



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

CENTRO DE TECNOLOGIA – CT

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MESTRADO - DOUTORADO

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS
PARA UMA UNIDADE RURAL PRODUTORA DE LEITE BOVINO
UTILIZANDO ESTERCO BOVINO COMO SUBSTRATO**

por

MATHEUS DOS SANTOS SALES

Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da

Paraíba para obtenção do grau de Mestre.

JOÃO PESSOA – PB

janeiro, 2025

MATHEUS DOS SANTOS SALES

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS
PARA UMA UNIDADE RURAL PRODUTORA DE LEITE BOVINO
UTILIZANDO ESTERCO BOVINO COMO SUBSTRATO**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós Graduação em Engenharia Mecânica como exigência
para obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Antonio Cabral dos Santos

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S163d Sales, Matheus dos Santos.

Desenvolvimento de sistema de produção de biogás para uma unidade rural produtora de leite bovino utilizando esterco bovino como substrato / Matheus dos Santos Sales. - João Pessoa, 2025.

112 f. : il.

Orientação: Carlos Antonio Cabral dos Santos.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Biogás. 2. Análise energética. 3. Biocombustível.
4. Energia renovável. I. Santos, Carlos Antonio Cabral dos. II. Título.

UFPB/BC

CDU 662.767.2(043)

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS
PARA UMA UNIDADE RURAL PRODUTORA DE LEITE BOVINO
UTILIZANDO ESTERCO BOVINO COMO SUBSTRATO**

Por

Matheus dos Santos Sales

Dissertação aprovada em 31 de janeiro de 2025

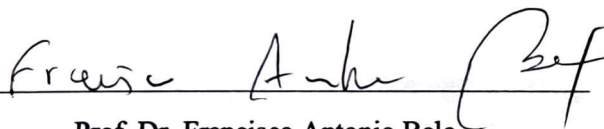
Período letivo 2024.2

BANCA EXAMINADORA



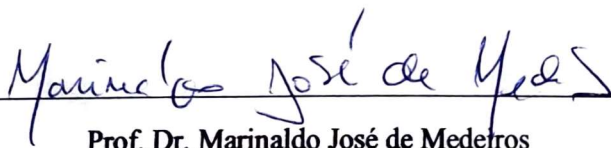
Prof. Dr. Carlos Antonio Cabral dos Santos

(Orientador)



Prof. Dr. Francisco Antonio Belo

Examinador Interno



Prof. Dr. Marinaldo José de Medeiros

Examinador Externo



Prof. Dr. Kleber Lima Cezar

Examinador Externo

JOÃO PESSOA – PB

janeiro, 2025

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, apenas Dele e por Ele, se obtém toda fonte de conhecimento.

Dedico a minha esposa Larissa, força e combustível nos dias alegres e tristes dessa caminhada.

Dedico a minha família, onde envidaram esforços para trilhar esse caminho de conhecimento que continuo a conquistar.

Dedico a todos os mestres que já passaram por minha trajetória, sejam eles acadêmicos ou apenas mestres de vida, onde cada ensinamento que foi passado, por mais simples que seja, permanecerá guardado em um espaço especial da vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus Pai Todo Poderoso por toda oportunidade a mim apresentada, agradeço por cada conquista e pelos caminhos que hão de vir.

Agradeço a minha esposa Larissa Sales, pelo apoio desempenhado durante a trajetória acadêmica, que por obra divina trilhamos juntos em uma mesma direção. Sem seu suporte e ajuda para iniciar cada nova jornada não seria possível chegar de maneira tranquila tão longe, meu muito obrigado.

Agradeço a minha família, onde por meio do nome de meu pai Abraão Sales, faço saudações a todos. O apoio familiar a educação é um pilar necessário, e esse pilar não me foi subtraído, o suporte que me foi e é oferecido, enriquece a caminhada traçada no meio acadêmico.

Agradeço a todos os professores que tive em minha vida acadêmica, sem seu zelo e dedicação de transmissão de conhecimento não teríamos alcançado marcos tecnológicos nos dias atuais. Todo agradecimento e prestígio àqueles que se dedicam na arte de lecionar.

Agradeço, em especial, ao meu orientador, amigo e conterrâneo professor Cabral, onde nesse tempo de vivência foi possível transmitir conhecimentos acadêmicos e de vida, mostrando seu lado humano e companheiro, sendo um exemplo de profissional e pessoa a seguir, meu muito obrigado.

Agradeço aos colegas do Laboratório de Energia Sustentável, onde regidos pelo professor Cabral demonstram o verdadeiro sentido da pesquisa. Agradeço pelo suporte e ajuda na busca pelo conhecimento.

Agradeço ao senhor Luiz da Costa Joaquim, por seu apoio a pesquisa desenvolvida neste trabalho e também as pesquisas do laboratório. Sendo sempre solícito as necessidades de material e nos recebendo com a simpatia que nos alegrava na pesquisa.

No mais, agradeço a todos que confiam no trabalho desenvolvido por mim, por mais que não percebam, em pequenos gestos e movimentos se tornam pessoas importantes para os caminhos que trilhei até aqui.

Agradeço a Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba pelo suporte com a bolsa de fomento durante o programa de mestrado.

*“Não há lugar para a sabedoria
onde não há paciência.”*

Santo Agostinho

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS PARA UMA UNIDADE RURAL PRODUTORA DE LEITE BOVINO UTILIZANDO ESTERCO BOVINO COMO SUBSTRATO

RESUMO

Atualmente é crescente o número de pesquisas relacionadas a busca de novas fontes energéticas renováveis, no Brasil, apesar da principal fonte de energia elétrica ser a hidroelétrica, essa não se mostra como solução. Este trabalho tem como objetivo apresentar um modelo de cadeia produtiva de biogás para uma unidade produtora de leite no estado da Paraíba com 12 animais. A pesquisa se inicia com os ensaios para avaliação energética do esterco bovino, apresentando testes de secagem e carbonização para definição de teor de sólidos voláteis e carbono fixo, seguindo a metodologia da NBR 8112. Com base dessa validação, o trabalho apresenta a modelagem de biodigestor de modelo canadense para aplicação no local de estudo, definindo parâmetros de alimentação, volume e tempo de retenção hidráulica. Com fins de realizar validações, dois modelos de biodigestores são construídos para geração no Laboratório de Energia Sustentável da Universidade Federal da Paraíba. Através da análise energética foi obtido o valor de 91,38% de carbono fixo, afirmando então o esterco bovino como uma solução energética. O biogás gerado em laboratório após testes com câmara térmica que apresentaram temperaturas favoráveis para microrganismos da fase da metanogênese, como também o teste em chama, foi possível constatar alto teor de metano na mistura. Nos resultados é apresentado uma geração de energia elétrica mensal de 969 KW, partindo de uma geração mensal de biogás de 353 m³. Ao se analisar economicamente o sistema é apresentado um retorno financeiro em 26 meses. O sistema desenvolvido é modulado e possível de implementação para outros tipos de substratos.

Palavras Chave: Análise Energética. Biocombustível. Biogás. Energia Renovável.

DEVELOPMENT OF A BIOGAS PRODUCTION SYSTEM FOR A RURAL DAIRY UNIT USING BOVINE MANURE AS A SUBSTRATE

ABSTRACT

Nowadays, there is an increasing amount of research into the search for new renewable energy sources. In Brazil, although the main source of electricity is hydroelectric, this is not proving to be the solution. The objective of this work is to present a biogas production chain model for a dairy in the state of Paraíba with 12 animals. The research begins with tests for the energetic evaluation of bovine manure, presenting drying and carbonization tests to define the volatile solids and fixed carbon content, following the NBR 8112 methodology. Based on this validation, the paper presents the modeling of a Canadian model biodigester for application at the study site, defining feeding parameters, volume and hydraulic retention time. In order to carry out validations, two biodigester models were built for generation at the Sustainable Energy Laboratory of the Federal University of Paraíba. Through energy analysis, a value of 91.38% fixed carbon was obtained, thus affirming bovine manure as an energy solution. After testing the biogas generated in the laboratory with a thermal camera that showed favorable temperatures for microorganisms in the methanogenesis phase, as well as the flame test, it was possible to see a high methane content in the mixture. The results show a monthly electricity generation of 969 KW, based on a monthly biogas generation of 353 m³. An economic analysis of the system shows a financial return in 26 months. The system developed is modular and can be implemented with other types of substrates.

Keywords: Biofuel. Biogas. Energy Analysis. Renewable energy.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	23
INTRODUÇÃO	21
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	21
1.2 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO.....	23
1.3 OBJETIVOS.....	24
1.3.1 OBJETIVO GERAL.....	24
1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	24
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	25
CAPÍTULO II.....	26
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1 ESTADO DA ARTE	26
CAPÍTULO III.....	30
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	30
3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS	30
3.1.1 RESÍDUOS SÓLIDOS RURAIS	33
3.1.2 GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS	34
3.1.3 DESCARTE DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....	35
3.2 BIOGÁS.....	35
3.2.1 BIOGÁS NO MUNDO	37
3.2.2 BIOGÁS NO BRASIL	38
3.2.3 APLICAÇÕES DO BIOGÁS.....	39
3.3 PROCESSO DE GERAÇÃO DO BIOGÁS	40
3.3.1 DIGESTÃO ANAERÓBICA.....	40
3.4 FATORES QUE INFLUENCIAM A PRODUÇÃO DE BIOGÁS.....	43

3.4.1	TEMPERATURA.....	43
3.4.2	TEMPO DE RETENÇÃO HIDRAÚLICA (TRH)	43
3.4.3	TEOR DE ÁGUA.....	44
3.4.4	AMBIENTE ANAERÓBICO	44
3.4.5	SUBSTRATOS.....	44
3.4.5.1	ESTERCO BOVINO.....	44
3.5	BIOFERTILIZANTE	45
3.6	TIPOS DE BIODIGESTORES.....	45
3.6.1	BIODIGESTOR INDIANO	46
3.6.2	BIODIGESTOR CHINÊS	47
3.6.3	BIODIGESTOR CANADENSE	48
3.7	TRATAMENTOS DO BIOGÁS.....	49
3.7.1	REMOÇÃO DE ÁGUA	49
3.7.2	REMOÇÃO DO ÁCIDO SULFÍDRICO	49
3.7.3	REMOÇÃO DE AMÔNIA	50
3.7.4	REMOÇÃO DOS SILOXANOS	50
3.7.5	REMOÇÃO DO GÁS CARBÔNICO.....	50
3.8	COMBUSTÃO ESTEQUIOMÉTRICA DO BIOGÁS	51
3.9	COGERAÇÃO	51
3.9.1	MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA (MCI).....	52
3.9.1.2	MOTORES DO CICLO DIESEL.....	55
3.9.2	GRUPO MOTOGERADOR	57
3.10	GERAÇÃO DE ELETRICIDADE ATRAVÉS DO ESTERCO BOVINO	58
3.11	AVALIAÇÃO ENERGÉTICA.....	59
3.11.1	CARBONO FIXO (CF).....	59
3.11.2	TEOR DE MATERIAIS VOLÁTEIS (TMV)	59
3.11.3	TEOR DE CINZAS (TC)	60
CAPÍTULO IV.....		61
METODOLOGIA.....		61
4.1	METODOLOGIA DESENVOLVIDA.....	61

4.2	ESCOLHA DO SUBSTRATO.....	61
4.2.1	REGIÃO	62
4.2.2	QUANTIDADE E FACILIDADE DE COLETA	62
4.3	ANÁLISE ENERGÉTICA DO ESTERCO BOVINO	63
4.3.1	LOCAL DE TESTE	63
4.3.2	MATERIAL ANALISADO	64
4.3.3	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	64
4.3.3.1	FORNO.....	64
4.3.3.2	TERMOPARES.....	65
4.3.3.3	BALANÇA.....	66
4.3.3.4	CADINHOS.....	66
4.3.4	METODOLOGIA DO TESTE.....	67
4.3.4.1	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	67
4.3.4.2	SECAGEM E CARBONIZAÇÃO.....	69
4.4	MODELAGEM LOCAL DE APLICAÇÃO DO ESTUDO DA PEQUENA CADEIA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS.....	69
4.5	ESCOLHA DO BIODIGESTOR	70
4.5.1	MODELO ADAPTADO DE BIODIGESTOR CANADENSE.....	71
4.5.2	DESENVOLVIMENTO DE LINHA DE TRANSMISSÃO DE GÁS	75
4.6	CONSTRUÇÃO DE PROTÓTIPO	76
4.6.1	PROTÓTIPO BIODIGESTOR CANADENSE	76
4.6.2	PROTÓTIPO BIODIGESTOR EM BOMBONA DE PVC	82
4.6.3	ARMAZENAMENTO DO GÁS.....	83
4.6.4	ALIMENTAÇÃO.....	84
4.7	PRODUÇÃO DE BIOGÁS NO LABORATÓRIO	84
CAPÍTULO V.....		86
RESULTADOS		86
5.1	INTRODUÇÃO.....	86
5.2	ANÁLISE ENERGÉTICA DO ESTERCO BOVINO – RESULTADOS	86
5.2.1	SECAGEM	86

5.2.2	CARBONIZAÇÃO	88
5.3	PRODUÇÃO DE BIOGÁS NOS PROTÓTIPOS.....	91
5.3.1	PROTÓTIPO TIPO LAGOA	91
5.3.2	PROTÓTIPO BOMBONA.....	92
5.3.3	ANÁLISE PRODUÇÃO	92
5.4	TESTE DE CHAMA	93
5.5	CROMATOGRAFIA	94
5.6	CADEIA PRODUTIVA LOCAL	94
5.6.1	ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS	94
5.6.2	ESTIMATIVA PRODUÇÃO BIOFERTILIZANTE.....	96
5.6.3	ESTIMATIVA PRODUÇÃO GERAÇÃO ELÉTRICA.....	97
5.6.4	PROGRAMA DE UTILIZAÇÃO DA CADEIA PRODUTIVA	98
5.6.5	ANÁLISE ECONÔMICA DO SISTEMA DA CADEIA PRODUTIVA.....	99
5.6.6	ANÁLISE AMBIENTAL	100
CAPÍTULO VI.....		101
CONCLUSÃO.....		101
REFERÊNCIAS		104
APÊNDICE I.....		111

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Geração de RSU no Brasil e no Nordeste – comparativo dos anos 2021 e 2022 (t/ano)	34
Figura 2 - Geração per capita de RSU no Nordeste e Brasil – comparativo dos anos 2021 e 2022 (kg/hab/dia).....	35
Figura 3 - Biogás na Europa.....	38
Figura 4 - Planta Biogás da Usina Cocal.....	39
Figura 5 - Processo de Digestão Anaeróbica.....	42
Figura 6 - Biodigestor Indiano.....	46
Figura 7 - Biodigestor Chinês.....	47
Figura 8 - Biodigestor Canadense	48
Figura 9 - Sistema de Cogeração.....	52
Figura 10 - Principais componentes MCI - Ciclo Otto.....	53
Figura 11 - Etapas do ciclo Otto (4 tempos).....	54
Figura 12 - Gráfico Pressão x Volume (Ciclo Otto real).....	55
Figura 13 - Gráfico Pressão x Volume (Ciclo Diesel).....	56
Figura 14 - Grupo Motogerador	57
Figura 15 - Substratos e Produtos na Usina de Biogás.....	58
Figura 16 - Multímetro conectado ao termopar.....	64
Figura 17 - Forno Tipo Mufla.....	65
Figura 18 - Equipamento de aquisição de dados	66
Figura 19 - Recipientes utilizados no ensaio	67
Figura 20 - Recipientes após a inserção de material	68
Figura 21 - Biodigestor em propriedade rural	71
Figura 22 - Vista Frontal do Sistema.....	73

