização do reator e manutenção de microrganismos (DA SILVA; MEZZARI, 2019).

## 2.6 GLICERINA BRUTA DO BIODIESEL NA SILAGEM

Cada 90 m<sup>3</sup> de biodiesel produzido por transesterificação gera-se 10 m<sup>3</sup> de glicerina (9% glicerina por peso) com grande quantidade de impurezas, como álcool, catalisador, água, etc., que podem ser purificados para uso industrial (MOTA; SILVA; GONÇALVES, 2009).

A produção de glicerina bruta pode ser utilizada para a geração de biogás, complementando-se com outros resíduos. Em seu trabalho Robra *et al.*, (2006) concluem que o uso de glicerina bruta como suplemento para a biodigestão anaeróbia de dejetos animais é favorável, potencializando a geração de biogás e complementando os resíduos com alta quantidade de nitrogênio.

De acordo com o estudo realizado por Amon, *et al.*, (2006), o uso de glicerina bruta de biodiesel em adição aos resíduos pecuários e silagem de milho teve um efeito significativo no aumento da geração de biogás (de 569 para 679 NL CH<sub>4</sub> (kg SV)<sup>-1</sup>). Os autores recomendam a suplementação de glicerina bruta de até 6% nesse tipo de biomassa.

Em seu trabalho, Minho *et al.*, (2012) estudaram a geração de biogás e biometano a partir do uso da glicerina na produção de biodiesel com lodo de tratamento de esgoto agroindustrial e resíduos de aves poedeiras. Com base nos resultados, os autores notaram um aumento significativo na geração de biogás ao introduzir glicerina no reator, obtendo um aumento de até 216,6%. Eles também puderam concluir que o biogás gerado era de excelente qualidade, obtendo 70% de biometano.

Os autores Dias *et al.*, (2014) detectaram na silagem de cana-de-açúcar com glicerina bruta que os valores da matéria seca aumentaram linearmente com a adição de glicerina, reduzindo as perdas de gases durante o processo de fermentação láctica. Os autores justificam esse aumento no material seco às propriedades higroscópicas da glicerina, permitindo assim a ligação com as moléculas de água, reduzindo a umidade presente no material a ser ensilado.

No trabalho feito por Gomes *et al.*, (2015), os autores estudaram a silagem de cana-de-açúcar com glicerina para alimentação animal, observaram melhor estabilidade aeróbica (silo aberto), pH e temperaturas baixas, maior a densidade de energia dá cultura a partir de uma inclusão de 10 a 20% de glicerina bruta.

A realização da silagem com grande quantidade de MS dificulta a compactação eficiente da biomassa, gerando locais onde o oxigênio pode ser armazenado (presença de ar), favorecendo a fermentação de bactérias do tipo *Clostridium*. A glicerina bruta combinada com a compactação de um material sólido permitiu a correta silagem do Tifton 85 mesmo quando este possui alto teor de MS (RIGUEIRA *et al.*, 2017).

Os autores Pokój *et al.*, (2014) realizaram uma investigação em silagens de milho adicionando glicerina em 5 e 10%, aumentando a carga orgânica da silagem. Os autores observaram que com um aumento de glicerina na silagem de 10% em peso, a geração de biogás diminuiu em relação à silagem com 5% de glicerina. Esse aumento da glicerina bruta gerou aumento e acúmulo de ácido propanoico e ácido valérico, saturando a biomassa na digestão desses ácidos e gerando diminuição na produção de biogás.

Os autores Rigueira *et al.*, (2018) realizam o estudo da silagem de gramíneas *Pennisetum purpureum Schum* por meio da glicerina bruta em diferentes medidas (1, 5, 10 e 15%) para alimentação de bovinos. Em seu estudo, eles não detectaram uma mudança significativa na qualidade da fermentação, mantendo-a similar ao controle. Eles também detectaram um aumento na degradação da fibra vegetal linear ao aumento da glicerina.

## 2.7 BIOGÁS E SUBPRODUTOS DO PROCCESSO

O biogás é um produto resultante do metabolismo de um grupo de bactérias anaeróbicas que rompem cadeias complexas de biomassa, gerando compostos mais

simples, liberando gases no processo como metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ), hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) e outros compostos em menor grau (MRŮZEK; GRODA, 2011). Os autores destacam a necessidade de se obter a maior quantidade de metano no biogás, minimizando a geração de gases indesejáveis.

O biogás queima com uma chama azul sem a formação de fuligem, com um poder calorífico entre 4700-5500 kcal/m<sup>3</sup> (SEIXAS; FOLLE; MARCHETTI, 1981). A quantidade de biometano encontrada na mistura gasosa do biogás será aquela que ditará o valor calorífico final, sendo 5000-6000 kcal/m<sup>3</sup> no biogás, quanto mais puro o biometano, maior seu poder calorífico, podendo atingir valores de 12.000 kcal/m<sup>3</sup> (COMASTRI FILHO, 1981).

O subproduto ou produto secundário gerado após a digestão anaeróbia em biodigestores é um substrato que pode ser utilizado como fertilizante agrícola. Este biofertilizante possui elementos como nitrogênio (1,5 a 2%), fósforo (1 a 1,5%) e potássio (0,5 a 1%) e uma vez estabilizado pode ser utilizado diretamente no solo, sem problemas como odores ou geração de vetores (moscas). Este fertilizante natural ajuda a repor o húmus natural da terra, melhorando as propriedades físico-químicas e microbianas, sendo também um corretivo da acidez do solo por ter um pH próximo de 7,5 (COMASTRI FILHO, 1981).

O biofertilizante pode ser armazenado de acordo com as necessidades no plantio, como o biofertilizante é composto por uma parte líquida e uma parte sólida, tem que ter locais específicos para cada substrato. O substrato líquido deve ser armazenado em tanques fechados para não perder nitrogênio, o substrato sólido pode ser armazenado em silos e tanques abertos com cobertura para o sol (SEIXAS; FOLLE; MARCHETTI, 1981).

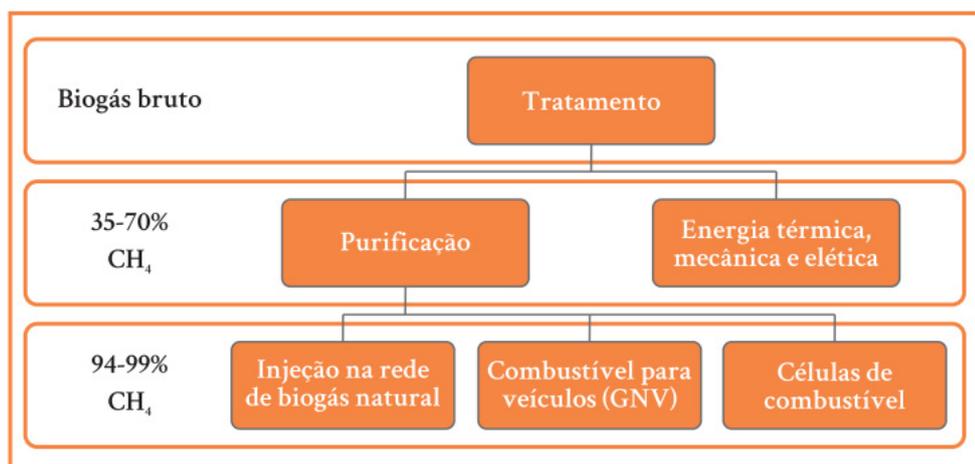
O valor obtido na biodigestão anaeróbia deve ter as unidades correspondentes para comparação com outros autores, por exemplo, o autor Seppala *et al.*, (2009) faz suas medidas utilizando as seguintes unidades: NL  $\text{CH}_4/\text{kg}$ , SV NL  $\text{CH}_4/\text{kg}$  ST, NL  $\text{CH}_4/\text{kg}$  SF. Esta metodologia de utilização de unidades diferentes para uma mesma variável ajuda a poder tirar um maior número de conclusões, pois permite comparar o valor do biogás e do biometano produzido com o valor do ST, SV, MF da biomassa; auxiliando na elaboração de conclusões mais elaboradas sobre o experimento.

## 2.8 TRATAMENTO DE BIOGAS

São necessárias implantações de tecnologias de tratamento do biogás para gerar combustível de qualidade, que possa ser transformado em energia térmica, elétrica e/ou mecânica. Para tratamento e purificação do biogás é necessário 1) valor calorífico e remoção de contaminantes que podem afetar a qualidade do biogás e a vida útil dos componentes do sistema e 2) a purificação do biogás e a concentração do biometano para a logística de transporte e distribuição (DA SILVA; MEZZARI, 2019). “A purificação do biogás consiste na remoção de sulfeto de hidrogênio e dióxido de carbono, a partir da dissolução dos gases H<sub>2</sub>S e CO<sub>2</sub> por meio de lavagem com água pressurizada” (KARLSSON *et al.*, 2014, p. 14).

O nível de purificação do biogás depende do sistema de tratamento utilizado, sistemas mais complexos com maiores investimentos, maior custo de implantação, remove com mais eficácia os contaminantes. Porém, esses sistemas nem sempre são necessários, pois há a possibilidade de purificação do biogás com sistemas de tratamento mais simples e de menor custo, que atendem aos requisitos mínimos para o processo de purificação (DA SILVA; MEZZARI, 2019).

FIGURA 5 – Etapas de tratamento e purificação do biogás



Fonte: (DA SILVA; MEZZARI, 2019, p. 72).

Para avaliar a eficiência na remoção de contaminantes do biogás são realizadas análises químicas que avaliam o biogás na entrada e saída do tratamento (DA SILVA; MEZZARI, 2019). O biogás utilizado para produção de calor é a maneira

mais barata de aproveitá-lo, geralmente, as plantas de biogás tendem à produção de eletricidade e calor. “Ao operar um motor de combustão interna, cerca de 30% do biogás são convertidos em eletricidade e os restantes 70% representam o calor” (KARLSSON *et al.*, 2014, p. 14).

## 2.9 BIBLIOGRAFIA DA EXPERIMENTAÇÃO

Para comparar a biomassa inicial com o processo de ensilagem final, é necessário caracterizar o material antes e depois do processo. Os parâmetros que serão utilizados no processo de ensilagem serão de fundamental importância para entender o que acontece no processo de ensilagem de material lignocelulósico.

### 2.9.1 Caracterização da biomassa

**Sólidos totais (ST):** Os sólidos totais em uma amostra de matéria orgânica representam a fração sólida desta, o restante sendo água. Para Varnero, (2011) digestores contínuos não devem ultrapassar de 8 a 12% de ST e para digestores descontínuos até no máximo 60% de ST.

De acordo com American Public Health Association, (1995), Os sólidos totais são os resíduos que permanecem na placa após a evaporação de toda a água que a amostra continha. Esses sólidos totais também incluem sólidos suspensos totais (STS) e a parte dos sólidos dissolvidos totais que são retidos pela implementação de filtros.

Este parâmetro é uma limitação do processo de biodigestão devido à sua dificuldade em trabalhar na faixa ótima de ST. Para obter valores ótimos para o biodigestor, deve-se administrar uma fonte de água limpa, misturar materiais com baixo valor de ST com biomassas com alto valor de ST (feno), mistura adequada no biodigestor e presença de micronutrientes (MRŮZEK; GRODA, 2011).

**Sólidos Voláteis (SV):** O valor dos sólidos voláteis é referido como a volatilização dos ST em combustão a uma temperatura de 550°C. Para uso adequado em biodigestores com dejetos animais, o autor Varnero,(2011) recomenda um valor máximo de 10% MS de água no esterco animal.

**pH:** A medição do pH não deve ser confundida com o crescimento de bactérias lácticas em qualquer tipo de silagem, mas pode sim relacionar os valores de pH com a qualidade do tipo de fermentação, no entanto, não pode-se explicar ou implicar que tipo de fermentação ou organismos que estão atuando no processo de ensilagem (ORRICO JUNIOR *et al.*, 2017).

**Demanda Química de Oxigênio (DQO):** é um parâmetro que diz respeito à quantidade de oxigênio que materiais, substâncias orgânicas e minerais consomem, se oxidam em condições definidas. Quando há a impossibilidade de identificar a quantidade de demanda de oxigênio, este é substituído por substâncias químicas oxidante que tem sua quantidade medida antes e depois do contato com o material, que revela o redutor ou demandador de oxigênio, a substância química mais utilizada para este fim é o dicromato (ZUCCARI; GRANER; LEOPOLDO, 2005).

**Carbono Orgânico (TOC):** o carbono orgânico pode ser encontrado em solo via úmida através da oxidação com dicromato de potássio, proveniente de materiais orgânicos, que são facilmente oxidáveis ou decomponíveis. Para determinar de maneira indireta o Carbono presente em materiais orgânicos é utilizado o dicromato de potássio, no processo de oxidação da matéria orgânica, disponível pela diferença entre volume de uma amostra em branco e de outra amostra pela titulação com solução de sulfato ferroso amoniacal (FONTANA; CAMPOS, 2017).

**Ácidos orgânicos:** esses ácidos resultam de atividades sintéticas das plantas e animais, os ácidos orgânicos são mais comuns, são aqueles que possuem átomos de carbono. A utilização de resíduos orgânicos na agricultura, por exemplo, podem introduzir grandes quantidades de ácidos orgânicos de baixa massa molar e afetar a mobilidade e disponibilidade de nutrientes no solo. As plantas durante o crescimento são capazes de sintetizar diferentes ácidos orgânicos, dos mais simples aos mais complexos (PINHEIRO, 2012).

**Fibra Detergente Acida, ADF:** A partir da fibra em detergente ácido, podem ser determinados os compostos menos solúveis da parede celular, sendo estes compostos formados por Celulose, Lignina, Nitrogênio insolúvel, cinzas e sílica (SOUZA *et al.*, 1999).

**Fibra Detergente Neutro, NDF:** Ao falar da fibra em detergente neutro, os autores Van Soest; Robertson; Lewis, (1991) referem-se às partes constituintes da parede celular vegetal como Celulose, Hemicelulose e Lignina, sendo estes os principais componentes da NDF.

Para determinar o NDF e o ADF, o método mais comum é descrito por Van Soest, (1963) no qual realiza o tratamento com uma solução detergente ácida, onde solubiliza a parede celular do material lignocelulósico, obtendo principalmente hemicelulose e proteínas, denominadas fibra detergente neutro. Os resíduos do tratamento são compostos por compostos insolúveis como o nitrogênio lignificado, lignina e celulose, denominados fibra detergente ácido (SOUZA *et al.*, 1999).

Para obter Celulose, Hemicelulose e lignina, a lignina é dissolvida, aplicando-se o método com  $\text{KMnO}_4$  e o método com  $\text{H}_2\text{SO}_4$  a 72% para obtenção da celulose. O resto do composto é a fração da hemicelulose (VAN SOEST, 1963).

**Extrato Etéreo (EE):** Este método de análise permite obter gorduras e óleos a partir de diferentes materiais orgânicos. Os lipídios (gorduras e óleos) são definidos como componentes alimentares que não são solúveis em água, mas são solúveis em éter, éter de petróleo, acetona e álcoois. Esses solventes são responsáveis pela extração de ácidos graxos livres, mono, di e triglicerídeos e uma série de compostos polares. (CECCHI, 2003).

## 2.9.2 Silos para biomassa

Uma forma prática de realizar o experimento pode ser a utilização de tubos de PVC como silos experimentais. Esses silos permitiriam armazenar o material a ser ensilado de forma prática e facilmente recuperado dos silos após o experimento (MONTEIRO *et al.*, 2011). Na silagem de capim-elefante utilizaram-se silos confeccionados com tubos de PVC de 10 cm de diâmetro e 50 cm de comprimento com capacidade para 2,5 kg ( $600 \text{ kg/m}^3$ ) de forragem verde. As extremidades são fechadas com tampas (CAP) e com uma válvula de Bunsen para escape de gases da fermentação.

Para a silagem de cana-de-açúcar com glicerina bruta, os autores Dias *et al.*, (2014) fizeram a silagem em reatores de PVC de 10 cm de diâmetro e 50 cm de comprimento, aplicando uma densidade de material de aproximadamente  $600 \text{ kg/m}^3$  por silo e com tamanho de partícula de 2 cm.

Outro exemplo da utilização deste tipo de reatores para a silagem de matéria orgânica é o trabalho realizado por Rigueira *et al.*, (2017) onde realizam a silagem de gramíneas da espécie *Cynodon dactylon* (Tifton 85) com glicerina bruta em um

reator de PVC de iguais dimensões da obra citada de Dias *et al.*, (2014), entretanto, utiliza uma densidade de silagem de 500 kg/m<sup>3</sup>.

### 2.9.3 Biodigestores Experimentais

Existem vários modelos e tipos de biodigestores, neste trabalho serão utilizados apenas biodigestores em escala de laboratório, onde as quantidades de biomassa utilizadas são da ordem de gramas. A classificação geral que é dada a todos os tipos de biodigestores começa com dois grupos gerais. Esses grupos são conhecidos como digestores contínuos e semi-contínuos (batch).

Os digestores contínuos são biodigestores nos quais o processo de decomposição anaeróbia não é interrompido para recarga de biomassa. Nesse tipo de sistema, a biomassa é introduzida, o biodigestor é vedado para evitar a entrada de ar, então o gás é capturado para armazenamento em outro recipiente, deixando o biofertilizante para o final, repetindo o processo sem que o biodigestor seja reaberto. É recomendado para biomassa de fácil degradação e biomassa com grande quantidade de água. Desse tipo de biodigestores, dividem-se dois subtipos, os de operação vertical e horizontal (COMASTRI FILHO, 1981).

No caso dos biodigestores semi-contínuos ou "batch", são uma espécie de biodigestor em que a decomposição anaeróbia é interrompida para o descarte do biofertilizante após o processo. Primeiro o biodigestor é preenchido com biomassa, depois é isolado do meio ambiente para gerar o ambiente de decomposição anaeróbia. Finalizado o processo de geração do biogás, abre-se o biodigestor para recarregá-lo, reiniciando o processo (COMASTRI FILHO, 1981).

Segundo Sanderson, (2013) ela conseguiu fabricar biorreatores a partir de recipientes de vidro com volume de 50 a 100 ml, hermeticamente fechados para evitar a entrada de ar atmosférico. Uma seringa de 10 ml foi colocada na entrada do recipiente para medir o volume de biogás gerado por dia. Todos os biorreatores estavam dentro de uma estufa com temperatura e umidade controladas e sem incidência de radiação solar.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado na Universidade Federal do Paraná (UFPR), campus da cidade de Palotina, no laboratório de produção de biocombustíveis (LPB), com o auxílio do Centro de Estudos de Pequenos Ruminantes (CEPER) e do Laboratório de Materiais e Energias Renováveis (LABMATER) para realizar experimentos e análises físico-químicos.

O experimento foi realizado em duas etapas distintas, primeiramente foi realizado o processo de ensilagem da biomassa obtida. Este processo iniciou-se com o corte da biomassa, processamento em ensiladeira para redução do tamanho das partículas de biomassa, ensilagem da biomassa com o respectivo tratamento e por fim o processo de ensilagem que durou quatro meses.

O processo de silagem feito neste trabalho foi realizado e abrangeu toda a estação do outono, até o início do inverno, ou seja, a silagem foi realizada na época de maior produção de biomassa (verão), abrindo os silos quando se inicia a estação seca e de menor produção (inverno).

Com uma quantidade considerável de Biomassa, foi feita a colheita e ensilado dos diferentes tratamentos em silos anaeróbios reutilizáveis. A ideia principal desses silos e do uso da glicerina bruta é evitar a entrada de oxigênio na massa ensilada, auxiliando na obtenção de uma silagem de boa qualidade e facilitando seu armazenamento em laboratório. Uma vez obtida a biomassa, ela é encaminhada ao laboratório para retirada das amostras e armazenamento (-18°C) para seu posterior análise.

Após o processo de silagem de biomassa, será determinado o potencial de produção de biogás e biometano dos diferentes tratamentos, a fim de analisar como os tratamentos propostos interferem na produção de biogás e como também podem influenciar na porcentagem final de biometano.

O planejamento experimental adotado para este trabalho será o delineamento inteiramente casualizado (DIC). Este planejamento consiste em atribuir tratamentos e colocá-los completamente ao acaso, para que possa ser realizado, o experimento requer que os tratamentos sejam homogêneos, (PADOVANI, 2014).

### 3.1 LOCAL DA EXPERIMENTAÇÃO

A biomassa para a silagem foi obtida da área verde do campus da Universidade Federal do Paraná (UFPR), setor Palotina nas coordenadas 24°29'61"S e 53°84'31"W<sup>1</sup>. Este terreno está sob a supervisão do hospital veterinário (HV) e é utilizado para pastagem de ruminantes, atualmente está sem animais, permitindo o crescimento de gramíneas e leguminosas.

FIGURA 6 – Corte de Gramíneas



FONTE: O autor (2021).

No dia 09/03/2021, foram cortados 35 quilos de gramíneas do gênero *Panicum* (*Panicum maximum* cv) Tanzânia-1 em uma área de campo de aproximadamente 12 m<sup>2</sup>, conforme a FIGURA 6. Imediatamente após o corte das gramíneas, toda a biomassa foi levada em sacos de nylon para o Centro de Estudos em Pequenos Ruminantes (CEPER) onde está localizada a ensiladeira Desintegradora PD-2 Pinheiro Forrageiro com saída de partículas de 1,5 cm.

O CEPER disponibilizou uma sala para armazenamento dos silos com os diferentes tratamentos realizados, sala com pouca iluminação natural que afeta os silos, além de ser um local com pouco acesso e sem contaminantes que fossem influenciar no processo de silagem. Para realizar o estudo de biogás e biometano

---

<sup>1</sup> Coordenadas obtidas do Google Maps

das amostras de silagem, os silos serem transferidos para o LPB para realizar a correta abertura dos mesmos e retirada do material ensilado.

### 3.2 MATERIA PRIMA E PREPARAÇÃO

A análise do MS% foi realizada para determinar o grau de umidade da grama cortada. Foi retirada uma amostra de 25 g de grama que foi processada para obter uma granulometria menor e levada ao LPB para preparo das amostras e o equipamento a ser utilizado para a determinação da umidade. Para a análise do MS%, seguiu-se a metodologia utilizada pela Embrapa, Procedimentos para Análise Lignocelulósica, (MORAIS; ROSA; MARCONCINI, 2010).

#### 3.2.1 Secagem da Grama coletada

Ao final dos experimentos, foi determinado que a MS% do capim coletado foi de 25,6%, ou seja, o capim recém-cortado possui uma umidade de 74,4% da massa total do capim coletado. Esse alto valor de umidade na grama pode prejudicar a silagem, pois permite o desenvolvimento de organismos que degradam e reduzem a qualidade final da silagem, (ELFERINK *et al.*, 2000).

Para reduzir o valor da umidade, foi realizado um dia de secagem ao ar livre, protegendo a grama cortada da radiação solar direta. Este procedimento é indicado por vários autores para a redução das perdas causadas pelo excesso de umidade na silagem, foi realizado de forma semelhante ao trabalho feito por Pakarinen *et al.*, (2008) para evitar as perdas causadas pelo excesso de umidade.

FIGURA 7 – Secado das Gramíneas



FONTE: O autor (2021).

Após 24 horas de secagem, o procedimento para análise de MS% foi realizado novamente para determinar o novo valor de umidade que a grama possui, o novo valor de MS% é de 34,9%, ou seja, o valor de umidade da grama foi reduzido para o valor de 65,1%. O valor final determinado é de fundamental importância para o cálculo da quantidade de massa necessária para os silos. Para este trabalho foi feita uma tabela que relaciona o volume dos silos, com o grau de umidade e densidade desejada para a silagem, realizando os cálculos, obtém-se o número de Kg de grama necessários para que cada silo seja ensilado na densidade desejada para o experimento.

### 3.2.2 Diminuição da granulometria da grama

Para a realização da silagem é necessário reduzir a granulometria, autores como Szlachta *et al.*, (2018) recomendam pré-tratamento mecânico para aumentar a área de contato com bactérias e diminuir a quantidade de oxigênio na silagem, obtendo silagem de melhor qualidade. Para a redução da granulometria do capim, foi utilizada a esiladeira do CEPER para o processamento do capim na medida de 1,5 cm (regulagem da medida na mesma esiladeira).

FIGURA 8 – Diminuição do tamanho das Gramíneas



FONTE: O autor (2021).

As partículas grandes foram removidas e processadas novamente até obter um material com granulometria uniforme, uma vez que toda a grama foi processada e com os silos preparados, iniciou-se o processo de silagem com os diferentes tratamentos.

### 3.2.3 Caracterização da matéria prima

Ao fazer o processo de silagem para tratamentos de pastagem, o autor Mari, (2003) analisa a quantidade de matéria seca de MS, cinza, extrato etéreo, fibra insolúvel em detergente neutro (NDF), fibra insolúvel em detergente ácido (ADF), celulose, hemicelulose e lignina sendo estes parâmetros importantes para a caracterização de material lignocelulósico. No processo de ensilagem foram retiradas amostras de capim em seus diferentes tratamentos para posterior análise em laboratório, as amostras foram coletadas em sacos plásticos com 25 g de cada tratamento em sacos separados e identificados conforme FIGURA 9.

FIGURA 9 – Amostras dos quatro tratamentos com seus cinco repetições



FONTE: O autor (2021).

As amostras dos tratamentos da imagem anterior foram levadas ao LPB para armazenamento nos freezers que o laboratório possui, estes estão a uma temperatura de  $-18^{\circ}\text{C}$ , o que permite que o material seja mantido em condições estáveis para a realização futura dos análises de MS%, SV %, SF%, pH, EE%, NDF, ADF, Ntotal, PB, COD, EDS, Carbono Orgânico e Ácidos Orgânicos.

QUADRO 1 – Caracterização de biomassa Lignocelulósica

<b>Análise</b>	<b>Método</b>
MS%, SV%, SF%	(MORAIS; ROSA; MARCONCINI, 2010)
NDF, ADF, Ntotal, PB	(VAN SOEST, 1963)
pH, DQO	(AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, 1995)
EE%	(ZENEBO; PASCUET; TIGLEA, 2008)

FONTE: O autor (2021).

De acordo com a metodologia descrita por Mari, (2003), amostras do material ensilado foram retiradas para realizar a medição do pH, o autor colocou 25g de amostra e 225ml de água deionizada em um liquidificador por um minuto, obtendo assim o extrato aquoso e podendo realizar a medição pH. Por fim, todo o material liquefeito foi passado por papel de filtro, o extrato foi acidificado, centrifugado e congelado para análise dos ácidos orgânicos e nitrogênio amoniacal (N-NH<sub>3</sub>).

Foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre os efeitos do congelamento das amostras de silagem para seu posterior estudo metanogênico. Foi consultado o Laboratório CIBiogás-ER, que utiliza as normas alemãs VDI 4630, que afirmam que o estudo de geração de biogás e biometano que fosse realizado a futuro, pode proceder ao congelamento das amostras a -18°C sem distinção de substrato ou tratamento. Na bibliografia consultada, (DROSG *et al.*, 2013) faz o transporte e armazenamento da biomassa para análise numa temperatura de 4°C para um curto período de tempo, para armazenamento por maior quantidade de tempo, precisa-se de uma temperatura de -18°C, sendo que este procedimento pode interferir na degradabilidade do material.

#### 3.2.4 Caracterização da Glicerina Bruta

A glicerina bruta do biodiesel que será utilizada neste experimento foi doada pela Administração Nacional de Combustíveis e Cimento Portland (ANCAP), empresa estatal da república oriental do Uruguai. São duas amostras de glicerina separadas por frascos plásticos de 1 litro (2 litros por amostra). Não foi possível obter com a empresa a caracterização físico-química da glicerina bruta.

Foi feita a caracterização da glicerina bruta para determinar ST%, SV%, SF%, DQO, pH. O autor Costa; Araújo, (2012) utilizou a metodologia segundo o Instituto de Tecnologia do Paraná (TECPAR), medições da demanda química de oxigênio (DQO) e medição de pH segundo a metodologia de (AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, 1995).

### 3.3 ENSILAGEM DAS AMOSTAS

Para avaliar o efeito da adição de glicerina no processo de silagem e garantir a reprodutibilidade das análises, foram feitos vinte amostras, divididos em controle e os tratamentos com glicerina bruta como aditivo.

O estudo de quatro tratamentos com cinco repetições foi estipulado para este trabalho, totalizando vinte amostras de silagem. Esses quatro tratamentos são compostos por cinco amostras controle e quinze amostras com glicerina. Na silagem com glicerina, foi feita nas proporções de 5%, 10% e 15% de glicerina bruta ( $\text{Kg glicerina. Kg}^{-1} \text{ST}$ ) com cinco repetições para cada tratamento. Essa variação na quantidade de glicerina permitirá analisar o efeito do aditivo no processo de silagem e estudar a variação na produção do biogás a partir da biodigestão anaeróbia.