Figura 23 - Vista Superior do Sistema	73
Figura 24 - Vista Isométrica do Sistema	74
Figura 25 - Linha de Transmissão Biogás	75
Figura 26- Fabricação Protótipo	77
Figura 27 - Fabricação Protótipo Continuação 1	78
Figura 28 - Construção Protótipo Continuação 2	78
Figura 29 - Estrutura de Madeira Finalizada	79
Figura 30 - Sistema de Entrada do Protótipo.....	79
Figura 31 - Parte Interna do Protótipo	80
Figura 32 - Protótipo de Biodigestor em funcionamento	81
Figura 33 - Protótipo em funcionamento.....	82
Figura 34 - Biodigestor de Bombona Plástica	83
Figura 35 - Armazenamento do Biogás	84
Figura 36 - Biogás na câmara de ar	85
Figura 37 - Material ao final do ensaio	90
Figura 38 - Pesagem substrato.....	91
Figura 39 – Chama	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição do Biogás.....	36
Tabela 2 - Poder Calorífico dos componentes do Biogás.....	37
Tabela 3 - Peso dos recipientes.....	67
Tabela 4 - Peso após inserção de material.....	68
Tabela 5 - Produção de Esterco	72
Tabela 6 - Peso após a secagem.....	87
Tabela 7 - Material Volátil após a secagem	87
Tabela 8 - Caracterização Esterco Bovino após secagem	88
Tabela 9 - Peso após carbonização	89
Tabela 10 - Teor de cinzas.....	89
Tabela 11 - Caracterização Esterco Bovino após a carbonização	90
Tabela 12 – Cromatografia.....	94
Tabela 13 - Produção de Esterco Bovino	95
Tabela 14 - Produção de Biogás.....	95
Tabela 15 - Produção Esperada de Biofertilizante	97
Tabela 16 - Energia produzida	98
Tabela 17 - Custos para implementação.....	99

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação dos resíduos quanto a sua origem	31
Quadro 2 - Classificação dos resíduos quanto a sua periculosidade	32
Quadro 3 - Classes de resíduos.....	33
Quadro 4 - Componentes a serem removidos de acordo com a aplicação	40

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

Símbolos

ϵ – Força Eletromotriz

η – Rendimento Gerador

CH₄ – Metano

CH₃COOH – Ácido Acético

CO – Monóxido de Carbono

CO₂ – Dióxido de Carbono

E – Energia Elétrica

H₂ – Hidrogênio

mc - Massa Bruta de Esterco de Vaca

m_c - Massa de Cinzas

m_s - Massa Seca

m_u - Massa Úmida

U – Tensão Útil

Abreviações

ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

CCEE -Conselho de Administração da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CF - Carbono Fixo

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento

DA - Digestão Anaeróbica

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

EPI – Equipamento de Proteção Individual

GEE - Gases de Efeito Estufa

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IEA - Agência Internacional de Energia

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

IoT - Internet da Coisas

IRENA - Agência Internacional de Energia Renovável

LABES - Laboratório de Energia Sustentável da Universidade Federal da Paraíba

ONU - Organização das Nações Unidas

PB - Paraíba

PEBD - Polietileno De Baixa Densidade

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

PVC – Policloreto de Vinila

RSU – Resíduo Sólido Urbano

TC – Teor de Cinzas

TMV – Teor de Materiais Voláteis

TRH – Tempo de Retenção Hidráulica

UFPB – Universidade Federal da Paraíba

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Atualmente nos encontramos em uma alta consecutiva na demanda por energia elétrica, isso se intensifica ainda mais em países desenvolvidos e emergentes, como é o caso do Brasil. Em um relatório de 2023, a Agência Internacional de Energia (IEA, sigla em inglês), apresentou que no ano 2024, as projeções apontavam um aumento de 3,3% na busca de energia. Para dados de comparação, o crescimento da demanda no Brasil de 2021 para 2022 foi de 1,5%, dado este apresentado pelo Conselho de Administração da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE).

Consoante a esse aumento, temos também uma crise energética generalizada, visto que, o crescimento da demanda não é acompanhado pela oferta de energia elétrica atual. Inquestionavelmente, se faz necessário a busca por novas fontes de energia, focado principalmente em alternativas renováveis. A Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA, sigla em inglês) apresentou em seu relatório de 2023 que houve um aumento de 9,5% na utilização de energias renováveis de maneira global se comparado com o ano de 2022. Um ponto de destaque desse documento é que o maior incremento ocorreu no continente asiático, com incremento de 69%, com um foco na China, que aumentou sua produção em 63%, e um

segundo ponto relevante é a afirmação de que o uso da energia hidrelétrica representa a maior fatia da geração em questão.

No Brasil, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em relatório que analisa os dados energéticos do ano de 2022, expõe a oferta energética brasileira, sendo composta por 52,6% não renovável distribuídos em: 35,7 % de Petróleo e derivados, 10,5% Gás Natural, 4,6% Carvão Mineral, 1,3% Urânio, 0,5 % outras fontes não renováveis. Os outros 47,4% são de fontes renováveis distribuídos em: 15,3% Biomassa, 12,6% Hidráulica, 9,0% Lenha e Carvão Vegetal, 7,0% Lixívia e outras fontes renováveis, 2,3% Eólica e 1,2% Solar. Desses dados é possível constatar que a principal fonte energética continua sendo o petróleo e seus derivados que equivalem a 35,7% do montante. Essa fonte pode ser intitulada como vilã, visto que, corrobora para a poluição ambiental e aumento da temperatura global, um dos causadores desse problema é geração do monóxido de carbono (CO) após a queima de seus derivados, a gasolina por exemplo. Nesse mesmo relatório é importante ressaltar que país já conta com um bom número de fontes renováveis, 47,4%, sendo que a biomassa já consegue representar cerca de 15,4% da geração energética nacional.

No documento apresentado pela EPE temos a apresentação da Matriz Elétrica Brasileira do ano de 2022, que é composta por: 61,9% Hidráulica, 11,8% Eólica, 8,0% Biomassa, 4,4% Solar, dentre outros com números abaixo desses índices. O destaque para esses dados se dá que 61,9% da energia elétrica gerada é através das hidrelétricas. Esse resultado liga um alerta, já que o país sofre por diversas vezes de uma crise hídrica, acometendo não somente uma região, mas sim, por vezes duas ou três. Por certo, a demanda de energia elétrica brasileira está ligada a taxa de precipitação anual, sendo por muitas vezes necessário o acionamento de usinas termoeletricas para suprir o déficit das hidrelétricas, aumentando assim o custo tarifário para o consumidor final, essa flutuação de valores pode ser notada pelo sistema de bandeiras nas faturas das concessionárias.

Tal situação exige então a busca por novas fontes energéticas renováveis no país. As pesquisas então se voltam a apresentar alternativas específicas para determinadas situações, de modo a potencializar a produção energética através de uma fonte abundante no local. O uso de biomassa para geração elétrica se mostra como uma dessas alternativas.

Uma alternativa que está em uma crescente de utilização e implantação no país é a utilização do biogás em grupos motogeradores de energia elétrica, sendo possível utilizar, principalmente, em indústrias e produtores do campo.

1.2 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

A busca por alternativas para as fontes de energia atuais gera uma certa dificuldade técnica que pode ser contornada com as aplicações da engenharia. Existe ainda uma escassez energética que atinge determinadas regiões do país, sendo essas áreas subaproveitadas quando observado o potencial de geração advindo dos resíduos gerados. Ao direcionarmos o olhar para regiões agrícolas podemos identificar essas situações.

A partir dessas necessidades o Laboratório de Energia Sustentável da Universidade Federal da Paraíba (LABES), fundado e instalado no ano de 2006, busca a promoção de desenvolvimento de tecnologias para produção energética através de resíduos orgânicos, sejam eles de meio urbano ou rural. Visto que a inserção desses meios alternativos de produção de energia versa para produção de novos empregos, abertura econômica para novos setores gerando um maior lucro e novas formas de produção.

Para construção dessas novas ferramentas o estudo científico é necessário, sendo estudado todo o sistema, alguns desses direcionamentos seriam as análises exergoeconômicas, exergoambiental e de desempenho. Nesse sentido, o Laboratório de Energia Sustentável direciona grupos de pesquisa para obtenção de resultados e aplicação para a sociedade.

O desenvolvimento de tecnologias para inserção de fontes renováveis será uma maneira capaz de favorecer zonas rurais e regiões distantes, atrelado a isso se tem o benefício para essas comunidades com a produção agrícola por meio de uma autossuficiência energética (COSBEY, 2011).

A busca por utilização do biogás se inicia no Brasil nos anos de 1970 a 1980, com os suinocultores, incentivados por programas governacionais que promoviam a instalação de biodigestores. Por diversas dificuldades o programa foi um insucesso (KUNZ, A.; SULZBACH, A., 2007).

Uso de biomassa como fonte energética acontece desde os primórdios da sociedade, como por exemplo o uso da lenha. No entanto, somente nas últimas duas décadas o uso dessa matéria começou a ter um desenvolvimento para ser utilizada como uma alternativa energética. O uso de fezes de animais, em especial de bovinos, objeto de estudo desse trabalho, quando inserido em biodigestores se obtém gases que podem ser utilizados para geração em grupo motogeradores ou em outras funções da instalação rural.

Com o uso desses mecanismos temos o principal benefício dos biodigestores anaeróbicos que é a produção de energia renovável na forma de metano, com isso além de reduzir as emissões de gases do efeito estufa gerado pelos dejetos (GRANDO, RL; ANTUNE, A.M.; FONSECA, *et al.*, 2017).

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desse trabalho é desenvolver uma pequena cadeia produtiva de biogás para ser instalada em unidade rural de pequeno porte, sendo ela produtora de leite bovino, o substrato utilizado será o esterco bovino.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Caracterizar o esterco bovino;
- Realizar análise energética do substrato;
- Desenvolver modelo de biodigestor para localidade;
- Desenvolver cadeia produtiva em pequena escala para utilização do biogás;
- Realizar estimativa de produção de biogás;
- Realizar estimativa de produção de eletricidade;
- Apresentar dados de rentabilidade prevista do sistema.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho de dissertação é composto de 6 capítulos e as Referências Bibliográficas, sendo apresentado um apêndice no final. No primeiro capítulo se tem uma apresentação do tema a ser estudado junto as definições dos objetivos gerais e específicos que são almejados. No segundo capítulo temos apresentação de uma Revisão Bibliográfica sobre o tema, apresentando um Estado da Arte de maneira ampla e interna ao Laboratório em que foi desenvolvido a pesquisa em questão.

No terceiro capítulo é apresentada a Fundamentação Teórica necessária para o desenvolvimento das atividades desenvolvidas neste trabalho. No quarto capítulo teremos a apresentação da metodologia desenvolvida no estudo.

No quinto capítulo são apresentados os resultados obtidos nas análises apresentadas na metodologia. De maneira final, no sexto capítulo se têm as conclusões finais observadas do trabalho como um todo, também são desenvolvidas algumas sugestões para trabalhos futuros a serem desenvolvidos.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ESTADO DA ARTE

Neste capítulo será apresentado um Estado da Arte sobre o assunto abordado no trabalho em questão. O objetivo principal dessa seção é informar as pesquisas recentes relacionadas ao tema, sendo assim apresentados alguns pesquisadores da área de maneira externa e interna ao Laboratório de Energia Sustentável (LABES).

Em sua dissertação, LIRA (2021), realizou um estudo de comparação de geração de biogás com uso de substratos agropecuários, como o esterco suíno e de aves, na região do sertão do estado da Paraíba. Neste trabalho foi possível constatar um real potencial de geração de biogás, tendo melhores resultados com o esterco suíno, tendo uma produção de 3,747 m³ em um período de 38 dias. O sistema montado apresentava uma grande exposição ao sol, o que segundo o autor, melhorou o desempenho de produção por conta das temperaturas que a região apresenta. No trabalho, também se apresenta uma aplicação de 3 tipos de microalgas com a intenção de verificar a potencialidade de uso do resíduo após a biodigestão, como um biofertilizante. De maneira geral, o autor afirma que esses sistemas podem ser aplicados em regiões rurais de pequeno porte.

THIANGCHANTA *et al* (2024), realizou um estudo aplicando diferentes dietas para vacas leiteiras, com o intuito de verificar a modificação dos teores de CO_2 e CH_4 no biogás, realizando uma análise do impacto ambiental dessa situação. Com isso, os autores relacionam que foi possível constatar que as dietas aplicadas na alimentação dos animais influenciaram nos percentuais apresentados pelo biogás gerado. Com base nos dados apresentados em seu trabalho, os autores afirmaram que o biogás gerado reduziria os Gases de Efeito Estufa (GEE) e também foi possível constatar que ele poderia ser utilizado como uma forma alternativo ao gás natural.

KUSMIYATI *et al* (2023a), aplicou um estudo na Indonésia, país que tem a quarta maior população do globo, acarretando assim um alto consumo energético. O local escolhido para o trabalho foram as pequenas fazendas com animais bovinos, enquanto o insumo utilizado foi o esterco bovino. Em seu trabalho, os autores apresentam uma visão ampla da produção de biogás através do esterco bovino em pequenas comunidades rurais, já que no país são os pequenos agricultores responsáveis pela criação bovina, cerca de 90%. Com isso, todo o planejamento para aplicação de biodigestores tem uma grande contribuição para diversos fatores, como segurança alimentar, estabilidade econômica, poluição da água e o bem-estar social. O biogás gerado através do esterco se apresenta como uma alternativa versátil e com grande contribuição para o meio ambiente, podendo ser utilizado para geração de energia elétrica e consumo em fogões de cozinha. Na pesquisa são apresentados dois tipos de biodigestores, algumas misturas necessárias para um controle na composição de biogás, métodos de purificação e um sistema de Internet da Coisas (IoT) para uma automação do sistema.

Em um segundo trabalho KUSMIYATI *et al* (2023b), analisou o potencial energético do esterco de vaca, como também o potencial ambiental e econômico. Ao se analisar países produtores de bovinos os autores apontam que é possível constatar uma problemática quanto ao descarte do esterco, assim a produção de biogás através desse insumo se torna uma boa alternativa. Um dos resultados do estudo apresentou que a instalação de uma usina de biogás pode chegar a reduzir as emissões de $CO_2/vila/dia$. O material resultante da biodigestão pode ser utilizado como um biofertilizante. Na pesquisa o potencial de geração de energia elétrica com geradores utilizando o biogás como combustível apresentou números satisfatórios. Ainda

no estudo os autores apresentam ações que visam maximizar os ganhos de modo a se torna mais rentável todo o sistema.

FETTA *et al* (2024), realizou a análise da biodigestão anaeróbica do esterco bovino, esterco de cabra e de cactos cladódios. Realizando uma avaliação da capacidade de produção diária de biogás desses materiais durante 14 dias. Foi constatado que a produção já se iniciou no primeiro dia e obteve um pico no último dia. Ao analisar os substratos de maneira inicial e após a digestão, o autor destaca que foi possível observar diferenças significativas nas composições físico-químicas dos materiais. Ao ponto que a produção de biogás aumentava existiu uma redução nos teores voláteis e sólidos totais dos materiais.

Em seguida serão apresentados trabalhos desenvolvidos por pesquisadores em suas dissertações e teses durante pesquisas e estudos no Laboratório de Energia Sustentável do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba.

ALVES (2020), sendo o primeiro trabalho do grupo do LABES relacionado as energias renováveis, apresentou em sua tese uma análise energética, exergoeconômica e exergoambiental em um sistema de trigeração alimentado por gás natural, no entanto, também foram realizados testes utilizando o biogás como combustível, especificamente o gerado no aterro sanitário do município de João Pessoa no estado da Paraíba. A partir da metodologia aplicada, o autor constatou que para uso desse biocombustível seriam necessárias algumas adaptações no grupo motor de modo a ter um melhor rendimento.

OLIVEIRA (2023), realizou testes relacionados a produção de biogás através de resíduos orgânicos, no caso da pesquisa seria os resíduos de Hortifruti, junto ao esterco de gado. Foram desenvolvidos biodigestores em série e aplicada análises exergoeconômicas e exergoambientais. O autor apresenta que foi possível concluir que a geração de biogás através da tecnologia empregada apresenta bons resultados, tendo ainda um grande espaço para aprimoramento dessa tecnologia. No entanto, para se obter retorno financeiro adequado, ficou constatado que se necessita de um grande volume de material orgânico para uma grande geração, podendo ter custos de geração elétrica que possam ser menores que os oferecidos pela concessionária do estado da Paraíba.

FEITOSA (2023), realizou um estudo metrológico para biogás. Utilizando de uma placa de Arduino Uno, modalidade de fácil programação e baixo custo, conseguiu aferir a vazão

produzida através de um biodigestor. Através de testes comparativos com outras ferramentas e instrumentos de medição a autora relata que foi possível constatar que o dispositivo apresentado teve resultados satisfatórios e aceitáveis.

CAPÍTULO III

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

A definição correta para Resíduos Sólidos é dado como o “material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível” (BRASIL, 2010). Esta definição é apresentada na Lei Nacional de Implementação da Política de Resíduos Sólidos no Brasil.