#### 3.3.1 Silos para silagem de grama

No dia 26/02/21 foi realizada a compra e montagem dos silos onde foi realizada a silagem de biomassa. Os reatores foram construídos em tubo de PVC de 100 mm e 150 mm de diâmetro, isso porque no LPB eles possuem CAP de 150 mm (24 un) e de 100 mm (13un). Após o enchimento dos silos, as extremidades serão soldadas com as tampas de PVC CAP's.

Vinte silos foram construídos para a realização dos experimentos, doze foram construídos com a tampa de 150 mm e oito construídos com a tampa do tamanho de 100 mm. O comprimento dos silos para cada medida de tubulação será calculado em planilha Excel, para obter a mesma densidade em todos os silos.

FIGURA 10 – Construção dos silos para silagem



FONTE: O autor (2021).

Os reatores serão selados nas extremidades por CAP's de 100 e 150 mm de diâmetro que permitem o fechamento das extremidades do tubo, formando os silos. Esses CAP's serão colados com cola de PVC em três pontos equidistantes um do outro e não em toda a volta. Será feito desta forma para facilitar a remoção da cola e assim recuperar os CAP's para outras aplicações. Os pontos onde a cola será colocada serão marcados com um marcador preto para facilitar a remoção da cola.

### 3.3.2 Preparação da biomassa para ensilagem controle

Para o tratamento de controle, não será necessário o preparo de aditivos, pois a silagem será realizada apenas com grama sem uso de químicos ou fermento láctico comercial. Após o cálculo da quantidade de massa de resíduo para preencher os silos, a biomassa será colocada manualmente (com luva de látex), com cuidado para não gerar bolhas de ar no interior da silagem.

FIGURA 11 – Silo Controle na hora de preenchimento



FONTE: O autor (2021).

O fechamento dos silos será feito com o cuidado de deixar o nível de biomassa na borda do silo, desta forma quando o CAP é colocado, impede a formação de bolhas de ar na biomassa ensilada. O fechamento incorreto do silo poderia gerar perdas, efluentes e gases, gerando uma silagem de má qualidade, (TOSI; PABLOSCHOCKEN; RAVAZZI, 1982).

Após o fechamento dos silos com a silagem controle, eles serão identificados pelo número de repetições seguido da letra inicial "T", desta forma os silos são marcados como 1T, 2T, 3T, 4T e 5T. A marca será feita com marcador cor

preto impermeável na tampa que fica na parte superior do silo, permitindo fácil identificação.

### 3.3.3 Ensilagem dos tratamentos com glicerina 5%, 10% e 15%

A ensilagem dos tratamentos com glicerina foi realizada com cuidado especial. Como a glicerina bruta contém resíduos da fabricação do biodiesel, usaram-se luvas e óculos de proteção para evitar o contato com substâncias que podem gerar irritação. Da mesma forma que foi realizada no tratamento controle, os silos de glicerina serão marcados com a letra G e a % de glicerina de cada silo.

FIGURA 12 – Silos fechados já com seus tratamentos



FONTE: O autor (2021).

Para a medição da massa necessária de glicerina precisou-se de um béquer e uma balança analítica, já que a viscosidade dificulta sua medição do volume em proveta. Calculada a massa para cada reator, a glicerina é vertida no béquer até a quantidade desejada. O procedimento de ensilagem para as amostras de glicerina é exatamente o mesmo descrito acima para a amostra controle.

**Obs:** Não serão utilizadas ferramentas para homogeneização, pois as ferramentas rotativas dificultarão a mistura do aditivo e da grama.

## 3.4 APERTURA DOS SILOS

O tempo total de silagem foi de 122 dias (quatro meses) nos quatro tratamentos. Controles periódicos foram realizados no CEPER para ver e avaliar como estava ocorrendo o processo de silagem. O controle consiste em inspeção

visual, detecção de qualquer odor que possa indicar fermentações indesejáveis, emanção de líquido, abertura de um silo por excesso de pressão, entre outras coisas que possam prejudicar o experimento.

FIGURA 13 – Abertura de silo 1G5%



FONTE: O autor (2021).

Primeiramente, os CAP's são retirados de ambas as extremidades do silo, permitindo à introdução de uma ferramenta que nos auxilia na retirada correta do material ensilado do corpo do silo, descartando o material ensilado das pontas do CAP. Para retirar a silagem foram colocadas sacolas de polietileno na extremidade por onde sai o material ensilado para evitar contato mínimo do material ensilado com o oxigênio do ambiente. Uma vez que o material ensilado de cada tratamento esteja em sacos plásticos, serão retiradas amostras para congelar.

#### 3.4.1 Caracterização do material ensilado

Da mesma forma que será realizada a caracterização da grama, será realizada a caracterização do material ensilado. Foram retiradas amostras do material ensilado de todos os tratamentos para caracterizá-lo em laboratório, o que permitirá comparar os valores obtidos com os da biomassa antes da ensilagem em termos de MS%, SV%, SF%, pH, EE%, NDF, ADF, Ntotal, PB, DQO, EDS, Carbono orgânico e Ácidos orgânicos.

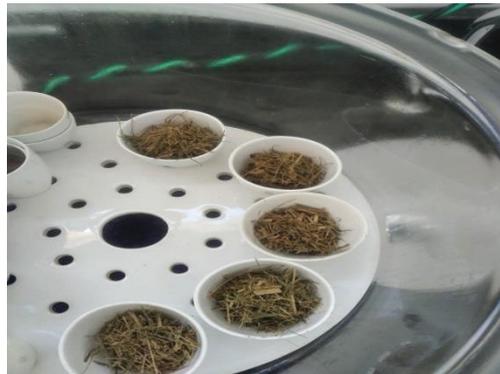
QUADRO 2 – Caracterização da silagem

<b>Análise</b>	<b>Método</b>
MS%, SV%, SF%	(MORAIS; ROSA; MARCONCINI, 2010)
NDF, ADF, Ntotal, PB	(VAN SOEST, 1963)
pH, DQO	(AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, 1995)
EE%	(ZENEBOON; PASCUET; TIGLEA, 2008)

FONTE: O autor (2021).

Na metodologia aplicada por Mari, (2003), o autor retirou amostras de silagem na área central da mesma, evitando o material nas bordas do silo, onde há maior formação de fungos e leveduras. Eliminando o material contaminado, uma amostra da silagem é separada para estudo do EE, pH, MS%, SV%, SF%, PB, NDF, FDA, celulose, hemicelulose e lignina.

FIGURA 14 – MS de silagem (Controle)



FONTE: O autor (2021).

### 3.5 BIODIGESTÃO DO MATERIAL ENSILADO

O processo de biodigestão anaeróbia foi realizado no LPB onde estão localizados os biodigestores. A primeira coisa a fazer foi à limpeza correta do interior dos reatores que compõem os biodigestores e comprovar seu correto funcionamento. Feita a limpeza e tudo funcionando, os reatores e os gasômetros foram identificados para que não ocorram erros na medição do biogás gerado.

FIGURA 15 – Os reatores no Biodigestor



FONTE: O autor (2021).

O laboratório contém dois biodigestores com seis reatores cada. Os biodigestores são de construção caseira, composta pelo corpo de um refrigerador em desuso que serve de suporte para os reatores e também serve como isolante térmico para manter uma atmosfera controlada para o correto processo de biodigestão anaeróbia.

### 3.5.1 Inoculo bacteriano

Esse material é essencial para o "start up" da digestão anaeróbia, pois possui uma carga de bactérias que auxiliam no processo inicial no biodigestor. Quando a produção de metano do inoculo bacteriano estiver em seu máximo, será quantificado o valor dos sólidos totais (TS) para ajustar a quantidade de inoculo que será utilizada dentro dos biodigestores, após esta etapa, o inoculo bacteriano estará pronto para uso (ARAÚJO, 2012).

O inoculante foi adquirido na fazenda Miotto, na periferia da cidade de Palotina. O inoculante foi retirado na saída do biodigestor canadense que a fazenda possui para o correto tratamento dos dejetos gerados pela produção de suínos. Após armazenar 20 litros de inóculo bacteriano em recipiente plástico fechado (com furo para equalizar a pressão atmosférica), foi armazenado no LPB na estufa para manter a temperatura a 37°C.

FIGURA 16 – Poço de extração de Digestato na granja Miotto



FONTE: O autor (2021).

Foi realizada a determinação de ST%, SV%, SF%, pH, DQO do digestato que será utilizado como inoculo bacteriano para os reatores. Para a utilização do inoculo foi necessária de uma semana sem alimentação até que cesse a produção de biogás, uma vez que todos os reatores tenham sido inoculados, o depósito de inoculo excedente será alimentado com glicerina bruta (5 ml para cada 15 litros de inoculo) para manter a colônia de bactérias vivas.

### 3.5.2 Preparação dos tratamentos de silagem

No dia 27/07/2021 as amostras dos tratamentos realizados foram descongeladas (controle, 5%, 10%, 15%) com suas respectivas repetições. Depois de descongelar a silagem á temperatura ambiente, o inoculo bacteriano e a água destilada é adicionada para formar o substrato que será introduzido nos biodigestores.

FIGURA 17 – Medição da quantidade de agua e inoculo



FONTE: O autor (2021).

No dia 28/07/2021 foi realizada a incubação dos reatores, primeiro foi preparado os tratamentos controle e G5%. O volume de cada reator é de 3927 cm<sup>3</sup> dos quais 80% desse volume será utilizado, sendo este o volume útil que a silagem de grama vai ocupar com o inoculo e água destilada. Os reatores com volume útil de 3142 cm<sup>3</sup> foram preenchidos com 2,514 L de água destilada a 40°C e com 0,628 L de inoculo bacteriano (20% do volume útil do reator). Por fim, 150 g de silagem foram adicionados a cada reator. Os tratamentos G10% e G15% foram inoculados no dia 05/05/2021, respeitando o mesmo procedimento e quantidades mencionadas no tratamento controle e G5%.

A etapa final foi à correta identificação dos reatores com seus respectivos gasômetros e a estabilização da temperatura do biodigestor em 37°C. A identificação dos reatores é de grande importância para não causar erros nas medições de biogás que são feitas na saída do biodigestor, como mostra a FIGURA 18.

FIGURA 18 – Biodigestores usados no LPB



FONTE: O autor (2021).

### 3.5.3 Análise do Biogás e biofertilizante

Os biodigestores estiveram em constante observação, controlando a temperatura dos reatores, funcionamento do aquecimento e medição do biogás a cada 24 horas. Após a obtenção das medições do biogás, serão analisadas para determinar os gases que o compõem, queimando o biogás excedente.

Na análise de seus dados, Sanderson, (2013) realiza medições de biogás e biometano, comparando-os entre si pelas proporções geradas. As proporções do metano foram analisadas em cromatografo de fase gasosa da marca Construmaq,

modelo U-13, equipado com detector térmico (TCD), coluna de aço inoxidável com D 80-100 e diâmetro de 1/8 polegada.

Ao final do processo, os biodigestores serão abertos para a retirada do substrato digerido de cada tratamento. Os autores Fregoso *et al.*, (2001) realizam o estudo físico-químico e bacteriológico do biofertilizante de um biodigestor da (FAO 1995), começam por analisar o substrato antes do processo de biodigestão para comparar com os dados do biofertilizante quando a biodigestão é finalizada. Foram determinados os valores de pH, COD, DBO, temperatura, N, P, K Ca, Fe, Mg, Cu, Zn.

FIGURA 19 – Cromatografo a Gás (CG)



FONTE: LABMATER (2021).

A extração do biogás foi realizada por meio de ampolas de vidro que são utilizadas especificamente para o armazenamento do biogás para posterior análise. A análise do biogás será realizada pelo uso de cromatografia gasosa (GC) que é de propriedade do LABMATER, foi combinado um dia da semana enquanto durar o experimento para levar as ampolas de biogás ao LABMATER para serem analisadas em o micro cromatografo a gás DynamIQ-S SÉRIE QMICRO- 201991017-14. Este equipamento mede os seguintes tipos de gases.

QUADRO 3 – Gases analisados pelo cromatografo

Gases	Sigla
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>
Monóxido de Carbono	CO
Metano	CH <sub>4</sub>
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
Nitrogênio	N <sub>2</sub>
Hidrogênio	H <sub>2</sub>
Sulfeto de Hidrogênio	H <sub>2</sub> S

FONTE: Adaptado LABMATER (2021).

Após o término do experimento, os reatores foram abertos para a extração do digestato formado. Por meio de uma ferramenta de corte, foi retirada a borracha de vedação dos reatores, podendo assim retirar os CAP's e retirar o efluente líquido e sólido que está dentro do reator de biodigestão.

FIGURA 20 – Apertura dos reatores depois da digestão anaeróbia



FONTE: O autor (2021).

Amostras do digestato líquido e sólido foram preparadas para análise e caracterização do material lignocelulósico sólido. Da mesma forma que na grama e na silagem, será feita a caracterização, analisando os parâmetros de MS%, SV%, SF%, pH, EE%, FDN, FDA, Ntotal, PB, DQO, EDS, carbono orgânico. Para o digestato líquido, as amostras recolhidas vão para o análise de ácidos orgânicos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como foi dito na introdução, este trabalho é composto por dois estudos distintos, o primeiro é estudar o processo de silagem de capim com glicerina bruta como pré-tratamento para biodigestão anaeróbia, o segundo estudo é analisar o potencial para a geração de biogás e biometano do material que passou pelo processo de silagem.

Duas publicações serão feitas a partir dos dois estudos realizados neste trabalho. Após a obtenção dos resultados faltantes e correção dos erros, será publicado um artigo na área de zootecnia e outro na área de biocombustíveis.

### 4.1 ESTUDO DA SILAGEM DE GRAMINEAS

Nos quatro meses que durou o processo de ensilagem foi realizado um controle periódico para observação do processo, as observações feitas foram comentadas no capítulo 3. No início da silagem, foi registrada a massa de cada reator, a ideia é fazer comparação deste valor de massa inicial com o valor de massa final da silagem.

Vinte amostras de capim, vinte amostras de silagem e doze amostras de biofertilizante sólido foram preparadas para caracterização lignocelulósica, aproximadamente 30g foram armazenados para cada amostra. Amostras foram enviadas à UNIOESTE para estudo de Ntotal e Carbono Orgânico, também foram preparadas amostras para FDN, FDA, ácidos orgânicos e PC do biofertilizante sólido a ser realizado na UFPR campus Palotina.

#### 4.1.1 Perdas na silagem

As perdas foram calculadas usando uma balança comercial no LPB, este instrumento tem uma precisão mínima de 5g, lembrando que as balanças de maior precisão não conseguem medir essa quantidade de massa dos silos.