A Lei nº 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) classifica estes materiais em duas ênfases, quanto a sua origem e quanto a sua periculosidade, como SALES (2023) apresenta em seu estudo. Nos Quadros 1 e 2 temos as descrições seguindo a lei.

Quadro 1 - Classificação dos resíduos quanto a sua origem

TIPO	DEFINIÇÃO
Resíduos domiciliares	Os originários de atividades domésticas em residências urbanas
Resíduos de limpeza urbana	Os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana
Resíduos sólidos urbanos	Os resíduos domiciliares e os de limpeza urbana
Resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços	Os gerados nessas atividades, excetuados os de limpeza urbana, os de serviços públicos de saneamento básico, os de saúde, de construção civil e de transporte
Resíduos dos serviços públicos de saneamento básico	Os gerados nessas atividades, excetuado os resíduos sólidos urbanos
Resíduos industriais	Os gerados nos processos produtivos e instalações industriais
Resíduos de serviços de saúde	Os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do SISNAMA e do SNVS
Resíduos da construção civil	Os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis
Resíduos agrossilvopastoris	Os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades
Resíduos de serviços de transportes	Os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira
Resíduos de mineração	Os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios

Fonte: SALES (2023).

Quadro 2 - Classificação dos resíduos quanto a sua periculosidade

TIPO	DEFINIÇÃO
Resíduos perigosos	Aqueles que, em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, de acordo com lei, regulamento ou norma técnica
Resíduos não perigosos	Aqueles não enquadrados na definição de resíduos perigosos

Fonte: SALES (2023).

A ABNT NBR 10004 (2004) apresenta uma maneira de classificação diversa da Lei Nacional de Implementação da Política de Resíduos Sólidos. No Quadro 3 é apresentada esta classificação que se subdivide em classes.

Quadro 3 - Classes de resíduos

CLASSES	DEFINIÇÃO
Classe I	São caracterizados como perigosos e apresentam periculosidade
Classe II	São caracterizados como não perigosos
Classe II A	São resíduos não inertes e podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água
Classe II B	São resíduos inertes e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Fonte: SALES (2023).

3.1.1 RESÍDUOS SÓLIDOS RURAIS

Para a PNRS os resíduos gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades, são classificados como resíduos agrossilvopastoris. A título de exemplificação, têm-se resíduos resultantes da atividade da colheita, palhas, embalagens de defensivos, máquinas, EPI's e etc (AGROPLUS, 2022).

No meio rural, a separação adequada dos resíduos é de suma importância, no sentido que determinados materiais devem ter uma logística reversa aplicada para que não haja contaminação do ambiente. Em outra vertente, os resíduos orgânicos podem ser utilizados para utilização nas plantações e também de maneira a gerar energia para a propriedade.

3.1.2 GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

É de fácil constatação que a produção de resíduos sólidos em todo o planeta vem aumentando em grande escala, atrelado a isto se encontra os novos métodos de produção, as novas tecnologias e o aumento no consumo nominal.

No Brasil, a gestão desses resíduos sólidos urbanos representa um enorme desafio, pois afeta direta e indiretamente a população, quer seja pelos impactos na saúde dos indivíduos, ou pela transformação prejudicial do meio ambiente. Pode-se destacar também que parte do povo brasileiro não é atendido pelo serviço de coleta de lixo e, conseqüentemente, descarta os resíduos sólidos urbanos em locais inadequados. Além disso, parte do lixo coletado é descartado de forma inapropriada em aterros controlados e lixões (GARCILASSO et al., 2018).

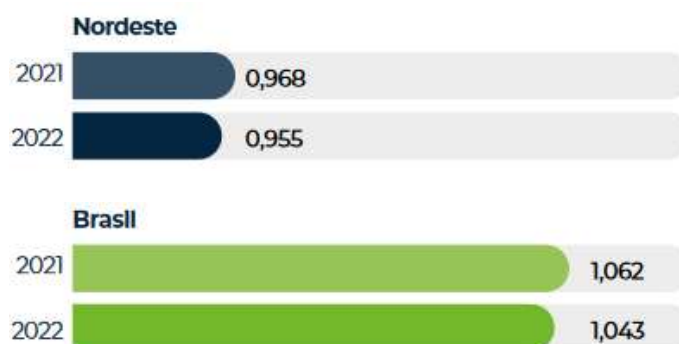
Em um relatório do ano de 2022 da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), onde são apresentados os dados de geração de resíduos no Brasil nos anos de 2021 e 2022, total e per capita, onde podemos notar um número relativamente grande. Na Figura 1 são apresentados os dados da região Nordeste e do País para produção bruta, onde podemos constatar que a região Nordeste é uma grande geradora de resíduos, sendo responsável por cerca de 25% da produção nacional. Na Figura 2 são apresentados os dados de produção per capita, relacionando novamente a região Nordeste e a produção do País.

Figura 1 - Geração de RSU no Brasil e no Nordeste – comparativo dos anos 2021 e 2022 (t/ano)



Fonte: ABRELPE (2022).

Figura 2 - Geração per capita de RSU no Nordeste e Brasil – comparativo dos anos 2021 e 2022 (kg/hab/dia)



Fonte: ABRELPE (2022).

3.1.3 DESCARTE DE RESÍDUOS SÓLIDOS

O descarte adequado dos Resíduos Sólidos gerados, sejam eles urbanos ou rurais, favorece uma melhoria na qualidade de vida e também a geração de renda. Em estudo apresentado pela Organização das Nações Unidas (ONU), no ano de 2017, quantificou que 23% das mortes no mundo foram causadas direta ou indiretamente pelo descarte incorreto de resíduos, o que equivaleria a 12,6 milhões de pessoas.

Em dados da ABRELPE (2017), foram movimentados recursos na casa de R\$ 28,5 bilhões no ramo de empresas de limpezas urbanas. Além da coleta e descarte, a questão do reaproveitamento energético deve ser melhor explorado de modo a potencializar esse setor e assim oferecer melhores condições de vida aos usuários do sistema, como também fortalecimento das empresas que atuam no setor.

3.2 BIOGÁS

O biogás é uma mistura de gases produzido pela decomposição anaeróbica da matéria orgânica. O metano é o principal componente do biogás, sendo encontrado em maior quantidade e é o combustível da mistura (ALVES, 2020). Esse tipo de gás pode ser gerado a partir de uma vasta variedade de matérias primas orgânicas. Ainda após a realização do processo de digestão

anaeróbica o produto final pode ser retirado do biodigestor na forma de biofertilizante, apresentando bons resultados por ser rico em nutrientes (LIRA, 2021).

Um melhor potencial energético do biogás está diretamente relacionado com a concentração de metano presente, isto será responsável por determinar o seu poder calorífico. Em seguida em maior quantidade temos o dióxido de carbono. Além destes, temos: o hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, amônia, ácido sulfídrico, aminas voláteis e o monóxido de carbono. Na Tabela 1 é apresentada uma composição do Biogás.

Tabela 1 - Composição do Biogás

Componentes	Quantidade	Considerações
Metano	~50%	Gás combustível, sendo um dos gases causadores do efeito estufa com potencial de aquecimento global 30,5 vezes superior ao do Dióxido de Carbono.
Dióxido de Carbono	~45%	Gás causador do efeito estufa.
Outros gases	~5%	Entre esses gases, destaca-se o ácido sulfídrico, que além de mau odor, pode levar a ocorrência de chuva ácida.

Fonte: SILVA (2017).

É essencial a apresentação do poder calorífico dos elementos encontrados na mistura do Biogás, essa propriedade refere-se à quantidade de energia, por unidade de massa, que é liberada com a combustão do elemento. Na Tabela 2 são apresentados esses valores.

Tabela 2 - Poder Calorífico dos componentes do Biogás

Componentes	Poder Calorífico Superior (Kcal/kg)	Poder Calorífico Inferior (Kcal/kg)
Metano	13249	11940
Carbono	7819	7819
Monóxido de Carbono	2412	2412
Amônia	5364	4439
Gás Sulfídrico	3939	3631
Hidrogênio	33900	28642

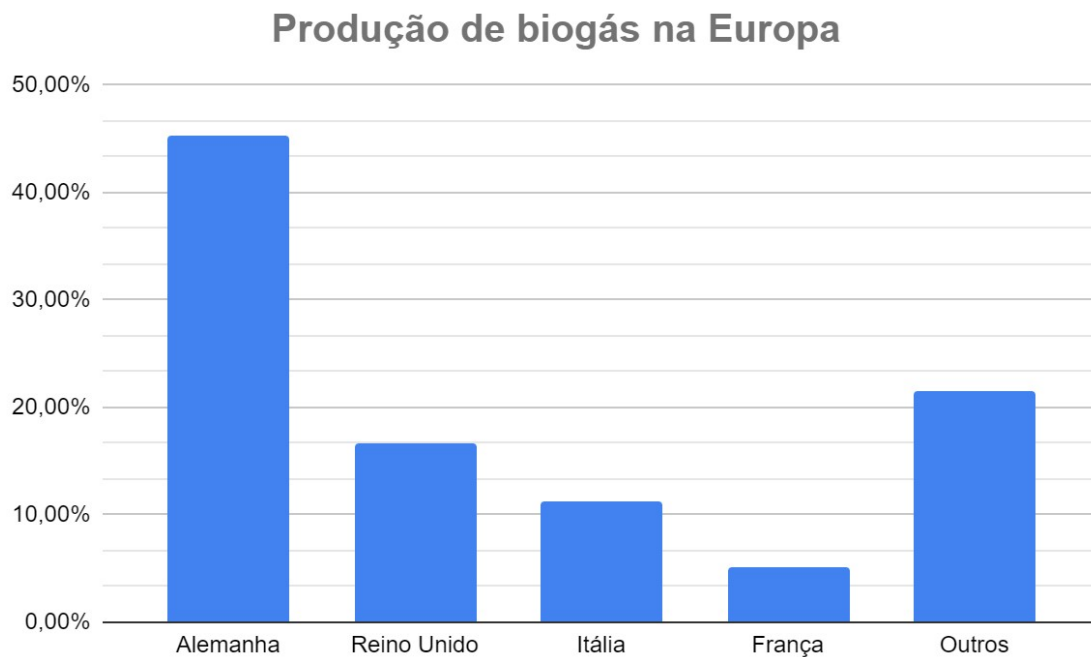
Fonte: Adaptado de OLIVEIRA (2023).

3.2.1 BIOGÁS NO MUNDO

O biogás é uma fonte de energia renovável que cresce de forma considerável no mundo, juntamente com a energia solar fotovoltaica e a energia eólica. Grande parte da produção mundial desse gás se encontra nos Estados Unidos e na Europa, porém essa fonte energética tem crescido bastante na África e na Ásia. É importante considerar que na América Latina grande parcela da biomassa é utilizada para a produção de bioetanol, logo, o potencial de uso direto para produção do biogás é restringido (MILANEZ et al., 2018).

A Europa se destaca por leis de incentivo de ao uso de energias renováveis, como por exemplo, oferecendo desconto das tarifas de energia elétrica quando a fonte for renovável. Observando a temática do Biogás, o país de destaque é a Alemanha, sendo responsável por praticamente 45% da produção deste combustível no continente, como apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Biogás na Europa



Fonte: OLIVEIRA (2023).

3.2.2 BIOGÁS NO BRASIL

No Brasil, a participação do biogás na matriz energética brasileira também é muito baixa, inferior a 1% (EPE, 2019). Por outro lado, a capacidade instalada de biogás para geração elétrica tem crescido substancialmente. Em 2016, o país alcançou quase 120 MW de capacidade instalada de geração elétrica a partir de biogás, o que é um volume seis vezes superior ao registrado em 2007.

A produção de Biogás no Brasil é aquecida de maneira predominante do gás gerado em Aterros Sanitários através dos resíduos sólidos urbanos. No entanto, em estados da região Sul, especialmente no Paraná, já é possível notar uma evolução na implementação de biodigestores nas propriedades rurais de modo a ter uma autogeração para as atividades do campo. Outro setor que se beneficia da produção de Biogás, é o sucroalcooleiro, com utilização da vinhaça e bagaço de cana para geração de energia através de motogeradores. Na Figura 4 temos uma usina sucroalcooleira com produção de Biogás.

Figura 4 - Planta Biogás da Usina Cocal



Fonte: VITAL (2024).

3.2.3 APLICAÇÕES DO BIOGÁS

O Biogás pode ser utilizado em diversos setores e com finalidades diversas, no entanto, para cada utilização se deve ter um tratamento adequado com uma purificação, que será apresentada em seção posterior.

Um tipo de aplicação do biogás é no abastecimento dos sistemas de ciclo a vapor, que operam segundo o ciclo Rankine. Nesse ciclo, o calor gerado pela combustão do gás é aproveitado na caldeira para a geração de vapor d'água, o qual expande em uma turbina, produzindo trabalho mecânico (AMIDPOUR, MANESH, 2021).

Outra aplicação seria em veículos automotores e grupos motogeradores que utilizem o ciclo Otto como funcionamento, desde que conte com uma purificação adequada. No Quadro 4 são apresentadas algumas aplicações e também quais elementos devem ser retirados do Biogás bruto para esta determinada aplicação.

Quadro 4 - Componentes a serem removidos de acordo com a aplicação

APLICAÇÃO	REMOÇÃO DE COMPONENTES
Grupo Gerador a Gás	Ácido Sulfídrico e vapor d'água
Microturbina	Ácido Sulfídrico e vapor d'água
Sistema de Ciclo a Vapor	Ácido Sulfídrico e vapor d'água
Redes de Gás Natural	Ácido Sulfídrico, vapor d'água e gás carbônico
Combustível Veicular	Ácido Sulfídrico, vapor d'água e gás carbônico

Fonte: Adaptado de OLIVEIRA (2023).

3.3 PROCESSO DE GERAÇÃO DO BIOGÁS

Neste item trataremos do processo de geração do biogás que acontece por meio de uma digestão anaeróbica.

3.3.1 DIGESTÃO ANAERÓBICA

O processo de digestão anaeróbica (DA) consiste na degradação de resíduos orgânicos por microrganismos em um ambiente sem oxigênio, levando a formação de metano, dióxido de carbono, amônia, gás sulfídrico, e traços de outros gases, além da formação de biofertilizante (matéria orgânica estabilizada). Os grupos de microrganismos que atuam na biodigestão têm ação simbiótica, sendo notáveis as etapas intermediárias do processo, indicando a população de microrganismos predominantes em cada uma. As reações bioquímicas que acontecem no processo são divididas em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese

(LIRA, 2021). Um esquema prático dos processos de formação de Biogás é apresentado na Figura 5.

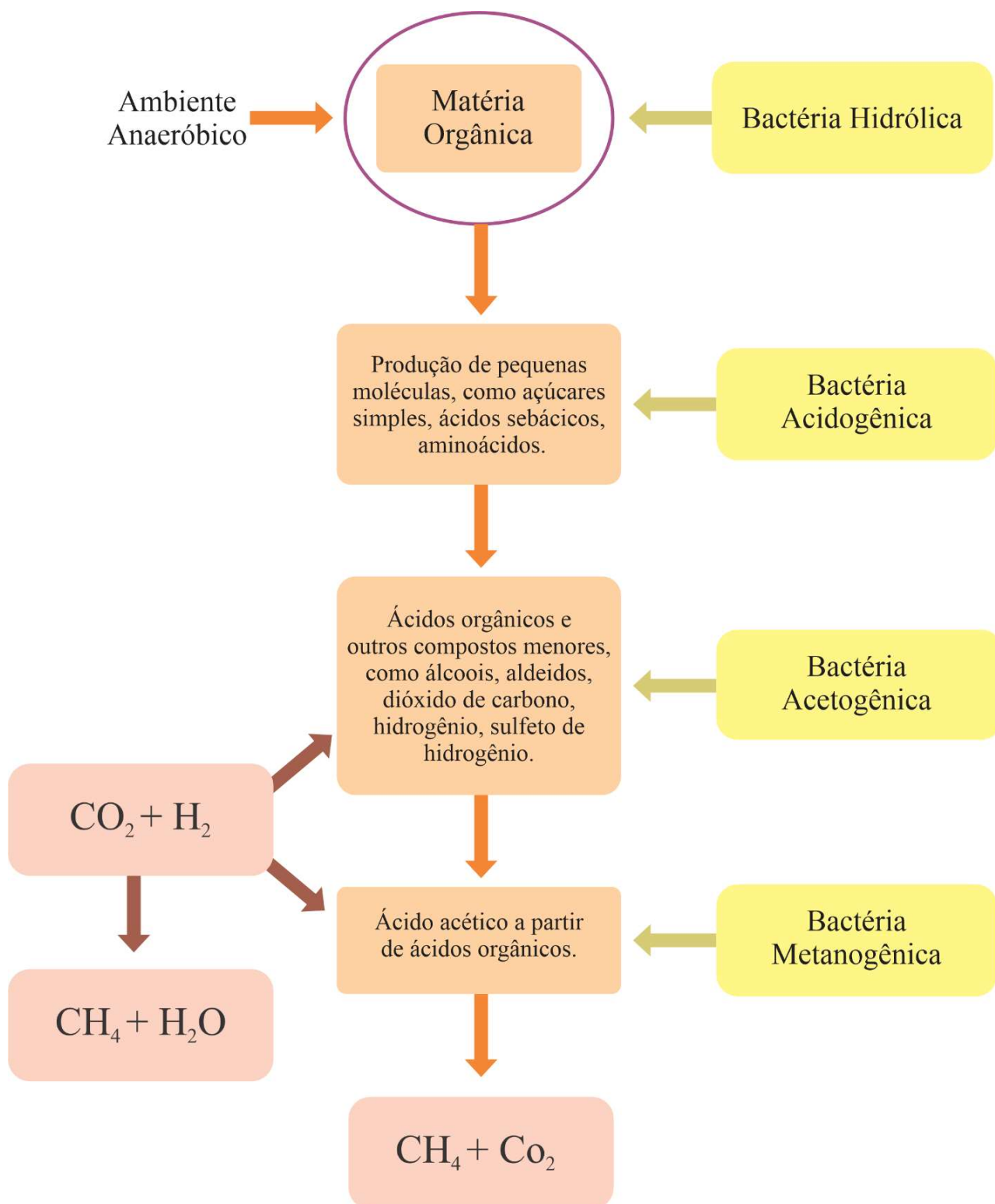
Em seguida temos uma breve explicação sobre cada etapa de obtenção do Biogás. Na hidrólise, primeira etapa, as macromoléculas são transformadas em monómeros solúveis, todo este processo é catalisado por bactérias hidrolíticas que liberam exoenzimas.

Em um segundo momento temos a acidogênese, as substancias resultantes da hidrólise serão transformadas por bactérias fermentativas em moléculas simples de baixo peso molecular como ácido propanóico, ácido butanóico, ácido valérico, ácido láctico e álcoois, também agem as bactérias do ácido fórmico que decompõe as moléculas orgânicas solúveis em gás hidrogênio (H_2), ácido acético (CH_3COOH) e gás carbônico (CO_2). Os produtos gerados nessa fase dependem também da quantidade de H_2 dissolvido no composto orgânico. Se a concentração de hidrogênio estiver muito alta, o processo de acidogênese é afetado negativamente causando o acúmulo de ácidos orgânicos, e com isso, ocorre uma diminuição do pH podendo afetar totalmente o processo (LIRA, 2021).

O terceiro processo é chamado de acetogênese, neste momento as bactérias do tipo acetogênicas são responsáveis por transformar os produtos gerados na acidogênese através da oxidação. O material gerado neste processo serve de substrato para o momento seguinte, a metanogênese.

O último processo é nomeado de metanogênese. Sendo o processo que ocorre na ausência de oxigênio, as bactérias anaeróbias convertem os compostos obtidos na acetogênese em metano, o qual é o principal constituinte do biogás. Pode-se observar que alguns fatores são fundamentais para a melhor produção do biogás, como: a composição do substrato, a temperatura (grandes variações de temperatura causam perda de potencial de produção) e o pH do meio, considerado ótimo na faixa entre 6,5 e 8 (KUNZ, A.; SULZBACH, A, 2007).

Figura 5 - Processo de Digestão Anaeróbica



Fonte: Adaptado de LIRA (2021).

3.4 FATORES QUE INFLUENCIAM A PRODUÇÃO DE BIOGÁS

3.4.1 TEMPERATURA

A temperatura é um fator que influencia de maneira direta a digestão anaeróbica, seja aumentando sua eficiência e diminuindo o tempo de retenção da matéria orgânica nos biodigestores, além de favorecer a concentração de metano no biogás se o processo estiver sobre temperaturas mais elevadas, assegurando dessa maneira um maior poder calorífico ao biogás (LIRA, 2021).

Os micro-organismos responsáveis pela digestão anaeróbica podem suportar pequenas capacidades de alterações de temperatura. Não resistindo a estresse térmico por períodos extensos, desse modo, mudanças térmicas de grande magnitude de forma abrupta e prolongada devem ser evitadas para que ocorra diminuição da eficiência ou cessamento da digestão anaeróbica (SANT'ANNA *et al.*, 2010).

Outro fato importante de se destacar é que as populações microbianas dentro do biodigestor são bastante afetadas quando ocorre uma alteração brusca de temperatura. Logo, é essencial que o biodigestor seja projetado em um local em que não haja mudança rápida de temperatura, para que a produção do biogás não seja diminuída (OLIVEIRA, 2023).

3.4.2 TEMPO DE RETENÇÃO HIDRAÚLICA (TRH)

O TRH do biodigestor é o tempo de permanência da matéria orgânica para que ocorra a máxima degradação. Esse parâmetro está relacionado com taxa de crescimento dos microrganismos, temperatura, quantidade de matéria orgânica e de sua composição (MAO *et al.*, 2015).

De maneira geral o tempo de digestão para dejetos animais varia de 20 a 30 dias. Assim, em condições mesofílicas o TRH é de 15 a 30 dias para obter uma fermentação eficiente (LIRA, 2021).

3.4.3 TEOR DE ÁGUA

O valor da concentração de água no material tem um fator de influência na produção de Biogás. Em seu trabalho LIRA (2021) classifica que valores em torno de 60% a 90%, se aproximando assim de uma proporção de 1:1, seria a margem de melhor avaliação.

3.4.4 AMBIENTE ANAERÓBICO

Todo o processo de gênese do Biogás deve ser realizado em ambiente hermético, visto que todo o processo deve ser anaeróbico. Portanto, a vedação nos biodigestores se torna de fundamental importância para se alcançar os máximos de produção e também se obter um material de melhor qualidade.

3.4.5 SUBSTRATOS

Para a produção do biogás é necessário a utilização de matéria orgânica para que seja possível a digestão por meio de bactérias. Na seção serão apresentados dados do substrato esterco bovino, material de estudo desta dissertação.

3.4.5.1 ESTERCO BOVINO

O esterco bovino pode ser utilizado como substrato, visto que se compõem de maneira total por matéria orgânica. Outro ponto favorável a este tipo de material se apresenta na quantidade gerada por animal, em seu trabalho KUSMIYATI *et al* (2023a) apresenta que uma vaca, gera em torno de 30 kg/dia. Esse valor pode variar de acordo com a dieta que o animal é submetido e a condições de meio ambiente.

Esse tipo de cultura no Brasil tem papel de destaque, onde a alimentação brasileira quando se trata de proteína tende a ter uma grande presença da bovina. Em dados apresentados

na Pesquisa Produção da Pecuária Municipal 2022 divulgada pelo IBGE no ano de 2023, o rebanho bovino no Brasil alcançou o número de 224 milhões de animais. Com isto, podemos classificar o esterco bovino como um substrato plausível para utilização na geração de biogás com foco em propriedades rurais.

3.5 BIOFERTILIZANTE

Ao finalizar o processo de biodigestão, o resíduo gerado pelo biodigestor sai na forma de biofertilizante, pois é rico em nutrientes (KUSMIYATI, 2023). Em seu trabalho TALLOU (2020) apresenta quais elementos apresentam um alto teor de concentração no biofertilizante: nitrogênio, potássio, fósforo e outros nutrientes em consequência da perda de carbono.

Esse material, dependendo do local de aplicação, pode ser utilizado como adubo para plantação, quando se tratar de uma propriedade rural. Caso seja em aterros, casas ou condomínios, esse material pode ser tratado e vendido, de modo a gerar um meio de retorno financeiro para o produtor.

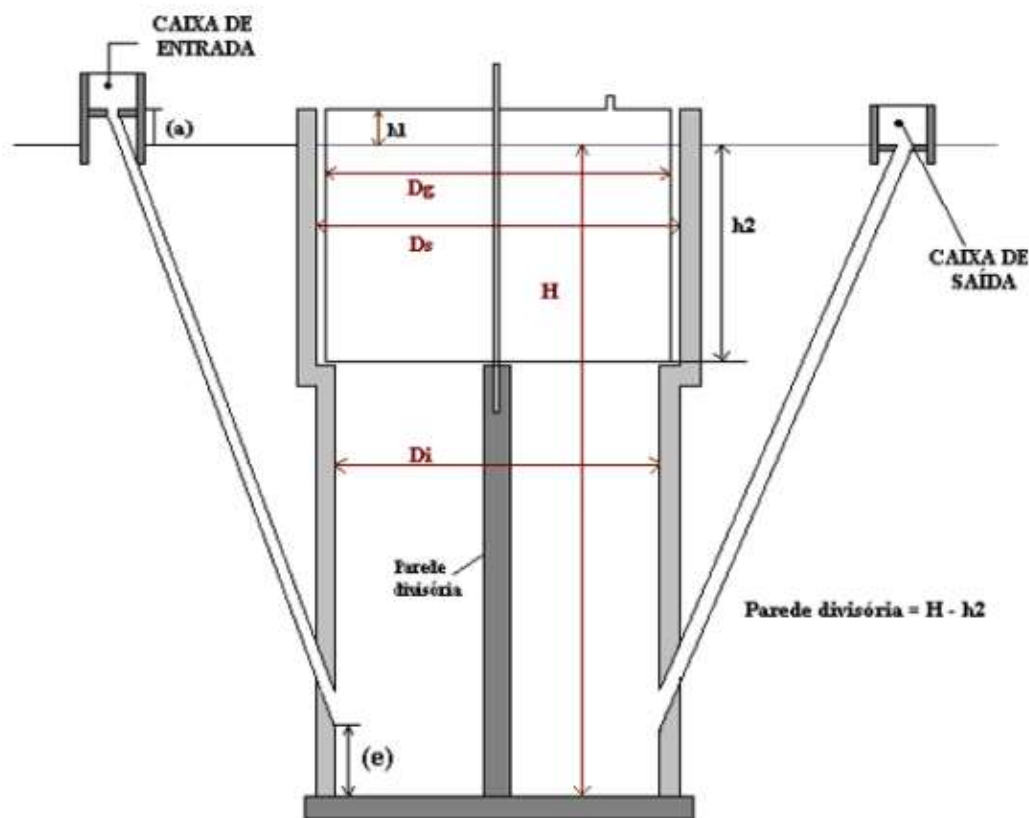
3.6 TIPOS DE BIODIGESTORES

Os biodigestores são estruturas construídas com o intuito de favorecer a degradação de biomassas orgânicas residuais com a digestão anaeróbica, assim é necessário um ambiente sem qualquer contato com o ar atmosférico. Com isso, essas condições anaeróbicas favorecem o desenvolvimento de micro-organismos especializados, aumentando a deterioração da matéria orgânica (LIRA, 2021). Esses petrechos podem ser alimentados de forma contínua ou em batelada, a escolha do tipo se dá de acordo com a localização da instalação e do substrato utilizado.

3.6.1 BIODIGESTOR INDIANO

O biodigestor modelo indiano é composto por uma campânula móvel que pode ser produzida de dois materiais, de ferro ou fibra, que se desloca com movimentos verticais conforme a produção ou o consumo de biogás. O processo de fermentação nesse modelo ocorre de maneira mais célere, visto que a amplitude térmica do solo é menor se comparado com outros modelos (LIRA, 2021). Esse tipo de biodigestor apresenta uma construção simplificada e de baixo custo. Na Figura 6 é apresentada a estrutura esquemática deste tipo de biodigestor.

Figura 6 - Biodigestor Indiano



Fonte: LIRA (2021).

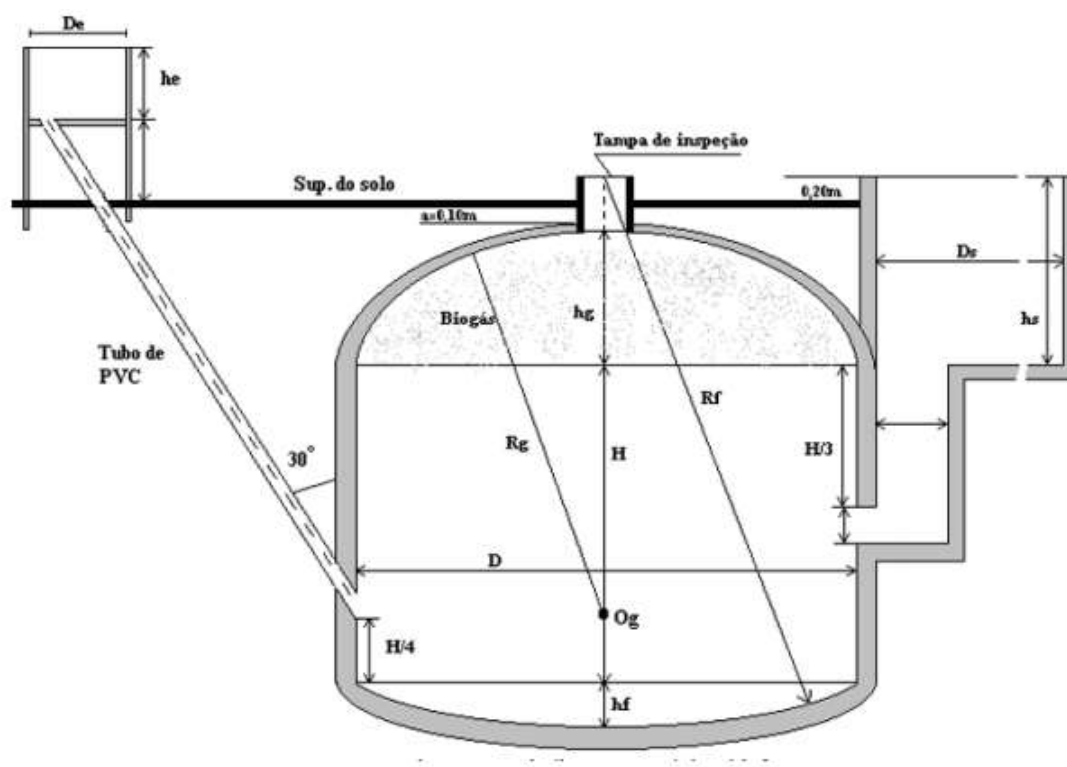
3.6.2 BIODIGESTOR CHINÊS

Esse modelo de biodigestor apresenta em sua estrutura uma câmara cilíndrica feita em alvenaria, nessa região se desenvolve a digestão anaeróbica. O teto desse equipamento tem um formato de domo, impermeável, e que é destinado ao armazenamento do biogás.

. O funcionamento desse biodigestor é semelhante ao princípio de prensa hidráulica, desse modo aumentos de pressão em seu interior devido ao acúmulo de biogás, resulta na movimentação do efluente da câmara de fermentação para a caixa de saída, e em sentido contrário quando a um alívio na pressão (LIRA, 2021).

De maneira semelhante ao modelo indiano apresenta fácil construção e baixo custo. Na Figura 7 é apresentado uma estrutura esquemática do biodigestor chinês.