TABELA 1 – Comparação massa inicial e final dos silos, em gramas

<b>Tratamento</b>	<b>Início</b>	<b>Fim</b>	<b>Perdas %</b>
T1	1005	995	1
T2	1015	1005	1
T3	1005	995	1
T4	1005	1000	0,5
T5	1005	995	1
1G5%	1005	990	1,5
2G5%	1000	985	1,5
3G5%	1005	990	1,5
4G5%	1000	990	1
5G5%	1000	985	1,5
1G10%	1000	985	1,5
2G10%	1000	985	1,5
3G10%	1000	980	2
4G10%	1000	985	1,5
5G10%	1005	990	1,5
1G15%	1000	990	1
2G15%	1000	1000	0
3G15%	1000	990	1
4G15%	1000	985	1,5
5G15%	1000	990	1

FONTE: O autor, (2021).

Conforme comentado no capítulo 3, não foram observadas perdas por emanações de líquidos, nem foram detectadas emanações de odor que pudessem indicar fermentação butírica nos silos. As perdas de massa que ocorreram nos reatores foram perdas aceitáveis, lembrando que a fermentação láctica consome uma pequena parte do material ensilado para o desenvolvimento de bactérias lácticas, (CARRILLO, 2003).

#### 4.1.2 Determinação de MS%, SV%, SF%

As análises de MS%, SV% e SF% foram realizadas antes e depois do processo de silagem, sendo necessário conhecer o percentual de MS do capim para

o correto processo e silagem. Essas análises foram realizadas no LPB em triplicata, obtendo os valores a seguir.

TABELA 2 – MS%, SV%, SF% dos tratamentos nos diferentes estágios

<b>Tratamento</b>	<b>Controle</b>	<b>G5%</b>	<b>G10%</b>	<b>G15%</b>
<b>Grama</b>				
MS	29%	30%	30,5%	29,9%
SV	89,1%	88,5%	89,4%	89,6%
SF	10,9%	11,5%	10,6%	10,4%
<b>Silagem</b>				
MS	26,5%	27,8%	29%	30,1%
SV	88,3%	89%	88,3%	88,8%
SF	11,7%	11,0%	11,7%	11,2%

FONTE: O autor, (2021).

O cálculo da massa de capim para silagem dos reatores foi determinado a partir dos SV% presente nas análises de capim. A quantidade de massa de glicerina também foi calculada para cada tratamento a partir da MS% do capim, a partir deste valor e a porcentagem de glicerina de cada tratamento é que foi determinada a massa de glicerina, tabela em anexo.

Houve diminuição da MS% do tratamento controle em relação aos tratamentos contendo glicerina, comparando o tratamento controle com o G15%, vemos uma relação diretamente proporcional entre o aumento do percentual de glicerina e o aumento da MS%, que beneficia a silagem com alto grau de umidade.

A inspeção visual na abertura dos silos evidenciou a formação de fungos nos tratamentos controle (FIGURA 22), nas proximidades das tampas CAPs, porém, nos tratamentos com glicerina, não foi observada formação de fungos em nenhum dos silos. Foram determinados o ST%, SV% e SF% do digestato e da glicerina bruta, diferentemente das amostras sólidas, a análise das amostras líquidas foi realizada de acordo com os padrões da (AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, 1995).

TABELA 3 – ST%, SV%, SF% para amostras líquidas

<b>Amostra</b>	<b>ST%</b>	<b>SV%</b>	<b>SF%</b>
Digestato	0,46	59,4	40,6
Glicerina	58,6	89,5	10,5

FONTE: O autor, (2021).

Como esperado, a quantidade de ST% do digestato é baixa, isso se deve principalmente ao tipo de resíduo que é utilizado nesses biodigestores, além do fato de o digestato ter sido retirado da parte superior do biodigestor, pois as frações mais pesadas do digestato são encontradas nas camadas mais profundas do biodigestor.

A glicerina bruta tem mais de 40% entre umidade, metanol e outros álcoois. Essa alta quantidade de umidade e álcoois na glicerina beneficiam consideravelmente a microbiologia da silagem e seu posterior uso para biodigestão, pois moléculas simples servem de alimento para as bactérias produtoras de ácido láctico (CARRILLO, 2003). No entanto, não é recomendável que esses álcoois venham de fermentações indesejáveis, como a fermentação butírica, (DA SILVA, ESTELA JORGE ALVES *et al.*, 2008).

Na adição de glicerina bruta, os autores Dias *et al.*, (2014) obtiveram silagens com maior percentual de MS%, também foi observado menores perdas na silagem em comparação com o tratamento controle. A glicerina funciona como inibidor da atividade de microrganismos daninhos, ajudando na conservação da silagem.

#### 4.1.3 Extrato Etéreo

Para realizar a extração de lipídios, a metodologia utilizada foi dos autores Zenebon; Pascuet; Tiglea, (2008) que usa o extrator Soxhlet usando um solvente quente. O experimento foi realizado em triplicata para cada tratamento a partir da MS%, obtendo os valores finais a partir da média dos valores.

TABELA 4 – EE% em MS% no material lignocelulósico

<b>Tratamento</b>	<b>Controle</b>	<b>G5%</b>	<b>G10%</b>	<b>G15%</b>
Gramma	1,25	1,75	2,15	2,62
Silagem	1,85	1,89	2,64	4,33
Digestato Solido	0,67	0,70	0,85	0,79

FONTE: O autor, (2021).

A glicerina bruta do biodiesel pode ter contribuído para o aumento do EE% nos tratamentos com glicerina, porém, o tratamento controle teve um aumento na porcentagem de extrato etéreo sem adição de glicerina. O autor Dias *et al.*, (2014) fez a medição de EE% da glicerina bruta que foi utilizada como aditivo para silagem,

o percentual obtido foi de 10,8% de EE% na glicerina bruta. Segundo Soares *et al.*, (2010) citado por Dias *et al.*, (2014), os contaminantes presentes na glicerina bruta (óleo, catalisador e álcool) explicariam o aumento de EE% na silagem.

Comparando o valor de EE% no tratamento controle com o tratamento de 15% de glicerina na silagem, observa-se um aumento de 57,3%. Na silagem de capim Tifton 85, os autores Rigueira *et al.*, (2017) obtiveram valores de aumento de EE% em torno de 67,4% em seus tratamentos de silagem com 15% de glicerina bruta. Rigueira *et al.*, (2018) relataram valores no aumento de EE% de 68,8% na silagem de capim elefante com a adição de 15% de glicerina bruta.

Na próxima imagem mostra-se a diminuição de EE% no solvente mostrando como as gorduras e óleos foram consumidos pela ação das bactérias responsáveis pela geração do biogás.

FIGURA 21 – Comparação da cor do EE% Controle



FONTE: O autor, (2021).

Um efeito contrário ao aumento de EE% é observado no trabalho de Gomes *et al.*, (2015) na adição de glicerina purificada em silagem de cana-de-açúcar. Quando os contaminantes (lipídios, gorduras, óleos) foram removidos da glicerina bruta, os valores de EE% diminuíram em relação ao aumento de glicerina na silagem.

#### 4.1.4 Determinação de NDF%, ADF% e PB%

A análise da composição da parede celular do material lignocelulósico foi realizada de acordo com o procedimento utilizado por (VAN SOEST; ROBERTSON; LEWIS, 1991). A tabela a seguir mostra os valores obtidos para PB%, NDF%, ADF% e RM%.

TABELA 5 – Análise de NDF, ADF, PB e RM da grama e silagem, em MS%

<b>Tratamento</b>	<b>NDF%</b>	<b>ADF%</b>	<b>PB%</b>	<b>RM%</b>
<b>Grama, em MS%</b>				
T1	76,68	47,15	8,75	11,80
T2	74,81	45,71	8,25	11,32
T3	75,36	44,23	9,14	11,68
1G5%	72,99	42,86	7,38	10,70
2G5%	74,43	46,18	7,31	10,90
3G5%	73,65	45,20	7,71	11,00
1G10%	68,76	42,02	8,14	11,88
2G10%	67,98	41,98	8,08	11,72
3G10%	71,38	42,45	7,85	11,72
1G15%	68,82	42,83	6,72	10,74
2G15%	68,65	39,89	7,08	10,70
3G15%	66,99	39,82	6,99	10,39
<b>Silagem, em MS%</b>				
T1	77,69	47,80	7,99	11,74
T2	78,36	46,83	7,20	12,06
T3	75,93	47,95	7,99	12,10
1G5%	74,92	46,36	7,26	11,63
2G5%	74,52	44,16	7,53	11,81
3G5%	72,52	43,87	7,72	12,09
1G10%	72,27	42,84	7,19	12,08
2G10%	71,86	44,03	7,60	12,21
3G10%	73,85	42,99	6,95	12,86
1G15%	70,96	40,82	7,18	11,83
2G15%	70,64	43,07	7,50	11,81
3G15%	69,79	40,88	6,75	11,60

FONTE: Modificado CEPER, (2021).

Como pode ser visualizado na tabela acima, não houve alterações significativas entre os valores no início da silagem e após a abertura dos silos. Ribeiro, (2007) não encontrou efeito significativo da ação bacteriana ou enzimática sobre a fração fibrosa nas silagens de capim Marandu e Tanzânia. O autor relata ainda que nos trabalhos consultados avaliando o efeito dos inoculantes, foram

encontrados resultados semelhantes aos observados no experimento, destacando que inoculantes contendo bactérias não alteram significativamente os carboidratos estruturais.

Os autores Coan *et al.*, (2001, *apud* Ribeiro, 2007, p. 81) “não observaram efeito do inoculante bacteriano e das enzimas sobre a fração hemicelulose na silagem de capim Tanzânia e Mombaça, também corroborado pelo autor que cita o trabalho”. Os mesmos autores citados por Ribeiro, (2007) obtiveram valores do ADF em silagem de capim do gênero *Panicum* com valores de 36,2% na presença de inoculo bacteriano e 36,5% sem o uso de inoculo, reafirmando que as ações de bactérias homoláticas e heteroláticas não foram eficazes em alterar o ADF do material lignocelulósico.

A ineficiência de bactérias homoláticas e heteroláticas em degradar frações de celulose e lignina é observada por (VAN SOEST, 1994). Os autores relatam que essas frações da parede celular do material lignocelulósico permanecem estáveis quando ensiladas em silos, sendo o material atacado apenas na presença de fungos. Neste trabalho, a silagem foi realizada em silos com presença mínima de fungos, resultando em uma excelente silagem que manteve a qualidade do material lignocelulósico, justificando assim os resultados dos autores citados neste parágrafo.

O autor ainda fala que a lignina é o principal composto que dificulta e limita a exposição dos compostos que forma a parede celular das plantas (celulose e hemicelulose), compostos que são utilizados pelos animais na digestão para obtenção de energia.

Os valores de NDF%, ADF% e PB% informados por Ribeiro, (2007) para a silagem de capim Marandu sem aditivos foram 71,4%, 42,0% e 6,7% respectivamente, valores que se aproximam dos resultados obtidos neste trabalho. Para o autor citado, esses valores caracterizam a silagem com valor nutricional inferior ao desejado (no caso de ração de ruminantes), porém, esses valores estão dentro dos valores esperados para material lignocelulósico.

Nos valores obtidos antes e após a silagem, observa-se uma diminuição linear nos valores de FDN% e ADF% relacionados à inclusão de glicerina bruta. Esse fenômeno pode ser devido à inclusão de glicerina, alterando os valores do capim antes e depois da ensilagem. Valores semelhantes foram relatados por Rigueira *et al.*, (2018), onde foi observada uma diminuição linear nas frações de FDN% e FDA%, mas não foi significativa em comparação com o tratamento controle.

Em culturas de silagem utilizadas para produção de biogás, como milho e sorgo, os autores Herrmann; Heiermann; Idler, (2011) não observaram diferença nas taxas de PB% e ADF%, no entanto, para o valor de FDN% do sorgo observou-se um decréscimo antes e depois da silagem. Os autores ressaltam que não encontraram relação entre os compostos descritos e os aditivos de silagem utilizados, nem com o tempo de armazenamento em que o processo de silagem foi realizado.

#### 4.1.5 pH

O controle do potencial de hidrogênio é de fundamental importância para determinar se a silagem é de qualidade ou não. A literatura consultada é unânime em destacar o pH como uma das variáveis mais importantes para o correto controle da silagem, seja qual for a biomassa utilizada para silagem.

TABELA 6 – pH no início e fim da silagem do capim

<b>Tratamento</b>	<b>Início</b>	<b>Fim</b>
T	6,1	6
G5%	6,2	5
G10%	6,5	5
G15%	6,6	5,2

FONTE: O autor, (2021).

A tabela anterior mostra como a adição de glicerina permitiu a diminuição do pH ao final da silagem em relação à silagem controle. Isso permitiu obter uma silagem com menor formação de fungos como foi observado no momento da abertura dos silos, além disso, os tratamentos com glicerina apresentaram maiores taxas de conversão de biometano. Os autores Mruzek; Groda, (2011) no seu trabalho descrevem que as maiores taxas de metano geradas foram quando o pH da silagem estava entre 4,0 e 5,3.

O maior valor de pH registrado foi nos tratamentos com glicerina bruta, isso se deve à inclusão de glicerina nos tratamentos e por possuir um pH elevado, principalmente devido aos resíduos de KOH presentes na glicerina bruta pela reação de transesterificação, entretanto, a utilização de glicerina bruta permitiu também a diminuição do pH da silagem, o que permite eliminar patógenos que desenvolvem fermentações indesejáveis nos silos.

TABELA 7 – pH no início e fim da digestão anaeróbia

Tratamento	Início	Fim
T1	7,9	7,5
T2	7,8	7,6
T3	8,0	7,6
1G5%	7,9	7,5
2G5%	7,8	7,5
3G5%	7,9	7,6
1G10%	7,7	7,5
2G10%	7,8	7,4
3G10%	7,7	7,4
1G15%	8	7,7
2G15%	7,8	7,5
3G15%	8	7,6

FONTE: O autor, (2021).

FIGURA 22 – Tratamento Controle com formação de Fungos



FONTE: O autor, (2021).

Após a preparação dos reatores com os tratamentos para geração de biogás, mediu-se o pH em cada reator para determinar se os reatores tinham um pH baixo que os acidificasse, os valores indicam que os reatores não foram incubados com pH ácido, sendo este de fundamental importância para que os reatores não acidifiquem e interrompam a produção de biogás no processo de biodigestão.

Entretanto, em vários períodos na biodigestão observou-se acidificação dos reatores, deixando de produzir biogás e gerando na sua maioria dióxido de carbono e traços de hidrogeno.

TABELA 8 – pH do Digestato e Glicerina

Amostra	pH
Digestato	7,4
Glicerina Bruta	8,6

FONTE: O autor, (2021).