Figura 7 - Biodigestor Chinês



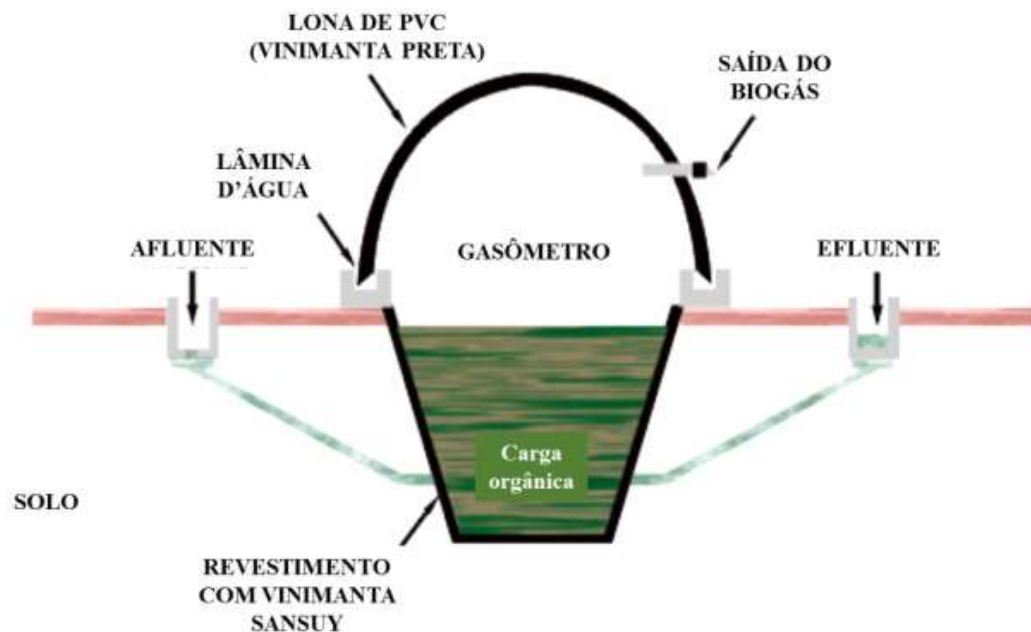
Fonte: LIRA (2021).

3.6.3 BIODIGESTOR CANADENSE

O modelo também é conhecido como biodigestor lagoa. Esse modelo tem um formato diferente dos demais, tendo como característica uma largura maior que sua profundidade. Uma das vantagens desse modelo construtivo é uma maior exposição ao sol, tendo como resultado um aumento na produção do biogás.

Nesse equipamento o espaço que é destinado ao gás é constituído por uma manta flexível, que infla conforme se tem um aumento no volume do biogás no seu interior. Para garantir a vedação, se instala uma lâmina de água onde a manta fica imersa. Essa questão do uso da lâmina gera um custo mais elevado para construção, sendo uma questão a ser trabalhada para viabilizar o equipamento. Na Figura 8 temos uma representação do modelo de biodigestor canadense.

Figura 8 - Biodigestor Canadense



Fonte: LIRA (2021).

3.7 TRATAMENTOS DO BIOGÁS

Nesta seção serão apresentadas de forma resumida e simples, processos e motivos para realizar o tratamento do Biogás, tratando de apresentar alguns componentes que podem causar mal funcionamento em equipamentos que serão alimentados pelo gás gerado.

3.7.1 REMOÇÃO DE ÁGUA

Em seu trabalho, OLIVEIRA (2023), apresenta algumas técnicas para a remoção de água. Sendo elas por condensação são: tubulação com sistema de purga do vapor de água, desembaçadores separadores de silicone e sistemas de troca de calor na tubulação. Tendo como desvantagens: tubulações devem ser longas e apresentar inclinação para permitir a purga do vapor d'água e resistentes ao congelamento, ou seja, mais caras.

Outro processo conhecido para a retirar a água do biogás é por refrigeração, no qual o gás é arrefecido a 2°C, o que aprimora a condensação e torna esse processo, geralmente, o mais eficiente para a remoção da umidade. A desvantagem dele é o alto custo de energia para manter a refrigeração do sistema em funcionamento (OLIVEIRA, 2023).

3.7.2 REMOÇÃO DO ÁCIDO SULFÚDRICO

Para se escolher o melhor método para a remoção do sulfeto de hidrogênio, é necessário levar em consideração a concentração de H_2S , o uso final da energia renovável, a composição e a variabilidade do volume do biogás. A depender da concentração final necessária para a aplicação do biogás, pode-se realizar dois ou mais processos para se obter a remoção desejada (OLIVEIRA, 2023).

Os procedimentos para remoção do gás sulfídrico podem ser classificados de acordo com o tempo de aplicação, podendo ser ela *in situ*, ou seja, durante o processo de biodigestão, ou ocorrendo após a produção do biogás. Além do mais, as tecnologias podem ser divididas em físico-químicas, as quais são as mais utilizadas no mercado, e biotecnológicas, as quais possuem

eficiências semelhantes dos processos físico-químicos, porém apresentam um custo inferior (AMIDPOUR, MANESH, 2021).

3.7.3 REMOÇÃO DE AMÔNIA

A remoção da amônia pode ser efetuada por meio dos processos de remoção de dióxido de carbono e água, os quais simultaneamente eliminam a presença de amônia. Ademais, é possível controlar o pH do material contido no biodigestor de maneira a prevenir a acidificação e, conseqüentemente, a formação de amônia (OLIVEIRA, 2023).

3.7.4 REMOÇÃO DOS SILOXANOS

Para remover os siloxanos do biogás, pode-se utilizar o método de lavagem com solventes orgânicos e ácidos. Esse procedimento possui alta eficiência de remoção, porém fatores como a corrosão do equipamento e a nocividade ao meio ambiente são as grandes desvantagens do processo (OLIVEIRA, 2023).

3.7.5 REMOÇÃO DO GÁS CARBÔNICO

Esse processo de purificação é realizado em sistemas que necessitam de uma alta taxa de metano na composição do biogás, como no uso veicular e na rede de distribuição de gás natural. Seu objetivo através da remoção do CO₂ é aumentar o poder calorífico e, conseqüentemente, o índice de Wobbe, o qual compara a energia produzida pela combustão do gás em um certo equipamento (OLIVEIRA, 2023).

3.8 COMBUSTÃO ESTEQUIOMÉTRICA DO BIOGÁS

Para que aconteça a combustão estequiométrica do biogás se faz necessário a queima completa do metano, já que este é o único componente combustível da mistura. Na equação 1 podemos verificar a reação do Biogás com ar.



Assim, a reação descreve que para ocorrer a combustão de um mol de Biogás, analisando de maneira exclusiva o metano que é combustível, serão necessários dois mols de oxigênio. O resultado, produto da reação, seria a produção de um mol de dióxido de carbono e dois mols de água.

Considerando que apenas 21% do volume do ar é composto por oxigênio e que 50% do volume do biogás é de metano, tem-se que a relação ar/biogás estequiométrica é 4,762, em base volumétrica (ALVES, 2020).

3.9 COGERAÇÃO

No processo de Cogeração temos uma produção combinada de energia mecânica e térmica, onde a primeira é utilizada para o acionamento de equipamentos mecânicos, assim a segunda é utilizada para o resfriamento e aquecimento.

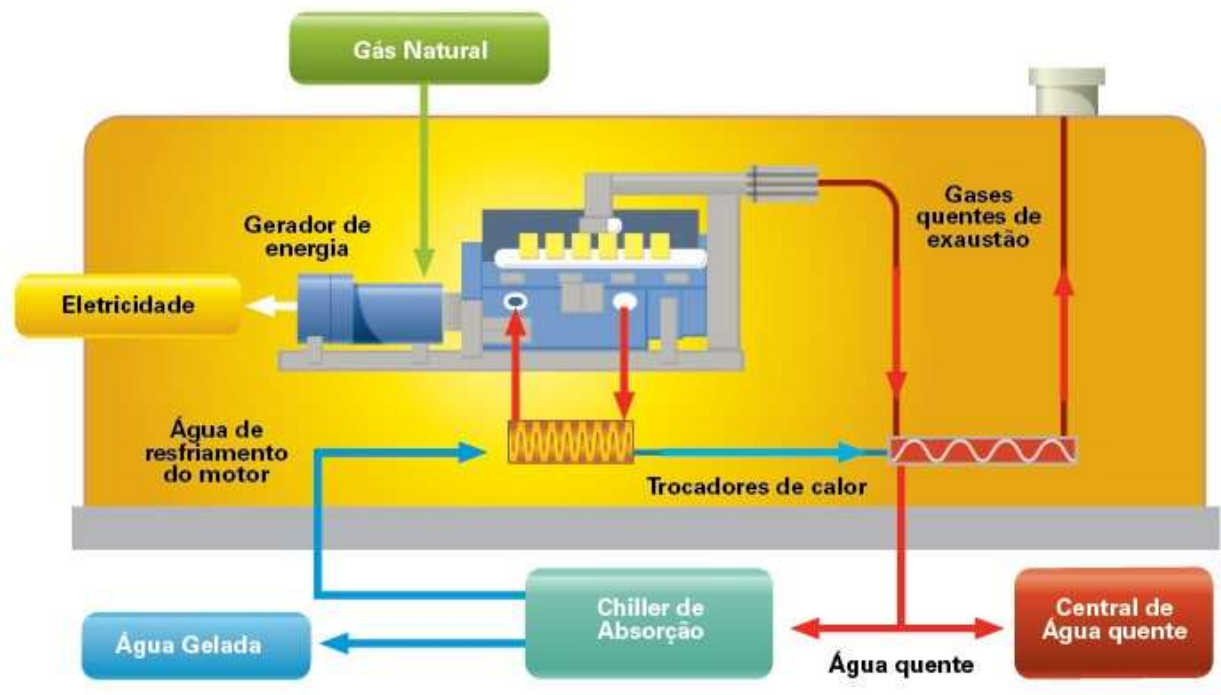
Os sistemas de cogeração representam um grande avanço tecnológico e ambiental, pois podem fornecer vários tipos de energia e utilizam fontes de energia fósseis ou renováveis, como a biomassa, a energia eólica e a energia solar (OLIVEIRA, 2023).

As usinas de cogeração são encontradas em pequeno número no mundo, representando apenas 10% da produção de energia. No entanto, há países da União Europeia, como a Holanda, Dinamarca e Finlândia, que 50% das usinas adotam sistemas de poligeração, a fim de reduzir

os custos de produção de energia e diminuir as emissões de gases de efeito estufa (AMIDPOUR, MANESH, 2021).

Os sistemas de cogeração podem utilizar de motores do ciclo Otto e também do ciclo Diesel. Na Figura 9 temos uma representação de um sistema de cogeração.

Figura 9 - Sistema de Cogeração



Fonte: Togawa Engenharia (2018).

3.9.1 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA (MCI)

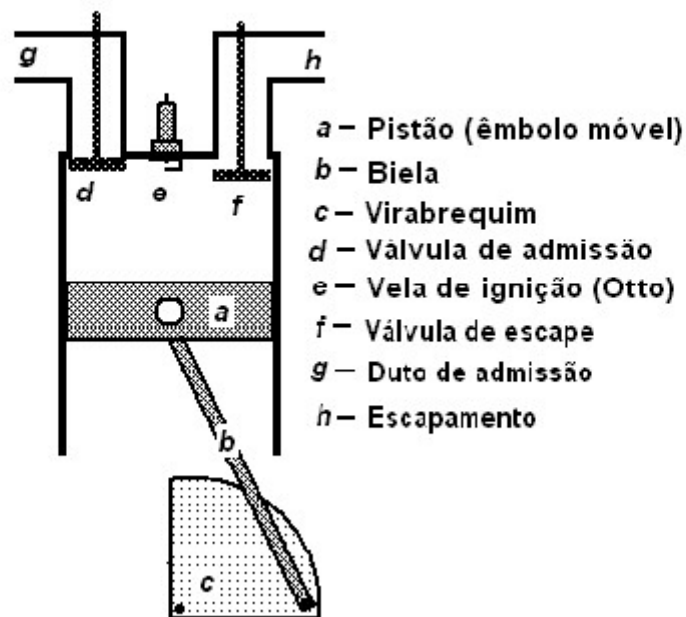
Os motores de combustão interna (MCI) foram desenvolvidos no final do século XIX e são considerados a invenção mais significativa de seu século, impactando na sociedade e na qualidade de vida das populações (MARTINS, 2006).

O primeiro motor a combustão interna foi construído pelo mecânico alemão Lenoir, em 1860, e tinha a potência de 1 cv, trabalhando com gás de iluminação (FEITOSA, 2023).

Em 1891, Otto e Langen, baseando-se na máquina de Lenoir, construíram um motor que comprimia a mistura de ar e gás de iluminação, com ignição feita por centelha elétrica (UFPEL, 2021). Na Figura 10 temos a representação de alguns componentes de um motor MCI do ciclo Otto.

Figura 10 - Principais componentes MCI - Ciclo Otto

Principais partes de uma máquina térmica (Otto)



Fonte: Instituto de Física - UFRGS (2009).

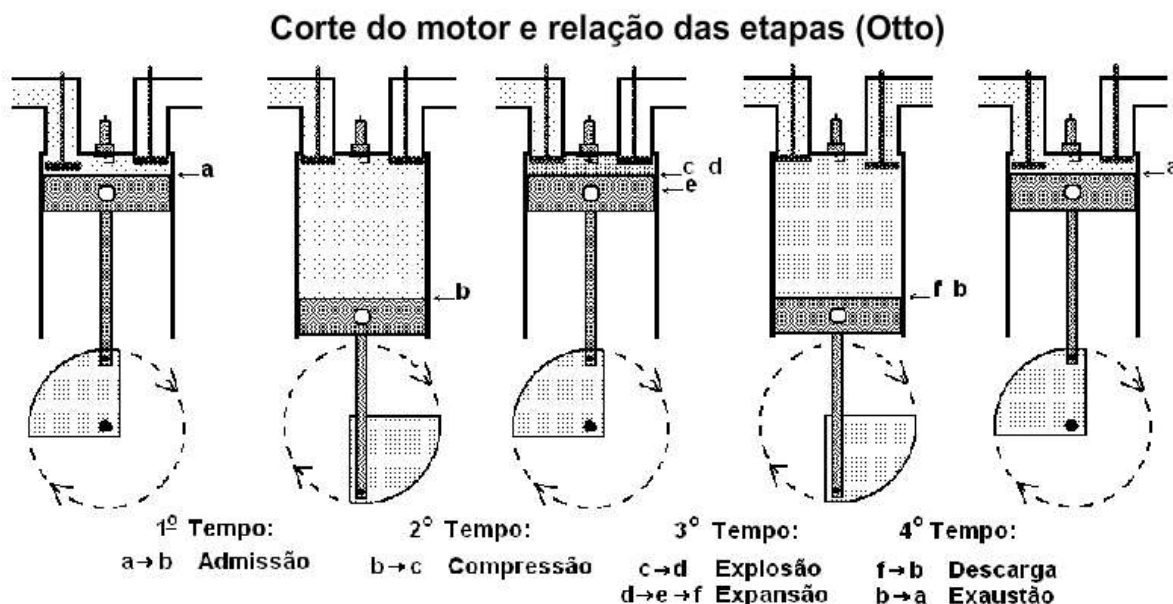
3.9.1.1 MOTORES DO CICLO OTTO

Os motores do ciclo Otto podem operar em 2 tempos ou 4. Sendo necessário na primeira situação a rotação por duas vezes do virabrequim pra completar o ciclo mecânico. Porquanto, na segunda situação se faz necessário apenas uma rotação do virabrequim.

O motor de ciclo Otto ou motor ideal por ignição por centelha, foi desenvolvido por Nikolaus A. Otto de um motor de quatro tempos em 1876 na Alemanha, usando o ciclo proposto pelo francês Beau de Rochas em 1862 (FEITOSA, 2023). Na Figura 11 temos a representação

dos 4 tempos em um motor do ciclo Otto. Na Figura 12 é apresentado o gráfico de Pressão por Volume em um ciclo real de um MCI do ciclo Otto.

Figura 11 - Etapas do ciclo Otto (4 tempos)



Fonte: Instituto de Física - UFRGS (2009).

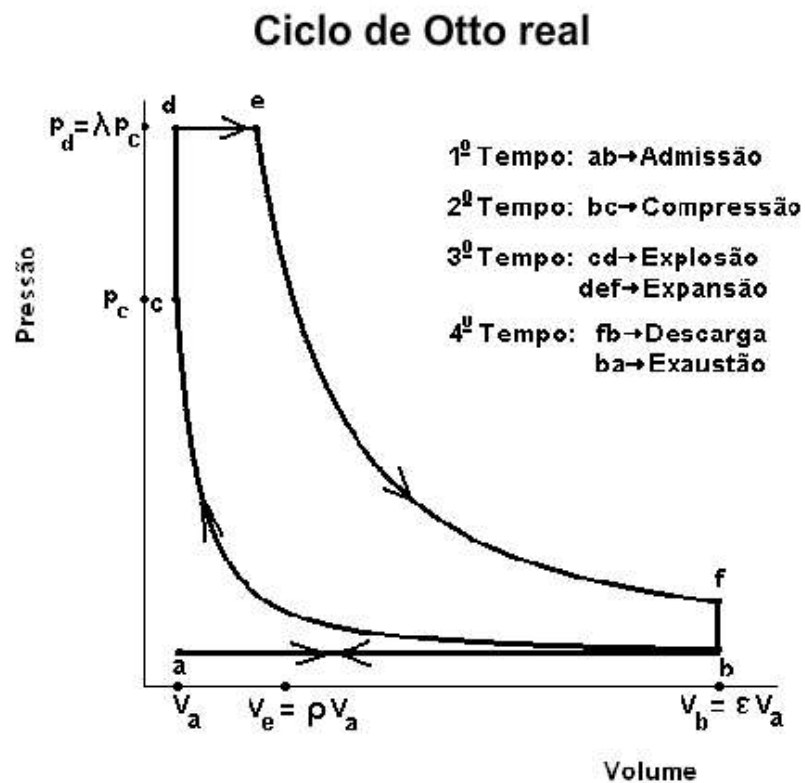
Em seu trabalho MARTINS (2006), apresenta o ciclo Otto ideal de quatro tempos com o seguinte funcionamento: primeiro, na fase de admissão, a válvula de saída fica fechada, a válvula de entrada fica aberta e o pistão se move do ponto morto superior (PMS) ao ponto morto inferior (PMI), admitindo ar e combustível.