O pH do digestato trazido da granja foi medido imediatamente após a chegada da amostra ao laboratório, o valor está próximo do neutro. Verificou-se pela bibliografia que esse valor está dentro da faixa aceitável de pH ao final da biodigestão anaeróbia, observando também que praticamente teve o mesmo valor do digestato líquido dos reatores abertos, dados na tabela 7.

A glicerina bruta possui um pH que já está fora do valor neutro, isso se deve principalmente à grande quantidade de Hidróxido de Sódio (KOH) presente, resíduo do processo de produção do biodiesel. Esta grande quantidade de potássio (K) foi observada na análise de EDS.

#### 4.1.6 Análise de EDS

Após o estudo do MS% dos tratamentos e da glicerina bruta, as cinzas foram guardadas para o mapeamento da composição química conforme tabela a seguir.

TABELA 9 – Análise de EDS da grama, silagem e biofertilizante sólido

Tratamentos %m/m	C	O	Na	F	Si	P	Mg	Cl	S	K	Ca	Fe	Al
Glicerina	19,2	44,8	-	-	-	-	-	-	-	35,2	-	-	-
Grama T	14,3	47,4	-	1,14	19,2	-	1,9	0,7	-	34,6	-	0,97	-
Grama G5%	26,6	46,6	-	1,85	14,3	-	3,3	0,6	0,82	22,4	4,52	-	-
Grama G10%	25,4	49	-	0,9	14,5	1,0	2,8	1,5	0,6	20,2	3,3	0,2	-
Grama G15%	25,8	48,7	-	1,8	11,6	-	3,4	1,5	-	29,2	4,1	-	-
Silagem T	53	39,9	-	-	5,9	0,4	1,8	0,7	0,4	12,9	3,4	0,2	-
Silagem G5%	8,9	48,8	-	1,08	19,4	-	1,26	1,08	-	32,7	-	-	-
Silagem G10%	22,82	50,1	-	1,49	6,56	0,65	3,11	1,13	0,78	23,38	4,29	0,24	-
Silagem G15%	15,73	48,3	-	2,07	9,05	-	2,14	1,18	-	29,14	3,45	0,55	-
Bio. T	8,52	50,9	4,3	-	28,4	2,3	1,69	-	0,91	8,02	4,6	1,4	1,49
Bio. G5%	20,8	52,4	2,78	-	34,2	-	0,83	-	-	4,09	1,4	0,43	-
Bio. G10%	20,9	47,4	2,08	-	21	0,74	0,95	-	-	11,27	3,41	6,51	0,59
Bio. G15%	7,14	56,1	2,59	-	30,4	-	1,72	-	-	9,4	3,58	2,12	-

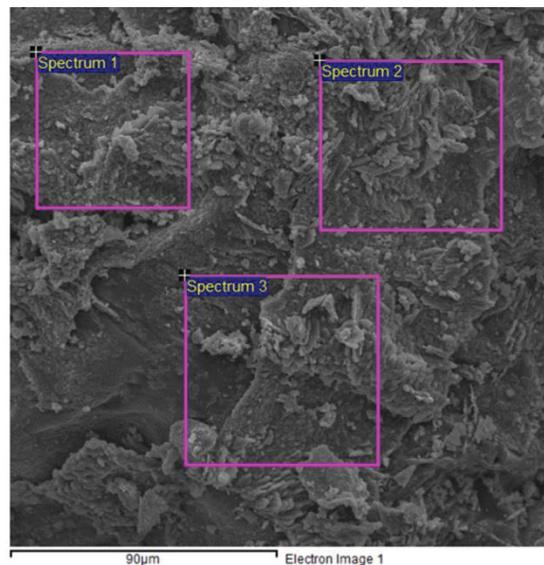
FONTE: Adaptado LABMATER, (2021).

O potássio é um dos elementos que mais chama a atenção neste estudo. Os tratamentos de gramíneas com glicerina apresentam alto teor de potássio, principalmente devido ao KOH residual da glicerina bruta. Porém, um alto teor de potássio também pode ser observado no tratamento controle, este último sem glicerina. O digestato sólido apresentou baixa quantidade de potássio, talvez devido ao fato de os microrganismos da biodigestão anaeróbia consumirem KOH e  $K^+$ .

Sódio (Na) não foi detectado em amostras de capim ou silagem, mas traços de Na foram encontrados em amostras de digerido sólido. Este fenômeno pode ser explicado uma vez que no início da biodigestão anaeróbia foram colocados 2 g de bicarbonato de sódio em cada reator para evitar sua acidificação inicial.

O fósforo (P) presente nas amostras é praticamente nulo, sendo este um elemento fundamental para a adubação do solo, seu excesso em biofertilizante prejudica o meio ambiente e deve ser removido (DA SILVA; MEZZARI, 2019).

FIGURA 23 – Imagem Cinza Glicerina Bruta de Biodiesel



FONTE: LABMATER (2021).

A presença de elementos como fósforo, potássio, nitrogênio e magnésio são de fundamental importância para os microrganismos, permitindo seu crescimento e reprodução (MAO *et al.*, 2015). Esses macronutrientes auxiliam no processo de ensilagem do material lignocelulósico, permitindo o crescimento de bactérias que realizam a fermentação láctica, além de auxiliar na biodigestão anaeróbia aos

microrganismos responsáveis pela produção dos compostos que levarão à produção do biogás.

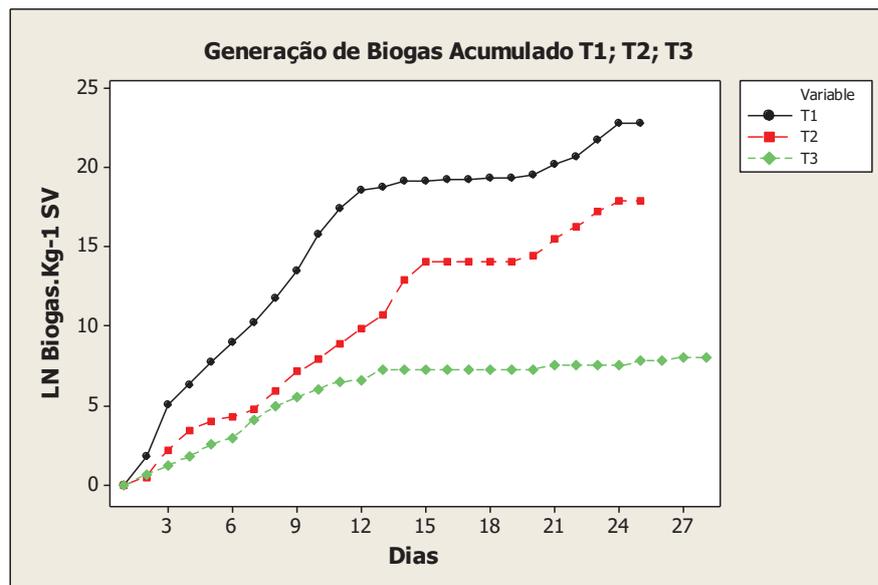
## 4.2 ESTUDO DO BIOGAS E BIOMETANO

Oito análises de biogás foram realizadas para determinar a composição dos gases em cada semana em que durou o processo de biodigestão anaeróbica. Estas análises permitem-nos compreender como se desenvolveu a fermentação anaeróbia nos diferentes tratamentos, permite-nos também ver como influencia a silagem de material lignocelulósico com diferentes percentagens de glicerina bruta. O perfil de geração de biogás permitiu uma visão mais clara de como estava se desenvolvendo a biodigestão anaeróbia, com clara diferença no perfil de geração do tratamento controle em relação aos tratamentos com maior percentual de glicerina.

### 4.2.1 Geração Acumulada de Biogás

Os gráficos a seguir mostram a geração acumulada de Biogás em triplicata nos quatro tratamentos. A medição do biogás foi em litros normais de biogás e está relacionada aos SV% da silagem em que o reator foi ensilado.

GRÁFICO 1 – Biogás na triplicata de Controle

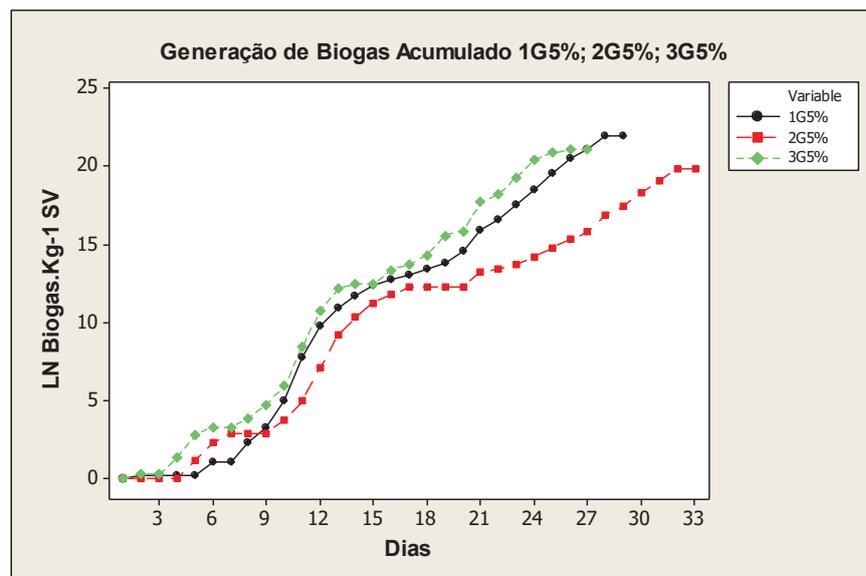


FONTE: O autor (2021).

No dia seguinte ao início do processo de biodigestão, verificou-se a geração de biogás nos três reatores de controle e foi crescendo até aproximadamente o dia quinze após o início da biodigestão. Por aproximadamente cinco dias não houve geração de biogás, após esses cinco dias voltou a gerar biogás por aproximadamente sete dias, cessando a produção de biogás. Como detalhado no trabalho de Vivanco; Yaya; Chamy, (2018); existem vários fatores que influenciam o processo de biodigestão e devem ser rigorosamente controlados para manter o reator estável.

Depois que a produção de biogás cessou, o substrato começou a clarear de uma cor escura para uma cor marrom muito clara, fenômeno que foi observado nos demais tratamentos.

GRÁFICO 2 – Biogás na triplicata de G5%

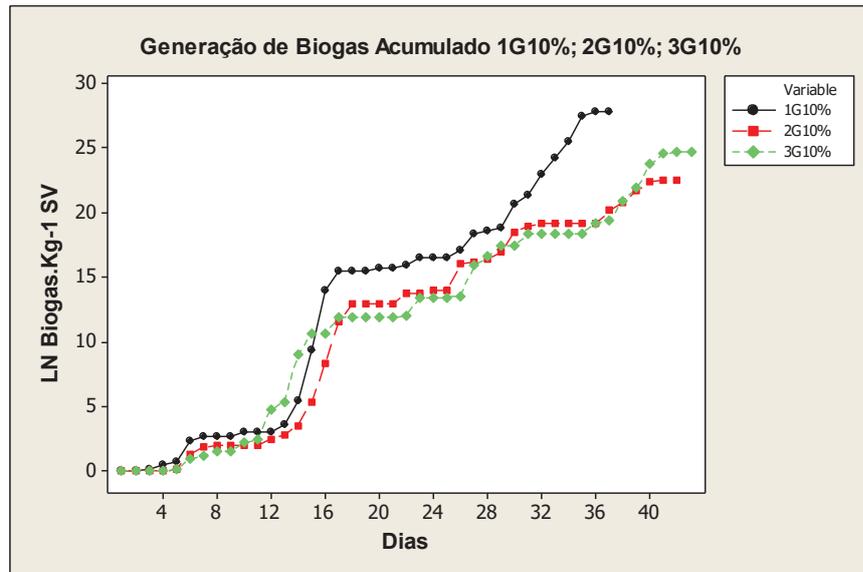


FONTE: O autor (2021).

O tratamento com G5% iniciou com um atraso de aproximadamente cinco dias na geração do biogás, no primeiro dia foi registrado um deslocamento dos gasômetros, retornando a zero depois de algumas horas. Uma das razões para isso é explicada pelo processo natural de biodigestão, no início as bactérias geram gases como  $H_2$ ,  $CO$  e ácidos orgânicos, esses gases são imediatamente consumidos por bactérias que geram gases como  $CH_4$  e  $CO_2$  (DA SILVA; MEZZARI, 2019).

A geração de biogás aumentou praticamente a partir do quinto dia até aproximadamente o dia 30, quando a produção de biogás começou a cessar.

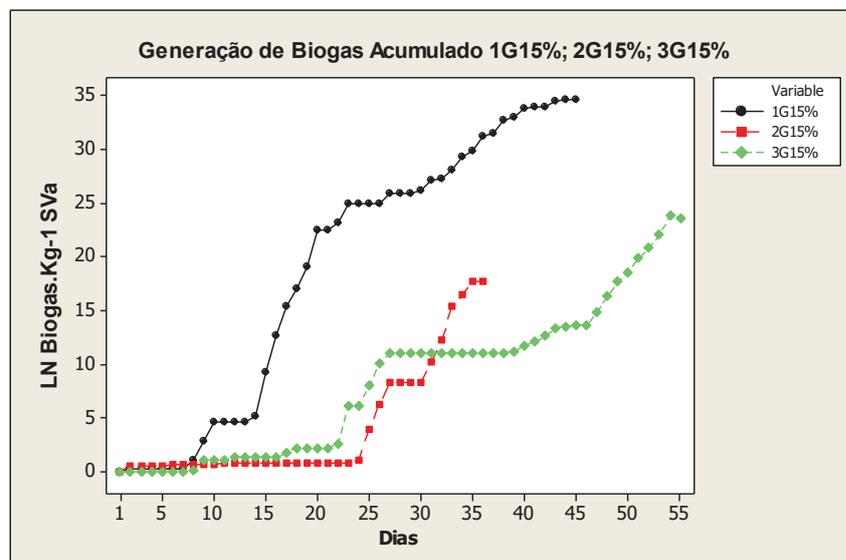
GRÁFICO 3 – Biogás na triplicata de G10%



FONTE: O autor (2021).

No tratamento G10%, foram observados três momentos onde houve acidificação do reator, seguido de um pico de geração de biogás. Observou-se que quando a geração de biogás parou, o substrato dentro do reator mudou de cor de escuro para marrom claro e após alguns dias, o substrato começou a escurecer e a produção de biogás começou novamente. A produção de biogás começou a ser significativa a partir do décimo quinto dia, tendo um atraso de 10 dias em relação ao tratamento G5% e quinze dias em relação ao controle.