No segundo momento, será o tempo de compressão, onde as válvulas de entrada e saída permanecem fechadas e o pistão se move do PMI até o PMS, de forma a comprimir a mistura de ar e combustível. Um pouco antes do pistão atingir o PMS, a vela de ignição solta uma faísca e provoca uma combustão da mistura, o que gera uma grande quantidade de energia térmica que, posteriormente, é convertida parcialmente em energia mecânica.

No terceiro momento, as válvulas permanecem fechadas e o pistão se movimenta do PMS ao PMI, ocorrendo fase de expansão. No quarto momento, a válvula de admissão

permanece fechada e a de escape se abre, de forma que o pistão se desloque do PMI ao PMS e os gases gerados sejam lançados para fora do cilindro, concluindo o processo de exaustão.

Figura 12 - Gráfico Pressão x Volume (Ciclo Otto real)



Fonte: Instituto de Física - UFRGS (2009).

3.9.1.2 MOTORES DO CICLO DIESEL

O motor do ciclo Diesel apresenta uma maior eficiência em relação ao ciclo Otto, pois permite que o motor trabalhe com uma maior taxa de compressão e são apropriados para veículos pesados que necessitam de um alto torque. (OLIVEIRA, 2023).

Rudolf Diesel patenteou um motor à combustão de elevada eficiência, demonstrando em 1900, um motor movido a óleo de amendoim, cuja tecnologia leva seu nome até hoje.

De acordo com MARTINS (2006), o ciclo Diesel ideal de quatro tempos apresenta as seguintes fases e características: na admissão, a válvula de entrada é aberta e a de escape

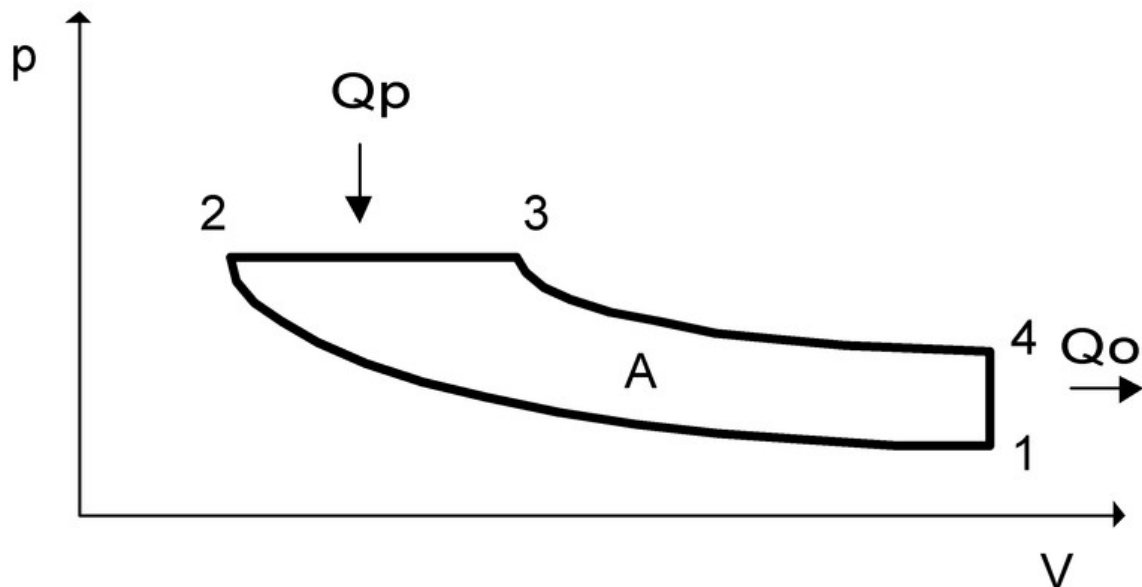
permanece fechada, admitindo apenas ar no cilindro e gerando um movimento do pistão do PMS ao PMI. Assim já é possível notar a primeira diferença entre os ciclos, enquanto o Otto admite a mistura de ar e combustível, o motor do ciclo Diesel admite apenas ar.

Em seguida, as válvulas permanecem fechadas e o pistão se move do PMI ao PMS, processo que é designado como compressão. Um pouco antes do pistão atingir o PMS, o bico injetor injeta combustível no cilindro e ocorre a combustão por compressão com as válvulas fechadas. Depois, o pistão se movimenta do PMS ao PMI, ocorrendo a expansão.

Por fim, acontece a exaustão, fase na qual a válvula de admissão permanece fechada e a de escape se abre, de forma que o pistão se desloca do PMI ao PMS e os gases gerados são lançados para fora do cilindro.

Na Figura 13 temos a demonstração do gráfico de Pressão por Volume no ciclo Diesel.

Figura 13 - Gráfico Pressão x Volume (Ciclo Diesel)



Fonte: Instituto de Física - UFRGS (2009).

3.9.2 GRUPO MOTOGERADOR

O gerador elétrico é um equipamento que é responsável por converter as energias química, mecânica e solar em energia elétrica. Na Figura 14 apresentamos um modelo de motogerador.

Esse equipamento não atinge rendimento de 100% devido às forças de atrito e ao efeito Joule, o qual é o fenômeno em que ocorre o aquecimento do meio devido a passagem de corrente elétrica. Além disso, os geradores produzem uma diferença de potencial chamada força eletromotriz (ϵ) e, quando ligados a circuitos elétricos, produzem a tensão útil (U), que é menor que a FEM (OLIVEIRA, 2023). Para calcular o rendimento podemos utilizar a Equação 2 apresentada a seguir.

$$\eta = \frac{U}{\epsilon} \quad (2)$$

Figura 14 - Grupo Motogerador



Fonte: Stemac (2025).

3.10 GERAÇÃO DE ELETRICIDADE ATRAVÉS DO ESTERCO BOVINO

Com um intuito de realizar uma quantificação aproximada de eletricidade gerada, WRESTA *et al* (2015) desenvolveu em seu trabalho uma equação, apresentada como Equação 3 nesta dissertação, para quantificação da eletricidade gerada a partir do Biogás que utiliza o esterco bovino como substrato. Onde através da quantidade de esterco gerada por dia se obtém um valor referente a eletricidade gerada.

$$mc = \frac{E}{0,008973} \times 0,1 \quad (3)$$

Onde mc seria a massa bruta de esterco de vaca, dado em Kg/dia, e E seria a energia elétrica, tendo como unidade KW/dia.

Na figura 15 temos alguns substratos que podem ser utilizados em uma usina de Biogás e alguns destinos da produção deste tipo de estabelecimento.

Figura 15 - Substratos e Produtos na Usina de Biogás



Fonte: CIbiogás (2022).

3.11 AVALIAÇÃO ENERGÉTICA

Para a utilização de um material como combustível é necessário um estudo de avaliação energético. A partir desta pesquisa, obtendo resultados satisfatórios em determinados itens, é possível classificar um material como um bom combustível.

Para o melhor aproveitamento da biomassa, é importante saber caracterizar corretamente seus parâmetros energéticos. Na energia da biomassa são descritos o teor de umidade, a análise imediata, a análise elementar, a análise química e o poder calorífico (GARCIA *et al.*, 2012).

3.11.1 CARBONO FIXO (CF)

Carbono Fixo (CF) é definido como a quantidade de carbono que permanece em um material após procedimentos de remoção de substâncias voláteis e cinzas. Sendo então um resíduo combustível que surge como um produto de alguns métodos de secagem e queima.

O teor de carbono fixo descreve o tempo de residência de uma biomassa durante sua combustão (DHYANI & BHASKAR, 2018).

Para definir o valor de CF para uma amostra se faz a utilização da Equação 4, que é apresentada na NBR 8112.

$$CF(\%) = 100 - (TMV (\%) + TC (\%)) \quad (4)$$

Onde, TMV se refere a Teor de Materiais Voláteis, e TC se refere a Teor de Cinzas.

3.11.2 TEOR DE MATERIAIS VOLÁTEIS (TMV)

A volatilidade é medida de facilidade que uma substância passa do estado líquido para um estado gasoso.

O teor de voláteis caracteriza a velocidade de ignição do material (DHYANI & BHASKAR, 2018).

O teor de materiais voláteis pode ser obtido através da razão entre a subtração entre as massas do material úmido (m_u) e o material seco (m_s) sobre a massa do material úmido, como resultado esperado é porcentagem realize-se a multiplicação por 100, como descrito na Equação 5.

$$TMV (\%) = \left(\frac{m_u - m_s}{m_u} \right) \times 100 \quad (5)$$

3.11.3 TEOR DE CINZAS (TC)

O teor de cinzas pode ser definido como a quantidade de minerais inorgânicos presentes em uma determinada amostra, após a queima completa de toda a matéria orgânica.

O teor de cinzas pode influenciar na incrustação e entupimentos das tubulações das caldeiras, além de influenciar negativamente o poder calorífico (DHYANI & BHASKAR, 2018).

O teor de cinzas pode ser obtido por meio da razão entre a massa de cinzas (m_c) pela massa de material úmido (m_u), como resultado esperado é em porcentagem realiza-se a multiplicação por 100, como descrito na Equação 6.

$$TC (\%) = \left(\frac{m_c}{m_u} \right) \times 100 \quad (6)$$

CAPÍTULO IV

METODOLOGIA

4.1 METODOLOGIA DESENVOLVIDA

Nesta seção será apresentada a metodologia aplicada no desenvolvimento da pesquisa desta peça de estudo. Serão demonstrados as escolhas realizadas e os testes aplicados no decorrer das análises.

4.2 ESCOLHA DO SUBSTRATO

A escolha do substrato a ser estudado detém uma determinada importância, visto que alguns materiais têm um poder de geração maior que outros. No entanto, para essa pesquisa a escolha passou por mais alguns critérios que puderam validar a escolha.

O substrato escolhido para esse estudo, após análises criteriosas que serão descritas nesta seção, foi o esterco bovino.

4.2.1 REGIÃO

Ao se analisar a região definida para estudo, sendo essa o estado da Paraíba, foi possível constatar dois eixos de substratos para a pesquisa, o primeiro, resíduos orgânicos de domicílios e comércios; o segundo, material orgânica em propriedades rurais, desde a resíduos de plantação a fezes de animais.

Outro fator para ser observado foi a existência de aplicações destes substratos na geração de Biogás no estado. No primeiro substrato observado, os aterros sanitários atendem a utilização desse material para geração do Biogás, mesmo que não seja de maneira direta e efetiva. Quanto a esse tipo de insumo, existem pesquisas iniciais sendo desenvolvidas no LABES para utilização deste em conjunto com o esgotamento sanitário.

Ao se analisar o substrato rural, podemos observar um baixo uso deste para geração de Biogás no estado comparado com estados produtores no Brasil. A relação de uso exclusivo do esterco bovino se fortalece ainda pela existência de uma contínua pesquisa no LABES sobre este tipo de insumo.

4.2.2 QUANTIDADE E FACILIDADE DE COLETA

Para escolha do substrato a quantidade gerada também foi levada em consideração. Em trabalho desenvolvido por KUSMIYATI *et al* (2023a) é apresentado que um animal bovino, gera em torno de 30 kg/dia, com esse valor variando de acordo com a dieta que é oferecida ao animal.

Outro fator importante para estudo, já que serão aplicados testes práticos, seria a possibilidade de adquirir o material para uso em laboratório. Neste ponto, o LABES contou com parceria de um produtor rural da cidade de Guarabira-PB, região utilizada para modelagem de local para aplicação do sistema de geração e uso. As coletas aconteciam de maneira semanal, uma vez por semana, o que manteria o material em condições *in natura* para pesquisa.

Na Pesquisa Produção da Pecuária Municipal 2022 divulgada pelo IBGE, o estado da Paraíba apresentava um total de aproximadamente 1,3 milhões de animais bovinos. Ao

direcionar os números para região do Agreste Paraibano, região onde a cidade de estudo está incrustada, o número de cabeça de gado chega a 425.925, atingindo assim detém aproximadamente 33% da quantidade do total do estado.

4.3 ANÁLISE ENERGÉTICA DO ESTERCO BOVINO

A NBR 8112 descreve os passos necessários para realizar uma análise energética do material através dos índices de carbono fixo, materiais voláteis e teor de cinzas. Nesta seção serão descritos os equipamentos utilizados no teste e também a metodologia utilizada para os testes.

4.3.1 LOCAL DE TESTE

Os ensaios foram realizados na Universidade Federal da Paraíba, na cidade de João Pessoa – Brasil, especificamente no Laboratório de Energia Renováveis. O ambiente se trata de local com temperatura controlada, sendo setada em 20°C, com acompanhamento de termômetros em 4 pontos do ambiente, essa quantidade foi utilizada de forma redundante por conta dos equipamentos já estarem instalados no laboratório. Na figura 16 temos um multímetro conectado a um termopar para aferição de temperatura da sala.

Figura 16 - Multímetro conectado ao termopar



Fonte: Autor.

4.3.2 MATERIAL ANALISADO

O material a ser estudado se trata de esterco bovino fresco, coletado com um produtor rural parceiro do Laboratório, tendo um intervalo entre a coleta e o ensaio de 12h.

4.3.3 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

4.3.3.1 FORNO

Para realização dos ensaios se fez necessário a utilização de um forno do tipo Mufla. O equipamento utilizado é da marca FORNITEC, com controlador de temperatura e alcance máximo de 1200 °C. Na Figura 17 é apresentada a imagem do equipamento utilizado.

Figura 17 - Forno Tipo Mufla



Fonte: Autor.

4.3.3.2 TERMOPARES

Para aumentar o controle de temperatura, além do controlador do forno, foi utilizado na pesquisa um equipamento de aquisição de dados, da marca Agilent Technologies, modelo 34970a, conectado a dois termopares do tipo J, modelo que apresenta melhor faixa de medição para a situação. Para acompanhar toda variação de temperatura em dois pontos dentro do forno durante todo o ensaio. Na Figura 18 é apresentado o equipamento utilizado.

Figura 18 - Equipamento de aquisição de dados



Fonte: Autor.

4.3.3.3 BALANÇA

O equipamento utilizado para mensurar os dados obtidos foi a balança de precisão da marca OHAUS, de modelo Galaxy 400-SO, apresentando dois números significativos.

4.3.3.4 CADINHOS

Os cadinhos utilizados para colocação do material são de porcelana, de Marca CHIAROTTI, modelo M-43, apresentando resistência em altas temperaturas, o que facilitou o decorrer do ensaio. Na figura 19 são apresentados os 3 recipientes utilizados na pesquisa.

Figura 19 - Recipientes utilizados no ensaio



Fonte: Autor.

4.3.4 METODOLOGIA DO TESTE

4.3.4.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

De maneira inicial após a preparação do ambiente, conferindo as questões de controle, é realizado a preparação das amostras. Em primeiro plano, realiza-se a pesagem das porcelanas de modo a registrar os valores obtidos após o processo, na Tabela 3 temos os valores dos recipientes.

Tabela 3 - Peso dos recipientes

Recipiente	Peso (g)
1	35,06
2	46,94
3	40,40

Fonte: Autor.

O material coletado é colocado em 3 recipientes, em quantidade próximas, de modo a geral uma triplicata, para uma melhor apreciação dos resultados. Na Tabela 4 temos os valores de materiais utilizados. Na Figura 20 são apresentados os recipientes após a inserção de material.

Tabela 4 - Peso após inserção de material

Recipiente	Peso Total Recipiente + Material (g)	Peso Material (g)
1	53,57	18,57
2	67,56	20,62
3	60,14	19,74

Fonte: Autor.