GRÁFICO 4 – Biogás na triplicata de G15%



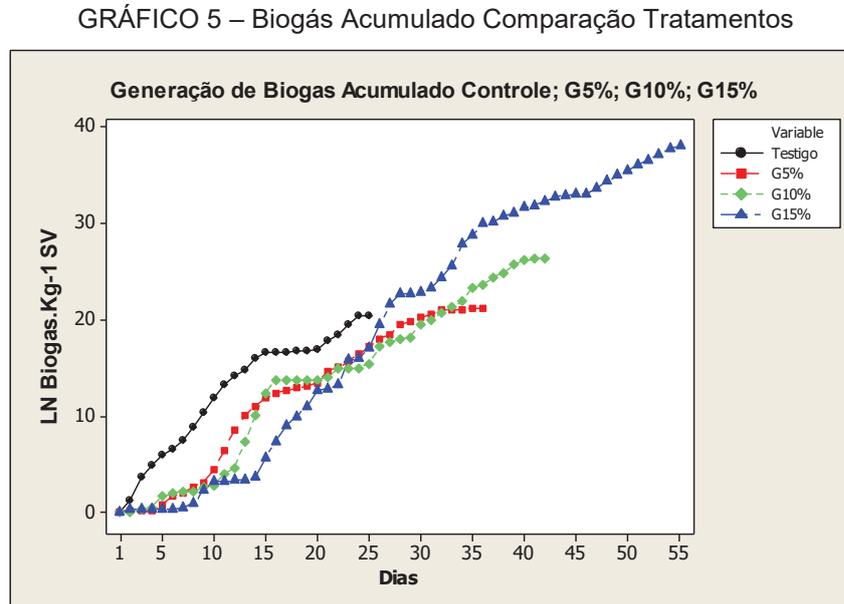
FONTE: O autor (2021).

No gráfico acima se mostra o atraso que dois dos reatores tiveram para iniciar a produção de biogás, foram praticamente 25 dias para esses reatores começarem a gerar biogás. Através da análise de biogás, foram detectados teores elevados de  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$  nas semanas em que as análises de biogás foram realizadas, além de um substrato marrom claro, indicando que a etapa de acidificação estava muito demorada.

Este último tratamento foi destacado pelo forte cheiro de amônia que o digestato emitia. Isso pode indicar que o processo de biodigestão ainda não havia terminado, por exemplo, o reator 3G15% ainda estava gerando biogás 55 dias após o início do processo de biodigestão anaeróbia.

#### 4.2.2 Geração acumulada comparação

O gráfico a seguir mostra uma comparação entre as médias dos tratamentos, permitindo uma melhor comparação nos perfis de geração de biogás.



FONTE: O autor (2021).

Como esperado, os tratamentos com glicerina foram os que geraram maior quantidade de biogás ao longo do experimento, porém, o atraso no processo de acidificação do reator gerou um atraso de praticamente um mês para que o reator se estabilizasse e começasse a gerar biogás.

O biogás acumulado no tratamento G15% foi 65% maior que a produção do tratamento G10% e quase 90% em relação ao tratamento controle e G5%, mostrando como a adição de glicerina influencia na geração de biogás.

O estudo da NDF e da ADF é fundamental para entender o papel do processo de ensilagem com glicerina. Isso permite determinar se o aumento na geração de biogás pertence apenas à adição de glicerina ou à biomassa que expôs os micronutrientes para biodigestão anaeróbia a partir da silagem.

Uma diferença importante foi como o processo de biodigestão anaeróbia muda com a adição de glicerina bruta do biodiesel. Pode-se observar pelos perfis de geração de biogás como a glicerina aumentou o tempo de acidificação do reator, praticamente sem produção de biogás.

A partir do tratamento G5%, observou-se uma instabilidade na geração de biogás, em comparação com o tratamento controle onde a produção foi bem mais estável. Amon, *et al.*, (2006) Recomenda a adição de glicerina bruta de até 6% para obter um processo estável na geração de biogás.

No entanto, o tratamento controle foi o que apresentou maior estabilidade na geração de biogás, iniciando desde o primeiro dia de produção de biogás até o dia em que cessou a geração de biogás.

A relação C/N também pode estar influenciando o perfil de geração de biogás, ao introduzir glicerina, a relação C/N é modificada e consequentemente o perfil de geração de biogás também muda, (JOS *et al.*, 2018). Foram realizadas análises para obtenção de N total e carbono orgânico para determinação da relação C/N nos diferentes tratamentos, dados não disponíveis para discussão.

#### 4.2.3 Composição do Biogás

O estudo da composição do biogás permite ter uma ideia mais clara dos processos que ocorrem dentro do reator na biodigestão anaeróbia. A análise consiste em determinar as frações que compõem o biogás. A tabela a seguir mostra os maiores valores de conversão de metano e em qual semana do processo ocorreu.

TABELA 10 – Maiores taxas de metano nos tratamentos, % de Biogás.

<b>Tratamento</b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>Semana</b>
T1	73,7%	4ta
T2	87,2%	3ra
T3	86,8%	4ta
1G5%	87,2%	2da
2G5%	88,3%	2da
3G5%	87,2%	3ra
1G10%	90,9%	5ta
2G10%	89%	6ta
3G10%	90,6%	6ta
1G15%	89,8%	6ta
2G15%	92%	5ta
3G15%	95,8%	4ta

FONTE: Adaptado LABMATER, (2021).

A partir dos dados coletados na tabela 6, pode-se afirmar que a adição de glicerina na silagem permitiu obter maiores índices de biometano em relação ao tratamento controle. Pode haver vários fatores que influenciam as taxas mais altas de metano, por exemplo, pode ser o efeito apenas da adição de glicerina bruta, sendo esta opção a mais provável.

Também pode ser atribuído ao pré-tratamento da silagem, o que poderia ter ajudado a uma melhor degradabilidade do material lignocelulósico. Por exemplo, os autores Herrmann; Heiermann; Idler, (2011) obtiveram através da silagem de forragem 11% mais metano, em relação ao tratamento controle.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através deste trabalho, foi possível ter um melhor entendimento do complexo processo de ensilagem de material lignocelulósico e como este material pode ser usado para obtenção de biogás, com altas taxas na proporção de metano.

Apesar de ainda faltar os resultados mais importantes deste trabalho, os resultados obtidos geraram uma grande fonte de informações que ainda precisam ser processadas, ajudando a desenvolver um artigo final mais completo para sua publicação.

O processo de silagem foi realizado conforme o planejado, seguindo as metodologias citadas, mostrando que o processo de silagem é ótimo para conservação da forragem, além de poder estocar grande quantidade de biomassa no período chuvoso e poder contar com material fresco quando a estação do ano é seca.

A utilização de glicerina bruta neste trabalho mostrou-se um excelente aditivo para a silagem de material lignocelulósico, auxiliando o processo de ensilagem, reduzindo perdas causadas por fermentações indesejadas. Este material utilizado para auxiliar a silagem permite o aproveitamento correto de um subproduto de difícil processo de purificação, dando uma destinação correta à glicerina bruta sem impacto ambiental em relação ao seu descarte incorreto.

Foi possível realizar o processo de biodigestão anaeróbia do material lignocelulósico da silagem, determinou-se através de experimentação que a silagem de capim é um substrato ótimo para uso em biodigestores. Também foi demonstrado que a utilização deste subproduto da fabricação do biodiesel é um potencializador na produção de biogás, melhorando significativamente as taxas de biometano.

Mais estudos relacionados ao pré-tratamento da biomassa lignocelulósica são necessários. O potencial de produção de biogás a partir da correta implantação desta biomassa é enorme, principalmente em países como o Brasil, com grande potencial para o desenvolvimento da cadeia produtiva do biogás.

## REFERÊNCIAS

ABU-DAHRIEH, Jehad K et al. The Potential for Biogas Production from Grass. **Jordan International Energy Conference**, p. 7, 2011.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. . [S.l: s.n.], 1995.  
Disponível em: <<https://www.standardmethods.org/>>.

AMON, T. et al. **Biogas production from maize and clover grass estimated with the methane energy value system**. . Vienna: [s.n.], 2004.

AMON, Th et al. Optimising methane yield from anaerobic digestion of manure: Effects of dairy systems and of glycerine supplementation. **International Congress Series**, v. 1293, p. 217–220, 2006.

ARAÚJO, Laura Costa Alves De. Co-digestão anaeróbia dos dejetos de ovinos e glicerina bruta. 2012. 41 f. **Universidade Federal da Grande Dourados**, 2012.

BARR, S.P.; ROBERTS, M.J. Creating biogas from urban grass clippings. 2010. 1–9 f. **University of Canterbury**, 2010.

BEN. **Matriz energética e elétrica**.

Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 1 fev. 2022.

BIASI, Carlos et al. **Energias Renováveis na Área Rural da Região Sul do Brasil**. 1ª ed. Foz do Iguaçu: Itaipu Binacional, 2018.

Disponível em: <<http://www.apren.pt/pt/energias-renovaveis/destaques>>.

CARRILLO, Leonor. Microbiología Agrícola. Salta: **Universidad Nacional de Salta**, 2003. v. 5. Disponível em: <<http://www.unsa.edu.ar/matbib>>.

CECCHI, Heloisa Máscia. **Fundamentos teóricos e práticos em análise de alimentos**. 2da. ed. Campinas: EDITORA UNICAMP, 2003.

CHIUMENTI, Alessandro et al. Biogas from fresh spring and summer grass: Effect of the harvesting period. **Energies**, v. 11, n. 6, p. 13, 2018.

COMASTRI FILHO, José Anibal. Biogás - Independência energética do pantanal Matogrossense. -Circular Técnica nº 9 **EMBRAPA**. Corumbá: DA UEPAE, 1981.

CORTEZ, Luís Augusto Barbosa; LORA, Electo Eduardo Silva; AYARZA, Juan Arturo Castañeda. Biomassa no Brasil e no mundo. In: CORTEZ, LUIS; LORA, ELECTO; GÓMES, EDGARDO (Org.). . **Biomassa para energia**. Campinas: Editora da Unicamp, 2008. p. 734.

CREMONEZ, Paulo André et al. Biodigestão anaeróbia no tratamento de resíduos lignocelulósicos. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 2, p. 21–35, 2013.

DA SILVA, Estela Jorge Alves et al. Efeitos do teor de carboidratos solúveis sobre as características da silagem de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 37, n. 8, p. 1375–1382, 2008.

DA SILVA, Marcio; MEZZARI, Melissa. Tratamento e purificação de biogás. In: KUNZ, AIRTON; STEINMETZ, RICARDO LUIS RADIS; AMARAL, ANDRÉ CESTONARO (Org.). *Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato*. 1er. ed. Concórdia: **EMBRAPA**, 2019. p. 13–26.

DIAS, A. M. et al. Ureia e glicerina bruta como aditivos na ensilagem de cana-de-açúcar. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, v. 66, n. 6, p. 1874–1882, 2014.

DIOHA, I et al. **Effect of carbon to nitrogen ratio on biogas production**. *International Research Journal of Natural Sciences*, v. 1, n. 3, p. 1–10, 2013.

DROSG, Bernhard et al. Analysis and characterisation of biogas feedstocks. In: WELLINGER, ARTHUR; MURPHY, JERRY; BAXTER, DAVID (Org.). *The Biogas Handbook: Science, Production and Applications*. 1. ed. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2013. p. 52–84.

ELFERINK, Stefanie J W H Oude et al. **Silage fermentation processes and their manipulation**. *FAO Plant production and protection papers*, p. 17–30, 2000.

FONTANA, Ademir; CAMPOS, David Vilas Boas De. Carbono Orgânico. In: TEIXEIRA, PAULO CÉSAR et al. (Org.). *Manual de métodos de análise de solo*. 3era. ed. Brasília: **Embrapa**, 2017. p. 574.

FREGOSO, Manuel et al. **Producción de biofertilizantes mediante biodigestion de excreta líquida de cerdo**. *Terra*, v. 19, n. 4, p. 353–362, 2001.  
Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57319408%0ACómo>>.

GERDES, Luciana et al. Avaliação de características agrônômicas e morfológicas das gramíneas forrageiras Marandu, Setária e Tanzânia aos 35 dias de crescimento nas estações do ano. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 29, n. 4, p. 947–954, 2000.

GOMES, Marco Antonio Bensimon et al. Aerobic stability, chemical composition and ruminal degradability of sugarcane silage with glycerin from biodiesel. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 36, n. 3, p. 1531–1543, 2015.

HERRMANN, Christiane; HEIERMANN, Monika; IDLER, Christine. Effects of ensiling, silage additives and storage period on methane formation of biogas crops. *Bioresource Technology*, v. 102, n. 8, p. 5153–5161, 2011.  
Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2011.01.012>>.

JOS, Bakti et al. Study of C/N ratio effect on biogas production of Carica solid waste by SS-AD method and LS-AD. *MATEC Web of Conferences*, v. 156, p. 7–11, 2018.  
Disponível em: <<https://doi.org/10.1051/matecconf/201815603055%0AStudy>>.

KALÁČ, Pavel. The required characteristics of ensiled crops used as a feedstock for biogas production: a review. **Journal of Agrobiology**, v. 28, n. 2, p. 85–96, 2011. Disponível em: <<http://versita.metapress.com/index/661853XJ82886402.pdf>>.

KARLSSON, Tommy et al. **Manual Básico de biogás**. 1era. ed. Lajeado: Editora univates, 2014. Disponível em: <<http://www.univates.br/editora>>.

LAMBAIS, M. R. Poluição orgânica e seu controle. In: CARDOSO, E.J.B.N.; TSAI, S.M.; NEVES, M.C.P. (Org.). **Microbiologia do solo**. primeira ed. Campinas: **Sociedade Brasileira de Ciências do Solo**, 1992. p. 359.

MAO, Chunlan et al. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 540–555, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.032>>.

MARI, Lucas José. Intervalo entre cortes em Capim-Marandu (*Brachiaria brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) Satpf cv. Marandu): Produção, valor nutritivo e perdas associadas à fermentação da silagem. 2003. 138 f. **Universidade de São Paulo**, 2003.

MCENIRY, J. et al. Grass for biogas production: The impact of silage fermentation characteristics on methane yield in two contrasting biomethane potential test systems. **Renewable Energy**, v. 63, p. 524–530, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2013.09.052>>.

MEYER-AURICH, Andreas et al. Comparative advantage of maize- and grass-silage based feedstock for biogas production with respect to greenhouse gas mitigation. **Sustainability (Switzerland)**, v. 8, n. 7, p. 1–14, 2016.