Figura 20 - Recipientes após a inserção de material



Fonte: Autor.

4.3.4.2 SECAGEM E CARBONIZAÇÃO

Seguindo os passos descritos na NBR 8112, serão determinados os teores de umidade, material volátil, cinzas e teor de carbono fixo. Para isto, na seção de resultados serão utilizadas as Equações 4, 5 e 6 que estão descritas na seção de Fundamentação Teórica e são necessárias para uso seguindo a NBR em questão.

Para iniciar o processo de carbonização são preparadas as 3 amostras nos recipientes, em seguida são colocadas no forno a temperatura ambiente. A primeira configuração a ser inserida no forno é a para se atingir a temperatura de 100 graus Celsius, com variação de 10°C para mais ou para menos. Ao se alcançar essa temperatura as amostras permaneceram durante 24 horas com a temperatura estável, realizando assim um processo de secagem. Com esse procedimento podemos realizar a retirada de umidade dos materiais e em sequência é realizada uma nova pesagem, estes valores estarão apresentados na seção de Resultados.

Em sequência, após os procedimentos iniciais, as amostras são inseridas no forno novamente, previamente na temperatura de 100 graus Celsius. Inicia-se um aquecimento controlado durante 3 horas, onde a cada intervalo de 30 minutos aumenta-se a temperatura no controlador do forno, de modo que ao fim das 3h teremos uma taxa de aquecimento de 1,6°C por minuto. O resultado após o decorrer do experimento é a criação de carvão a partir de esterco bovino para análise.

4.4 MODELAGEM LOCAL DE APLICAÇÃO DO ESTUDO DA PEQUENA CADEIA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Considerando a parceria com o produtor rural, de modo a colaborar com o desenvolvimento e aplicação da pesquisa, o local escolhido dentro do estado da Paraíba será uma propriedade rural produtora de leite, localizada na cidade de Guarabira, na região Agreste do estado.

Ao se observar a temperatura da cidade, em dados climáticos obtidos no Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), foi possível constatar que a temperatura fica em torno de

26 a 32°C durante o ano. Ao analisar o trabalho de LIRA (2021), os valores da cidade se encontram dentro do intervalo que favorecem a produção de Biogás.

De maneira a quantificar as necessidades do local, foram definidos alguns parâmetros quantitativos. Em primeiro momento, a unidade conta com 12 animais bovinos em idade adulta. Relacionando essa quantidade com o estudo de KUSMIYATI *et al* (2023a), é possível chegar ao denominador de uma produção diária de 360 kg/esterco/dia.

De maneira a dimensionar as próximas etapas se fez necessário definir as principais necessidades da unidade produtora. Em primeiro plano, a primeira necessidade levantada pelo produtor foi relacionada a uso de gás para gerar vapor d'água para esterilização dos equipamentos utilizados na ordenha e também em uso próprio domiciliar. Em reunião de pesquisa foi levantado a questão de utilização do gás em um grupo motogerador para geração elétrica de modo a diminuir os custos energéticos ou até suprimir os valores gastos com concessionária estadual.

4.5 ESCOLHA DO BIODIGESTOR

Em sequência a definição dos parâmetros, seguimos com a etapa seguinte, a escolha do biodigestor ideal para a situação. Alguns pontos chave para escolha são: adequação ao ambiente escolhido, capacidade, facilidade de construção e valor de investimento necessário para implementação do equipamento. Os modelos analisados foram o indiano, chinês e canadense.

O modelo escolhido foi o canadense, também chamado de tipo lagoa, sendo os principais motivos que levaram a essa escolha a questão da grande quantidade de dejetos diário produzido, grande exposição ao sol, o que em locais de temperaturas mais altas, como é o caso da área estudada, favorece para um aumento na produção de biogás e também a facilidade de construção atrelado ao baixo custo, visto que o equipamento em grande maioria é construído de alvenaria.

Seguindo o roteiro de pesquisa, um dos empecilhos para aplicação do biodigestor canadense se apresenta na vedação da lona. Em seu modelo tradicional essa questão é resolvida com a imersa da lona de PVC em uma lâmina de água, no entanto esse tipo de solução encarece

o valor final de construção do equipamento. Na Figura 21 temos um modelo de aplicação de biodigestor em uma propriedade rural.

Figura 21 - Biodigestor em propriedade rural



Fonte: G1 (2021).

4.5.1 MODELO ADAPTADO DE BIODIGESTOR CANADENSE

A partir dessa problemática, realizou-se um desenvolvimento de um modelo adaptado do projeto original de biodigestor canadense. Visando a facilidade e o custo baixo de construção. A área reservada na propriedade de toda cadeia produtiva foi de 10x20 metros, efetivando um espaço útil de 200 metros quadrados, tendo uma localização estratégica próximo ao ambiente dos animais e também próximo as unidades de ordenha, residência e local de implementação de um futuro motogerador.

O primeiro passo foi o dimensionamento, partindo dos dados apresentados nessa seção, o biodigestor terá uma alimentação diária de 360 quilos de esterco. Lira (2021) apresenta quantidades de dias ideais para retenção hidráulica, para a situação problema deste trabalho definiu-se uma retenção de 25 dias. Assim, o biodigestor deve ser capaz de abrigar a produção

diária de esterco de 25 dias totalizando assim 9 toneladas. Todavia, uma outra questão deve ser levada em consideração, a alimentação deve ser feita com adição de água em proporção 1:1. Ao final dessa etapa então constatou-se que seriam necessários 18 metros cúbicos para a operação ser realizada segundo os parâmetros definidos. Na tabela 5 temos os dados detalhados.

Tabela 5 - Produção de Esterco

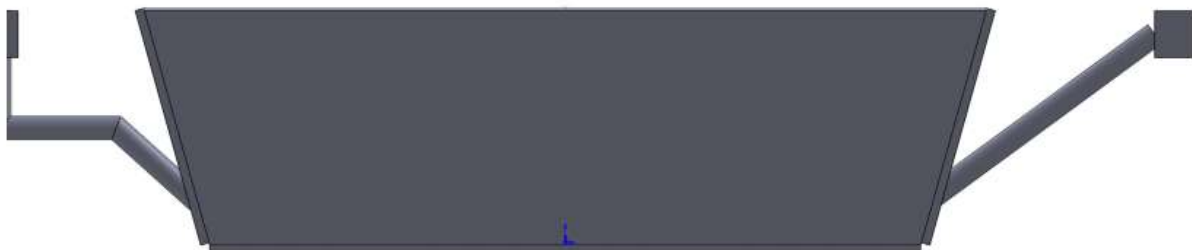
Produção de Esterco	Peso do Esterco (Kg)
Diária	360,00
25	9000,00

Fonte: Autor.

Considerando uma margem de segurança de 25% para mais em relação a produção, o volume definido como necessário, considerando a lona que deve se acomodar na lagoa e também admitindo uma variação maior de alimentação. Com essa alteração o volume alcançado foi de 24 metros cúbicos. Desta maneira teríamos espaço suficiente para a retenção de 25 dias, com folga, para uma melhor produção de Biogás.

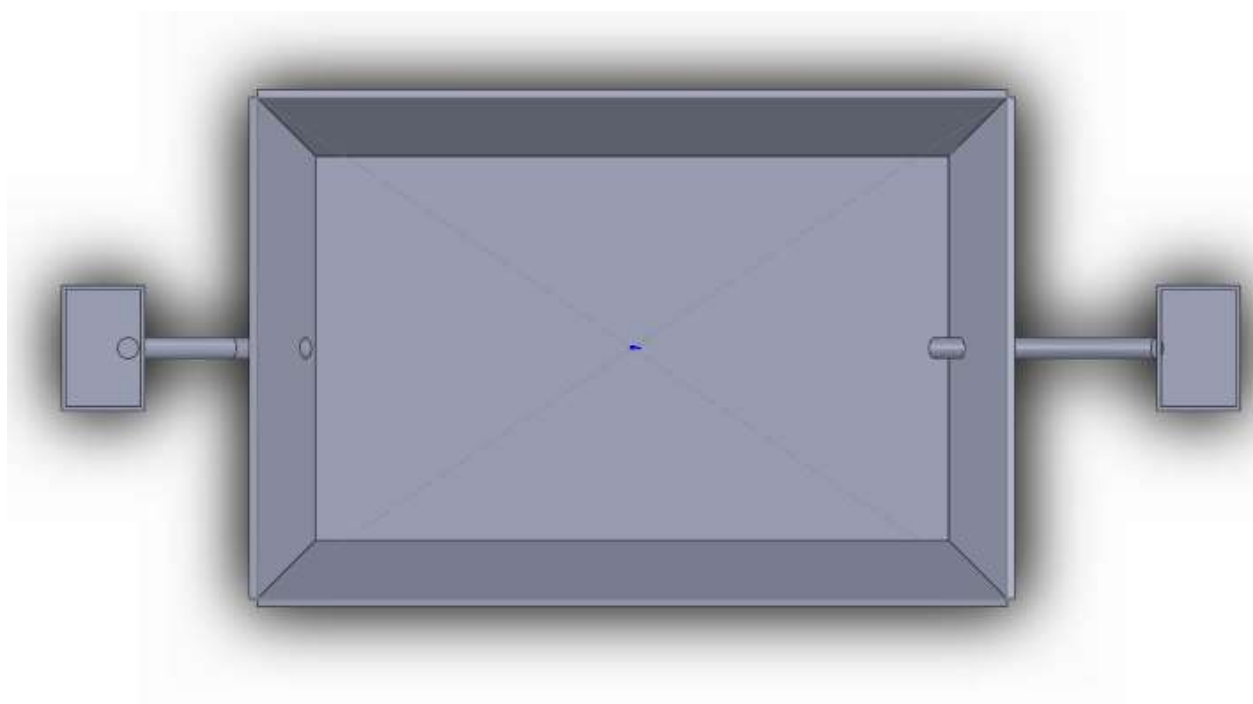
O biodigestor terá medidas superiores externas de 5,4 metros de comprimento, 3,6 metros de largura e uma profundidade de 1,5 metros, a parte inferior diminui as dimensões de modo que o desenho se afunila, como é demonstrado na Figura 22, 23 e 24, que mostram o modelo desenhado no software SolidWorks de licença estudantil. No final deste trabalho é apresentado no Apêndice I um relatório de construção referente para implementação deste equipamento construído em alvenaria em escala na área do LABES.

Figura 22 - Vista Frontal do Sistema



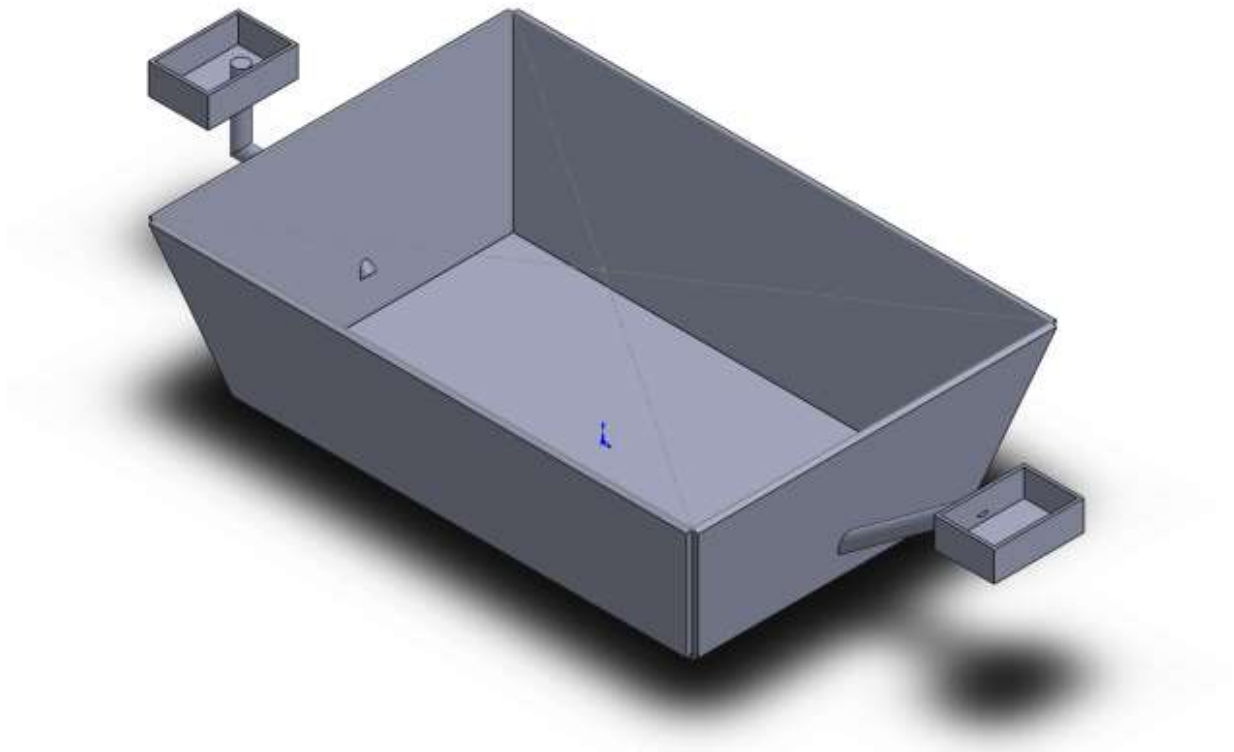
Fonte: Autor.

Figura 23 - Vista Superior do Sistema



Fonte: Autor.

Figura 24 - Vista Isométrica do Sistema



Fonte: Autor.

As extremidades foram adicionadas duas caixas de alimentação e descarga, a inserção das linhas de alimentação de esterco e extração de biofertilizante funcionarão no mecanismo de vasos comunicantes, de modo que a quantidade alimentada será a mesma quantidade da saída. Com isso teremos sempre o nível de material mantido e asseguramos a renovação necessária. O equipamento tem 4 partes que são definidas da seguinte maneira:

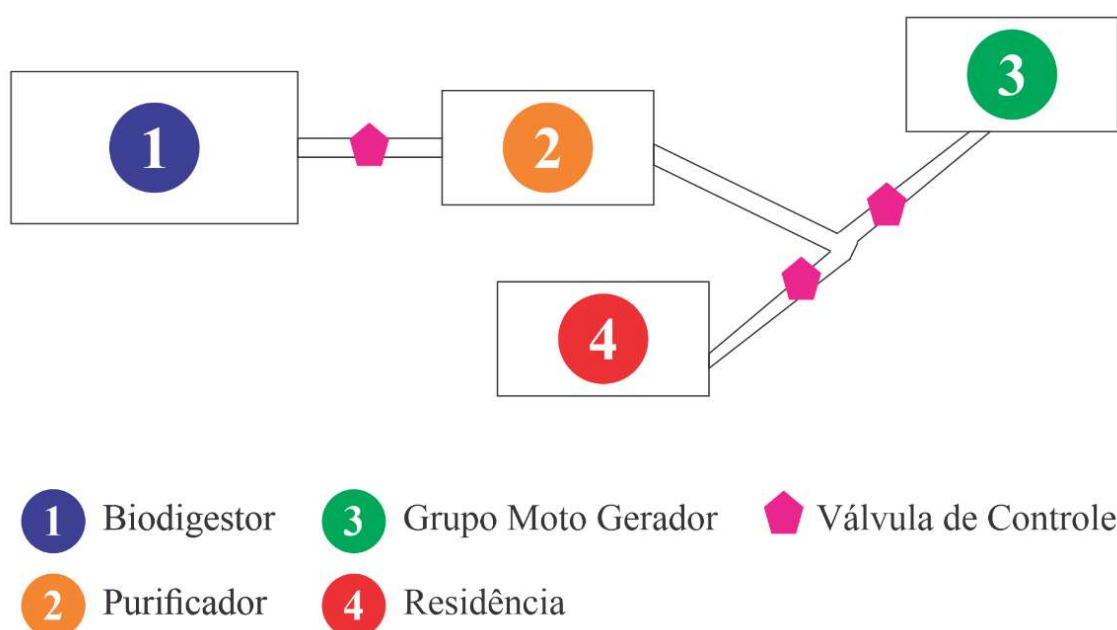
1. Caixa de Areia: Onde será alimentado a princípio com esterco de vacas, nesse ambiente ocorre a decantação de pedras e areia, de modo a somente o esterco entrar no biodigestor;
2. Biodigestor: Ambiente onde ocorre a digestão da matéria orgânica e consequentemente a geração do gás;
3. Esterqueira: Neste ambiente estará todo o material que já passou pelo biodigestor, tem comunicação com o biodigestor através de vaso comunicante, de modo a quantidade de material que entra será a mesma do que sai;
4. Gasômetro: Ambiente criado pela cobertura de lona para acúmulo do gás.