MINHO, Cátia Vieira et al. Uso da glicerina residual na geração de biogás a partir do lodo de estação de tratamento de efluentes e dejetos de aves poedeiras. **Engenharia Ambiental**, v. 9, p. 41–50, 2012.

MINISTÉRIO DE MEIO AMBIENTE. **Plano nacional de resíduos sólidos**. MMA Publicações. Brasília: [s.n.], 2012. Disponível em: <[http://sinir.gov.br/images/sinir/Arquivos\\_diversos\\_do\\_portal/PNRS\\_Revisao\\_Decreto\\_280812.pdf](http://sinir.gov.br/images/sinir/Arquivos_diversos_do_portal/PNRS_Revisao_Decreto_280812.pdf)>.

MONTEIRO, India Joelma Gatass et al. Silagem de capim-elefante aditivada com produtos alternativos. **Acta Scientiarum - Animal Sciences**, v. 33, n. 4, p. 347–352, 2011.

MORAIS, João Paulo Saraiva; ROSA, Morsyleide de Freitas; MARCONCINI, José Manoel. **Procedimentos para Análise Lignocelulósica**. . Campina Grande: [s.n.], 2010.

MOTA, Claudio J.A.; SILVA, Carolina X.A.Da; GONÇALVES, Valter L.C. Glycerochemistry: New products and processes from glycerin of biodiesel production. **Química Nova**, v. 32, n. 3, p. 639–648, 2009.

MRŮZEK, M.; GRODA, B. Analysis of biogas production from grass silage, depending on its quality. **Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis**, v. 59, n. 6, p. 239–246, 2011.

OLIVEIRA, Paulo Armando Victória De; HIGARASHI, Martha Mayumi. Geração e utilização de biogás em unidades de produção de suínos. **Embrapa suínos**. Concórdia: [s.n.], 2006. Disponível em: <<http://www.cnpsa.embrapa.br>>.

ORRICO JUNIOR, Marco Antonio Previdelli et al. The use of crude glycerin as an alternative to reduce fermentation losses and enhance the nutritional value of Piaçã grass silage. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 46, n. 8, p. 638–644, 2017.

PADOVANI, Carlos Roberto. Delineamento de Experimentos. Primeira ed. São Paulo: **Cultura Acadêmica**, 2014.

Disponível em: <[http://www.culturaacademica.com.br/\\_img/arquivos/Delineamento\\_experimentos\\_p\\_Liv\\_Virtual.pdf](http://www.culturaacademica.com.br/_img/arquivos/Delineamento_experimentos_p_Liv_Virtual.pdf)>.

PAKARINEN, Outi et al. Storing energy crops for methane production: Effects of solids content and biological additive. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 15, p. 7074–7082, 2008.

PETROBRÁS. **Biocombustíveis: 50 perguntas e respostas sobre este novo mercado**. Brasília: Newsday Consultoria de Comunicação e Marketing, 2007.

Disponível em: <[https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/matprima1\\_000g7pcetcc02wx5ok0wtedt32e6jis7.pdf](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/matprima1_000g7pcetcc02wx5ok0wtedt32e6jis7.pdf)>.

PINHEIRO, Gabriela Lúcia. **Ácidos orgânicos e Carbono solúvel em solos e resíduos**. Tese para Obtenção de Título de Doutor em Ciências do Solo, p. 99, 2012. Disponível em: <<http://repositorio.ufla.br/handle/1/523>>.

POKÓJ, Tomasz et al. Production of biogas using maize silage supplemented with residual glycerine from biodiesel manufacturing. **Archives of Environmental Protection**, v. 40, n. 4, p. 17–29, 2014.

RIBEIRO, José Leonardo. Silagens de capins Marandu e Tanzânia avaliadas quanto às perdas de conservação, perfil fermentativo, valor nutritivo e desempenho de animais, na presença de aditivos químicos, microbianos e fontes absorventes de umidade. 2007. 261 f. **Universidade de São Paulo**, 2007.

RIGUEIRA, João Paulo Sampaio et al. Fermentative profile and nutritional value of elephant grass silage with different levels of crude glycerin. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 39, n. 2, p. 833–844, 2018.

RIGUEIRA, João Paulo Sampaio et al. Níveis de glicerina bruta na ensilagem de capim Tifton 85 (*Cynodon dactylon*): perfil fermentativo e valor nutricional. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 40, n. 3, p. 655–663, 2017.

ROBRA, Sabine et al. Usos alternativos para a glicerina proveniente da produção de biodiesel: Parte 2-Geração de biogás. **Biodiesel**, n. 1C, p. 58–61, 2006.

Disponível em: <[http://tratamentodeagua.com.br/R10/Lib/Image/art\\_2057153567\\_usos\\_alternativos\\_12\\_biogas.pdf](http://tratamentodeagua.com.br/R10/Lib/Image/art_2057153567_usos_alternativos_12_biogas.pdf)>.

RODRIGUES, Patrícia de Oliveira. Uso de coquetéis lignocelulolíticos produzidos por consórcio fúngico na sacarificação de bagaço de cana de açúcar e produção de etanol. 2020. 171 f. **Universidade Federal Uberlândia**, 2020.

SANDERSON, Karina. Avaliação Da Eficiência Da Glicerina Bruta, proveniente da produção de biodiesel, na obtenção de biogás em codigestão com dejetos suínos. 2013. 61 f. **Universidade Estadual do Oeste do Paraná**, 2013.

SEIXAS, Jorge; FOLLE, Sérgio; MARCHETTI, Delmar. **Construção e funcionamento de biodigestores**. . Brasília: [s.n.], 1981.

SEPPÄLÄ, Mari et al. Biogas production from boreal herbaceous grasses - Specific methane yield and methane yield per hectare. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 12, p. 2952–2958, 2009.

Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.01.044>>.

SOUSA, Daniel et al. Uso de aditivos em forragens conservadas. 2011, Cuiabá: **I SIMBOV – I Simpósio Matogrossense de bovinocultura de corte**, 2011.

Disponível em: <<https://www1.ufmt.br/ufmt/unidade/userfiles/publicacoes/69b845336f62bf23734a48f3f892b98d.pdf>>.

SOUZA, Gilberto Batista De et al. **Método alternativo para a determinação de fibra em detergente neutro e detergente ácido**. . Brasília: [s.n.], 1999.

SZLACHTA, Józef et al. Effect of mechanical pre-treatment of the agricultural substrates on yield of biogas and kinetics of anaerobic digestion. **Sustainability MDPI**, v. 10, n. 10, p. 16, 2018.

Disponível em: <[www.mdpi.com/journal/sustainability](http://www.mdpi.com/journal/sustainability)>.

TOSI, Hugo; PABLOSCHOCKEN, Ruben; RAVAZZI, Paulo. Presença de Clostridium em silagem de milho colhido em diferentes estádios de desenvolvimento. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 17, n. 8, p. 1133–1136, 1982.

VAN SOEST, P. J. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. II. A rapid method for the determination of fiber and lignin. **Journal of the A.O.A.C.**, v. 46, p. 829–835, 1963.

VAN SOEST, P. J.; ROBERTSON, J. B.; LEWIS, B. A. Methods for Dietary Fiber, Neutral Detergent Fiber, and Nonstarch Polysaccharides in Relation to Animal Nutrition. **Journal of Dairy Science**, v. 74, n. 10, p. 3583–3597, 1991.

Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)>.

VAN SOEST, Peter. Nutritional ecology of the ruminant. 2nd. ed. New York: **Cornell University**, 1994.

VARNERO, Mariía Teresa. Manual del Biogás. -Proyecto CHI/00/G32 “Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables”.

Santiago de Chile: [s.n.], 2011.

Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>>.

VIVANCO, Elba; YAYA, Rosa; CHAMY, Rolando. Manual técnico sobre tecnologías biológicas anaerobias aplicadas al tratamiento de aguas y residuos industriales.

Valparaiso: [s.n.], 2018.

Disponível em: <[http://www.cytod.org/sites/default/files/tratamiento\\_anaerobio\\_de\\_aguas\\_residuales.pdf](http://www.cytod.org/sites/default/files/tratamiento_anaerobio_de_aguas_residuales.pdf)>.

WANG, Xiaojiao et al. Effects of temperature and Carbon-Nitrogen (C/N) ratio on the performance of anaerobic co-digestion of dairy manure, chicken manure and rice straw: Focusing on ammonia inhibition. **PLoS ONE**, v. 9, n. 5, p. 1–7, 2014.

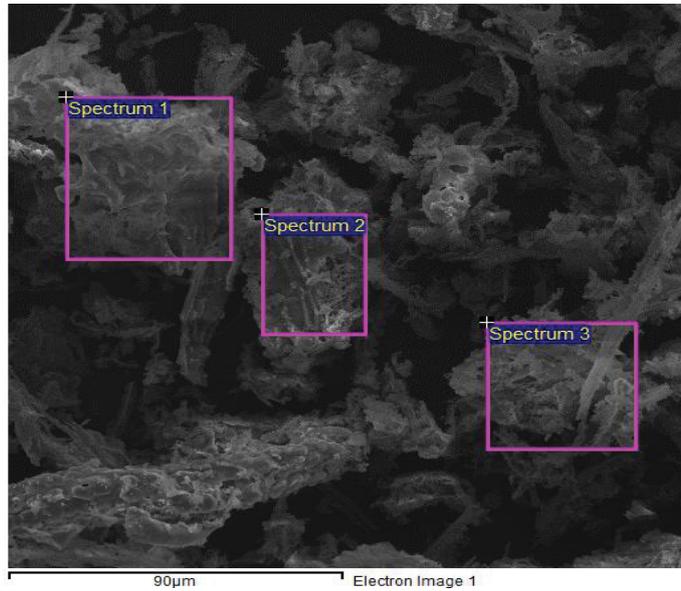
ZENEBON, Odair; PASCUET, Neus Sadocco; TIGLEA, Paulo. Métodos físico-químicos para análise de Alimentos. 4<sup>a</sup> Edição ed. Sao Paulo: **Instituto Adolfo Lutz**, 2008. v. 1.

ZUCCARI, MARIA LUCIA; GRANER, CELSO AUGUSTO FESSEL; LEOPOLDO, PAULO RODOLFO. Determinação da Demanda Química De Oxigênio (DQO) em águas e efluentes por método colorimétrico alternativo. **Energ. Agric., Botucatu**, v. 20, n. 4, p. 69–82, 2005.

## ANEXO

### FOTOS MICROSCOPIA DE VERREDURA ELETRONICA (EDS)

FIGURA 24 – Imagem Cinza Biofertilizante “T”



FONTE: LABMATER (2021).

FIGURA 25 – Imagem Silagem “G5%”



FONTE: LABMATER (2021).

FIGURA 26 – Imagem Grama “G10%”



FONTE: LABMATER (2021).

## CALCULO DA GRAMA E GLICERINA PARA SILAGEM

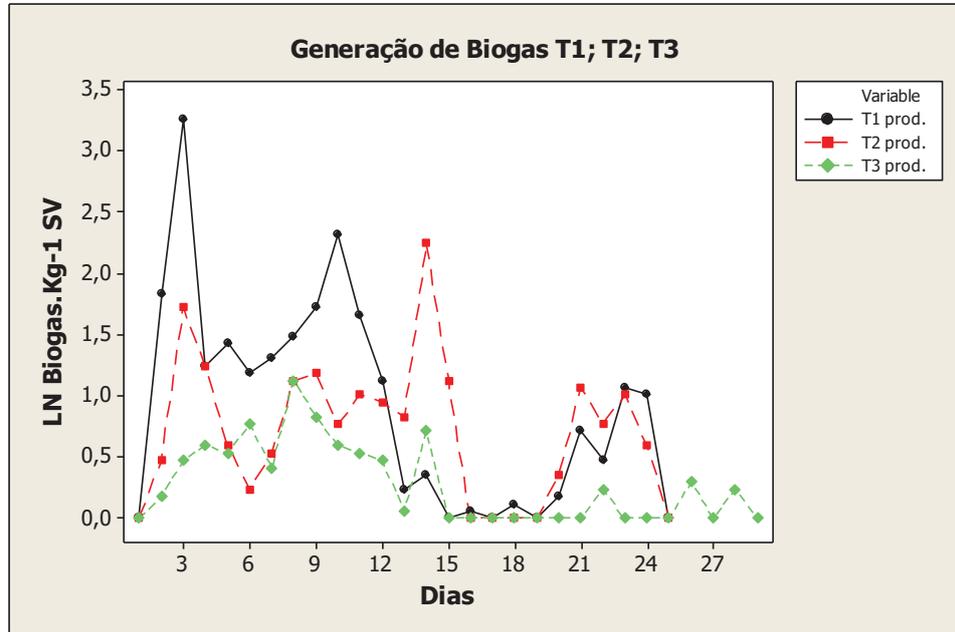
TABELA 11 – Calculo da massa de grama para os tratamentos de silagem com glicerina

Reactores	Glicerina (%/ST Grama)	CalculoDensidad Pasto em base Humeda (kg/cm3 ST)	Volumen de Reactores em 100mm (cm3)	Volumen de Reactores em 150mm (cm3)	Calculo de masa de GRAMA FRESCA (kg/kg ST)	Calculo de la glicerina necesaria (kg glic. /kg ST)	Calculo final de la masa de GRAMA FRESCA (kg/kgST)
1T	0	0,000429	-	2473,931	1,0603	0	1,0603
2T	0	0,000429	-	2473,931	1,0603	0	1,0603
3T	0	0,000429	-	2473,931	1,0603	0	1,0603
4T	0	0,000429	-	2473,931	1,0603	0	1,0603
5T	0	0,000429	-	2473,931	1,0603	0	1,0603
1G5%	5	0,000429	-	2473,931	1,0603	0,0175	1,0428
2G5%	5	0,000429	-	2473,931	1,0603	0,0175	1,0428
3G5%	5	0,000429	-	2473,931	1,0603	0,0175	1,0428
4G5%	5	0,000429	-	2473,931	1,0603	0,0175	1,0428
5G5%	5	0,000429	-	2473,931	1,0603	0,0175	1,0428
1G510%	10	0,000429	-	2473,931	1,0603	0,035	1,0253
2G10%	10	0,000429	-	2473,931	1,0603	0,035	1,0253
3G10%	10	0,000429	2513,2	-	1,0771	0,035	1,0421
4G10%	10	0,000429	2513,2	-	1,0771	0,035	1,0421
5G10%	10	0,000429	2513,2	-	1,0771	0,035	1,0421
1G15%	15	0,000429	2513,2	-	1,0771	0,0525	1,0246
2G15%	15	0,000429	2513,2	-	1,0771	0,0525	1,0246
3G15%	15	0,000429	2513,2	-	1,0771	0,0525	1,0246
4G15%	15	0,000429	2513,2	-	1,0771	0,0525	1,0246
5G15%	15	0,000429	2513,2	-	1,0771	0,0525	1,0246

FONTE: O autor, (2021).

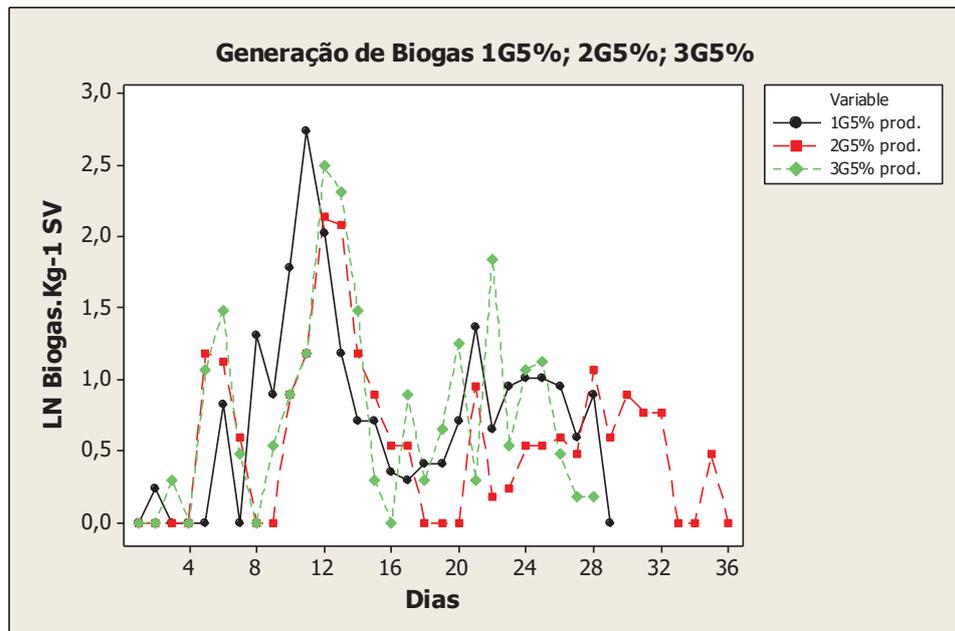
GERAÇÃO DE BIOGÁS

GRÁFICO 6 – Geração Biogás Controle



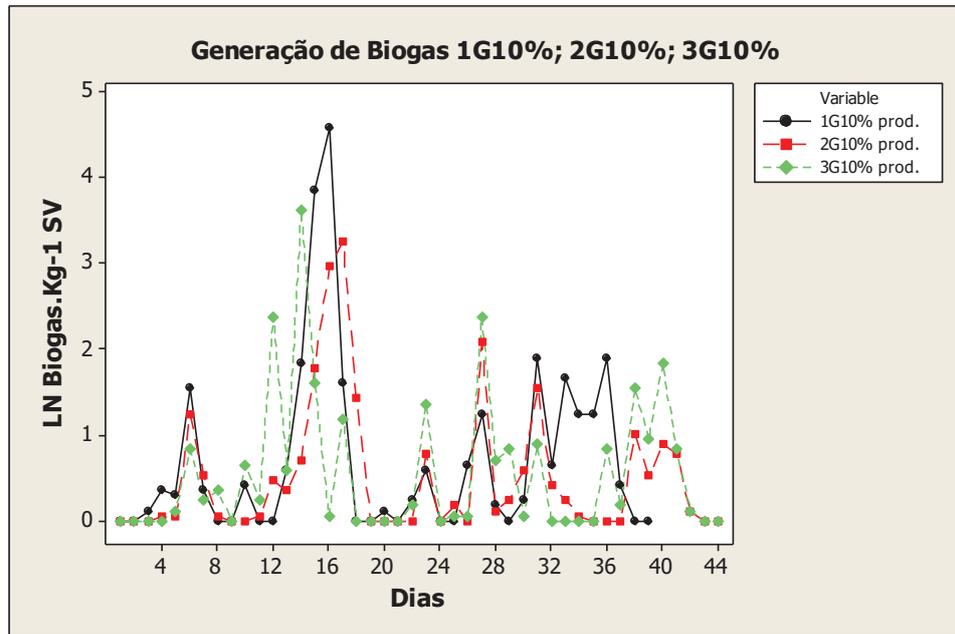
FONTE: O autor (2021).

GRÁFICO 7 – Geração Biogás G5%



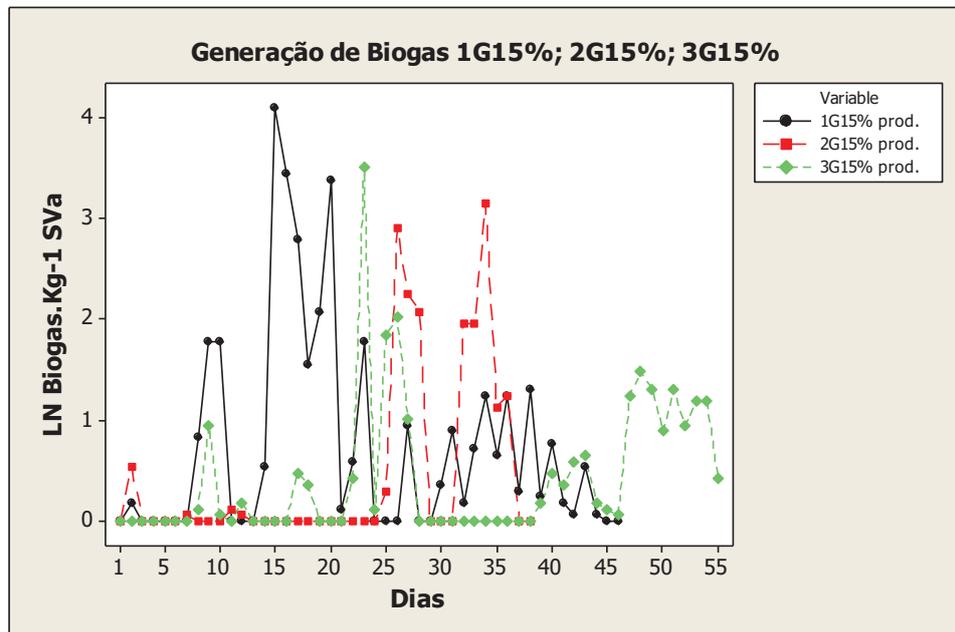
FONTE: O autor (2021).

GRÁFICO 8 – Geração Biogás G10%



FONTE: O autor (2021).

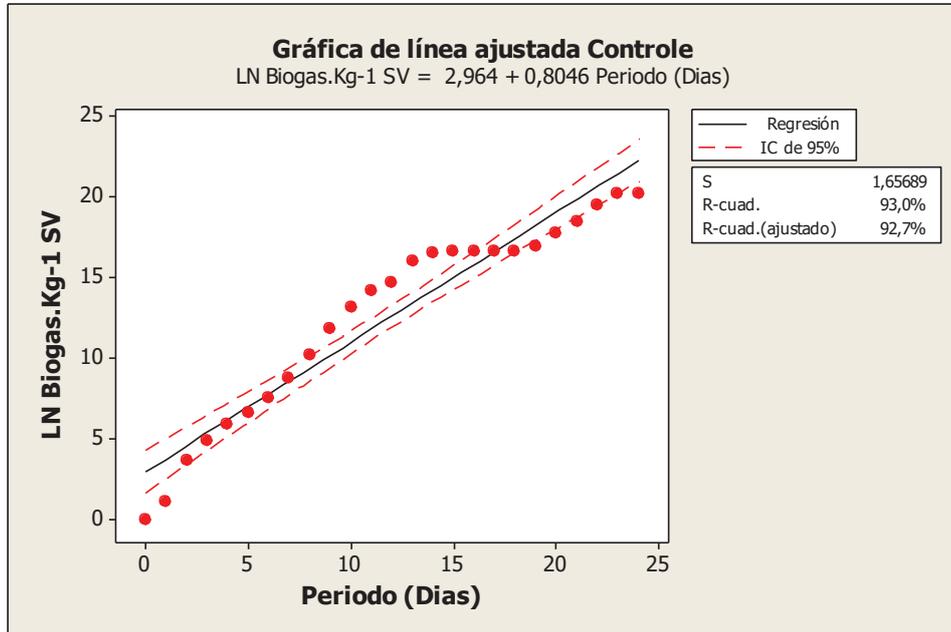
GRÁFICO 9 – Geração Biogás G15%



FONTE: O autor (2021).

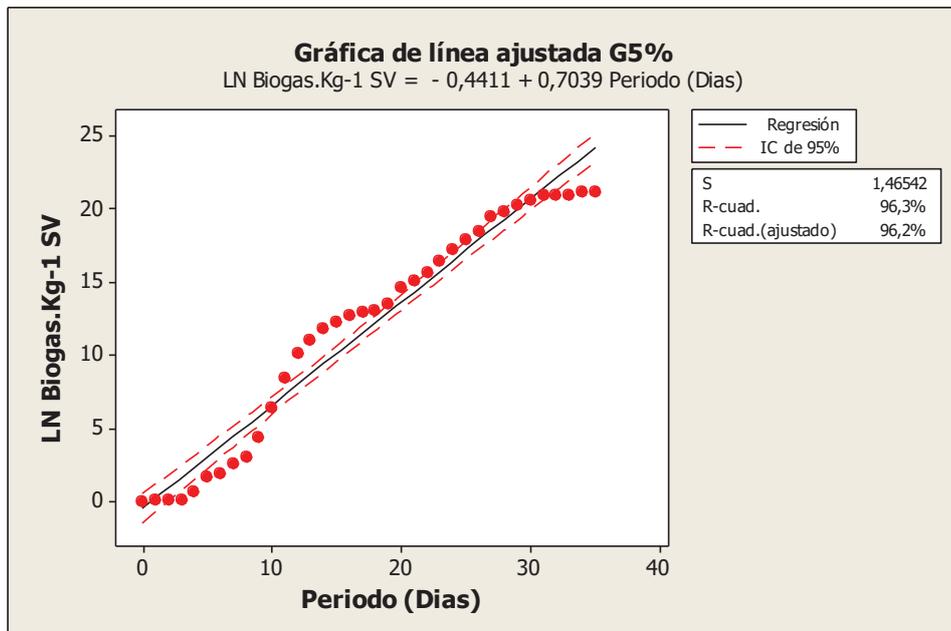
GRAFICOS DE CORRELAÇÕES

GRÁFICO 10 – Gráfico estatístico Controle



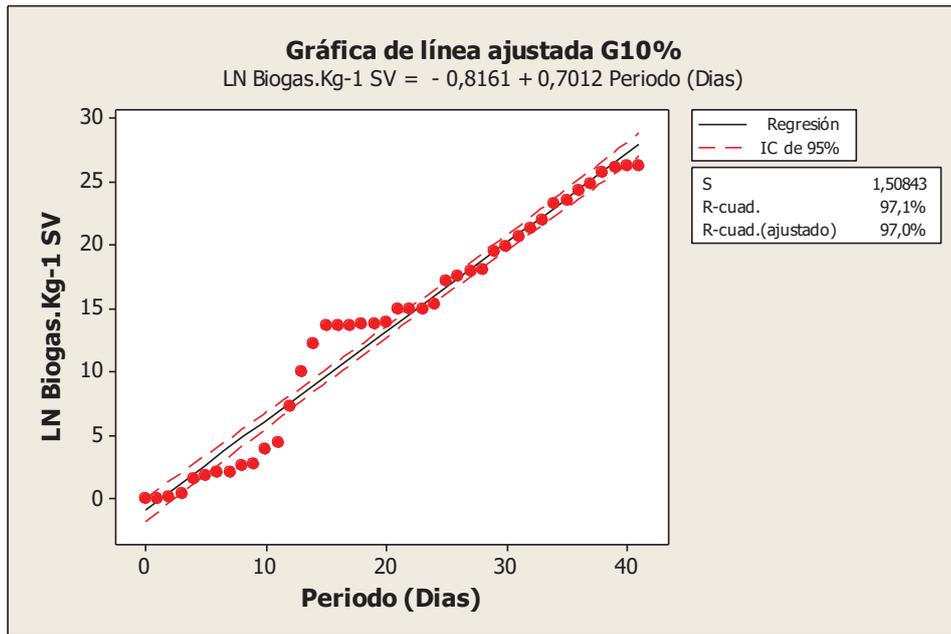
FONTE: O autor (2021).

GRÁFICO 11 – Gráfico estatístico G5%



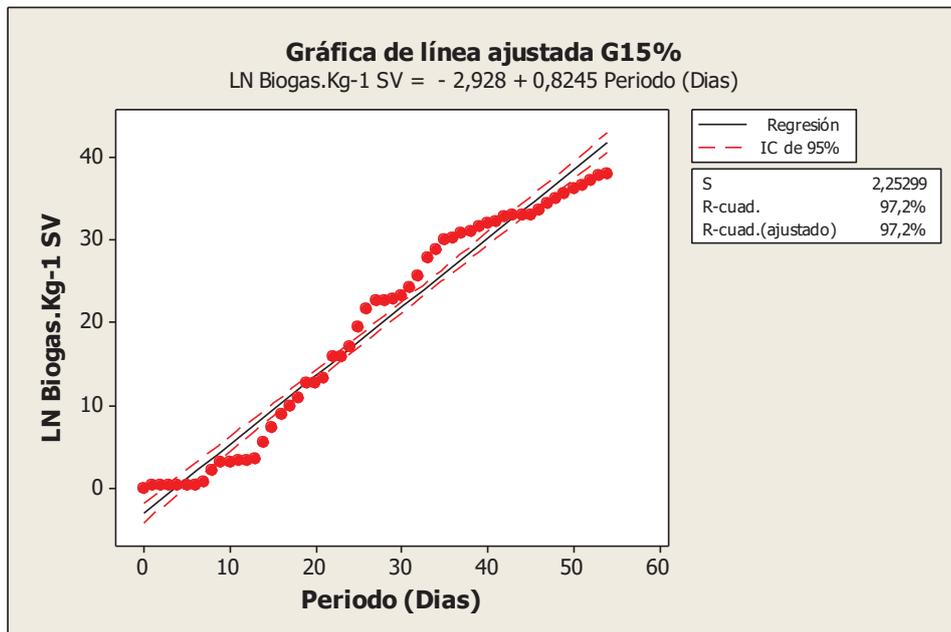
FONTE: O autor (2021).

GRÁFICO 12 – Gráfico estadístico G10%



FONTE: O autor (2021).

GRÁFICO 13 – Gráfico estadístico G15%



FONTE: O autor (2021).