Para o gasômetro será utilizada lona de PVC com dimensões 8 metros por 5 metros, onde na região central haverá uma válvula para extração.

4.5.2 DESENVOLVIMENTO DE LINHA DE TRANSMISSÃO DE GÁS

Posteriormente a definição dos parâmetros de desenvolvimento de biodigestor, a seção seguinte para pesquisa seria a linha de transmissão, que é apresentada na Figura 25.

Figura 25 - Linha de Transmissão Biogás



Fonte: Autor.

Como já explicado em seções anteriores, o biogás ao sair do biodigestor se apresenta com alto grau de impurezas, gases que irão atrapalhar no processo de combustão. Portanto, se faz necessário a inserção de um purificador na linha, no projeto desenvolvido esse equipamento se encontra antes do ponto de divisão. Visando manter o custo baixo, o purificador utilizado é resultado de trabalhos passados do Laboratório de Energia Sustentável - LABES.

Os fluxos serão controlados pela adição de válvulas de controle de vazão, de modo a controlar o fluxo do biogás. Assim, são apresentadas duas alternativas de uso para a propriedade

rural, sendo a primeira a utilização como substituição do gás de cozinha e lenha, para uso doméstico e comercial na esterilização dos equipamentos para ordenha, esse setor seria alimentado com o gás na situação onde a válvula de controle anterior ao grupo motogerador estará na posição fechada. E a segunda alternativa seria a alimentação de um grupo moto gerador a gás, para geração de energia também com as finalidades domésticas, visando a autossuficiência da propriedade, e também comerciais ao permear a linha do concessionário de energia elétrica com o excedente da rede, tendo um abatimento no valor final gerando um percentual de lucro maior.

4.6 CONSTRUÇÃO DE PROTÓTIPO

4.6.1 PROTÓTIPO BIODIGESTOR CANADENSE

Em um primeiro momento o grupo de pesquisa decidiu optar por uma construção de protótipo em alvenaria nas proximidades do LABES. Contudo, por alguns infortúnios o projeto não pode ser aplicado.

O modelo do protótipo passaria a ser construído em madeira, com um revestimento interno com lonas de polietileno de baixa densidade (PEBD), de modo a criar uma camada de impermeabilização. As duas caixas de entrada e saída foram confeccionadas com auxílio de canos de policloreto de vinila (PVC). Com a restrição de material e espaço sendo uma problemática enfrenta pelo grupo de pesquisa, se definiu a escala de 1:6 para uma melhor condição de fabricação e manutenção do equipamento durante o estudo. A escolha dessa escala se deu pelas limitações físicas de espaço encontradas no laboratório, ambiente no qual ficaria o protótipo. Nas Figuras 26, 27 e 28 são apresentados momentos de fabricação do protótipo.

Figura 26- Fabricação Protótipo



Fonte: Autor.

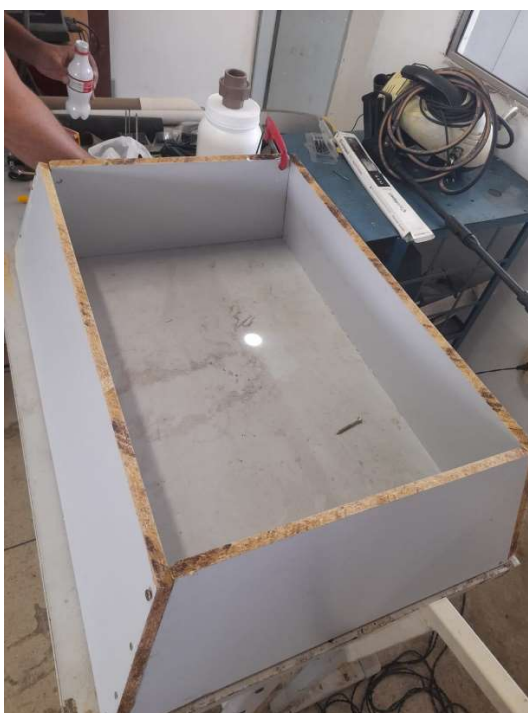
A maior dificuldade encontrada na construção do equipamento acontece por conta da vedação. Durante todo o processo, todo erro foi sendo depurado de modo a não apresentar vazamento. Nas Figuras 29 mostra a estrutura de madeira finalizada. A Figura 30 apresenta o local de entrada já vedada, enquanto a Figura 31 mostra a parte interna com a lona utilizada para impermeabilização.

Figura 27 - Fabricação Protótipo Continuação 1



Fonte: Autor.

Figura 28 - Construção Protótipo Continuação 2



Fonte: Autor.

Figura 29 - Estrutura de Madeira Finalizada



Fonte: Autor.

Figura 30 - Sistema de Entrada do Protótipo



Fonte: Autor.

Figura 31 - Parte Interna do Protótipo



Fonte: Autor.

Nas figuras 32 e 33 podemos notar o biodigestor em funcionamento com preenchimento da zona de acumulação de gás. Alguns fatores negativos da construção em madeira foi a não possibilidade de aplicação de lâmina d'água para a vedação, sendo essa a maior dificuldade.

Figura 32 - Protótipo de Biodigestor em funcionamento



Fonte: Autor.

Figura 33 - Protótipo em funcionamento



Fonte: Autor.

4.6.2 PROTÓTIPO BIODIGESTOR EM BOMBONA DE PVC

O segundo modelo construído para produção de Biogás foi o modelo adotando uma bombona de PVC de 100 litros. Esse equipamento foi escolhido para ser utilizado com base em conhecimento já utilizado no grupo de pesquisa do LABES. Durante os testes do seu trabalho, Oliveira (2023), utilizou-se deste tipo de biodigestor para realizar a alimentação com resíduos do restaurante universitário.

A construção é feita com a realização de furos para inserção de tubos de PVC, de modo a funcionarem como entrada, saída e ponto de extração do gás. Um ponto a se destacar deste

tipo de equipamento seria a facilidade de vedação, que pode ser reforçada com a utilização de abraçadeiras que realizam esta função. Na Figura 34 temos a representação do sistema utilizado.

Figura 34 - Biodigestor de Bombona Plástica



Fonte: Autor.

4.6.3 ARMAZENAMENTO DO GÁS

De maneira inicial, o gás foi armazenado em uma câmara de ar de um pneu de borracha, como mostrado na Figura 35. Esse instrumento foi conectado ao ponto de extração do gás para que fosse possível uma extração contínua do Biogás. O principal fator de escolha para esse conjunto foi relacionado ao custo e em seguida a facilidade de manejo.

Figura 35 - Armazenamento do Biogás



Fonte: Autor.

4.6.4 ALIMENTAÇÃO

A inserção de esterco bovino foi a maneira controlada, distribuída em intervalos de tempo. Como recomendação para a produção do Biogás é necessário a diluição da matéria sólida. Nos estudos realizados no LABES a opção escolhida foi a mesma definida no escopo deste trabalho, 1:1, onde a cada alimentação de 100 gramas de esterco bovino, de maneira semelhante, eram adicionados 100 gramas de água. Essa proporção colabora com alguns fatores locais, já que na região onde se encontra o modelo de estudo, a cidade de Guarabira no Agreste Paraibano, os índices de chuva são baixos. Deste modo, o uso racional da água se faz necessário para se manter o equilíbrio econômico do sistema.

4.7 PRODUÇÃO DE BIOGÁS NO LABORATÓRIO

A produção de Biogás no LABES durante o período da pesquisa foi exclusivamente utilizando o esterco bovino como substrato. Como descrito anteriormente, alimentação se deu em intervalos de tempo e em ambiente com temperatura controlado, tendo como temperatura máxima alcançada de 33° C e mínima de 25° C, se aproximando das condições de temperatura

do local estudado. De modo simultâneo, os dois protótipos de biodigestores foram alimentados com o esterco bovino diluído. Na Figura 36 é apresentada uma câmara de ar preenchida com biogás produzido no LABES.

Figura 36 - Biogás na câmara de ar



Fonte: Autor.

CAPÍTULO V

RESULTADOS

5.1 INTRODUÇÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos no decorrer da aplicação da metodologia descrita na seção anterior.

5.2 ANÁLISE ENERGÉTICA DO ESTERCO BOVINO – RESULTADOS

5.2.1 SECAGEM

Após o processo de pesagem, as amostras foram inseridas no forno para o processo de secagem, em sequência se realiza uma nova pesagem, os resultados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Peso após a secagem

Recipiente	Peso Material (g)
1	3,45
2	3,53
3	3,55

Fonte: Autor.

Prosseguindo com os resultados, aplicando os valores da pesagem na Equação 5 para se obter o valor dos materiais voláteis temos o valor médio, da triplicata, de 82,09%. Os resultados das amostras são descritos na Tabela 7.

Tabela 7 - Material Volátil após a secagem

Recipiente	TMV (%)
1	81,36
2	82,88
3	82,02
Média	82,09

Fonte: Autor.

Utilizando a Equação 4, é possível realizar a caracterização deste material após o processo de secagem. Na Tabela 8 temos a caracterização do esterco após o estágio de secagem.

Tabela 8 - Caracterização Esterco Bovino após secagem

Umidade	TMV (%)	TC (%)	CF (%)
17,91 ± 0,05	82,09 ± 0,05	00,00 ± 0,05	17,91 ± 0,05

Fonte: Autor.

Ao se comparar o valor obtido com os obtidos por BRANDÃO (2023) e PIRES *et al* (2024), 5,86 % e 27,20%, respectivamente, podemos definir que amostra se enquadra em uma posição melhor que a encontra por PIRES *et al* (2024), visto que a umidade é fator influente no poder calorífico do material, sendo o esterco bovino alcançado melhor resultado frente a polpa do caroço de algodão utilizado pelos dois autores. Importante relatar a importância da secagem para queima da biomassa, visto que mais seco o material, menos energia será exigida para a queima.

Nesta etapa nenhum material obteve carbonização, logo se torna explicado o valor encontrado de 0,00% para o teor de cinzas.

Em uma segunda comparação de valores, em BRANDÃO (2023), o valor do Carbono Fixo encontrado nessa etapa foi de 15,36%. Nessa pesquisa, o valor obtido foi de 17,91%, um valor maior 16,6%, sendo então o potencial energético do esterco bovino maior.

5.2.2 CARBONIZAÇÃO

Dando sequência ao estudo do potencial energético seguimos com a etapa de carbonização. Na Tabela 9 temos os valores obtidos após a pesagem.

Tabela 9 - Peso após carbonização

Recipiente	Peso Material (g)
1	1,70
2	1,64
3	1,73

Fonte: Autor.

Com os dados apresentados podemos aplica-los na Equação 6 para definir os valores do Teor de Cinzas nas amostras. O valor médio da triplicata para esse índice foi de 8,62%, sendo apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Teor de cinzas

Recipiente	TC (%)
1	9,18
2	7,94
3	8,76
Média	8,62

Fonte: Autor.

Com a aplicação dos valores na Equação 4 teremos a caracterização do material após a carbonização, na Tabela 11 são apresentados os valores encontrados.

Tabela 11 - Caracterização Esterco Bovino após a carbonização

Umidade	TMV (%)	TC (%)	CF (%)
00,00 ± 0,05	00,00 ± 0,05	08,62 ± 0,05	91,38 ± 0,05

Fonte: Autor.

Comparando os dados com BRANDÃO (2023) e PIRES *et al* (2024), é possível constatar que o esterco bovino se apresenta como uma boa alternativa energética. O valor obtido de Carbono Fixo apresenta essa confiabilidade necessária para afirmar que este material pode vir a ser utilizado como um combustível. Na Figura 37 temos o material obtido após todo o ensaio. Valores superiores a 75% para o CF indicam que a substância pode ser utilizada como combustível.

Figura 37 - Material ao final do ensaio



Fonte: Autor.

5.3 PRODUÇÃO DE BIOGÁS NOS PROTÓTIPOS

Durante o processo de alimentação dos biodigestores, foi possível constatar, através de análise visual do sistema, que o protótipo de biodigestor do tipo canadense apresentava uma produção aquém do modelo em bombona. Na Figura 38 temos a pesagem para alimentação no biodigestor do tipo bombona.

Figura 38 - Pesagem substrato



Fonte: Autor.

5.3.1 PROTÓTIPO TIPO LAGOA

A problemática da vedação causou a instabilidade de produção do protótipo lagoa, como o modelo em alvenaria se apresenta com uma lâmina d'água para imersão da borda da

lona e este processo não poderia ser replicado no modelo construído. Com isso, esse equipamento desenvolvido foi analisado apenas como um modelo para análise de volume e capacidade de funcionamento dos vasos comunicantes projetados para alimentação e limpeza do biodigestor.

A alimentação no biodigestor aconteceu de maneira proporcional aos dados de produção diária de esterco de acordo com a quantidade de animais, apresentados nos capítulos 3 e 4 deste estudo. Ao se completar o TRH definido de 25 dias, realizando a inserção no 26º dia o material sobressalente começou a sair pela tubulação de saída do biodigestor, sendo comprava sua funcionalidade nesta questão de volume.

5.3.2 PROTÓTIPO BOMBONA

De maneira distinta ao protótipo lagoa, o protótipo de biodigestor fabricado em bombona apresentou comportamento satisfatório para produção de biogás. Diferentemente do outro modelo, este foi alimentado com maiores quantidades com um tempo e intervalo maior entre os processos de entrada de novo substrato e saída do biofertilizante.

Todavia, por questões de armazenamento, sendo este feito em câmara de ar de pneu, obtivemos dificuldade no manejo e condicionamento do gás para fins de quantificação. De modo a qualificar o gás foram testes de cromatografia inicial e teste de chama.

5.3.3 ANÁLISE PRODUÇÃO

Para analisar a pureza do biogás produzido no protótipo do tipo bombona, o grupo de pesquisa do LABES realizou estudou com uma câmara térmica modelo 20A800G Cative 12V 640x480 FLKTI480PRO9HZBR Fluke. O teste aconteceu no período de 1 minuto, tendo apresentado temperatura máxima de 204,6º C, obtido na superfície da mangueira de saída, e temperatura mínima de 25,4ºC.

Excluindo as temperaturas da mangueira, foi possível calcular uma temperatura média de 33°C, sendo essa condição benéfica para atuação dos microrganismos anaeróbicos mesofílicos realizarem a digestão, contribuindo na metanogênese.

5.4 TESTE DE CHAMA

O teste de chama foi realizado com intuito de verificar, visualmente, sobre a presença de metano no biogás gerado pelo protótipo. Na Figura 39 temos a imagem da chama, apresentando uma coloração azul vibrante, sendo então característico de um combustível que apresenta um alto teor de metano.

Figura 39 – Chama



Fonte: Autor.

5.5 CROMATOGRAFIA

De modo a caracterizar o gás produzido com esse tipo de substrato, realizou-se o teste de cromatografia, apresentando os resultados apresentados na Tabela 12, onde foi possível constatar a presença majoritária de CH₄, como também uma presença alta do CO₂. Com estes resultados podemos realizar um projeto melhor de filtro para as condições encontradas. Os testes foram realizados no Laboratório de Reatores do Departamento de Química da UFPB.

Tabela 12 – Cromatografia

Item	Área (%)
O ₂	1,88
N ₂	5,69
CH ₄	51,50
CO ₂	40,93

Fonte: Autor.

5.6 CADEIA PRODUTIVA LOCAL

Neste item, serão apresentados os resultados detalhados do projeto da cadeia produtiva para uma unidade rural produtora de leite, utilizando um sistema de geração elétrica e utilização do biogás em situações do cotidiano rural.

5.6.1 ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Em seu trabalho KUSMIYATI *et al* (2023a) ao estudar a produção de biogás através do esterco bovino, especialmente de vacas leiteiras, apresenta em sua produção que um 1 quilograma de esterco bovino gera em média 33 litros de biogás. Com os dados da caracterização do local estudado, que se encontram no item 4.4 desta pesquisa, podemos

apresentar alguns resultados. Na Tabela 13 são apresentados os valores em quilogramas da produção esperada de esterco bovino para 12 animais. Em sequência, na Tabela 14, são apresentadas a produção esperada de biogás relacionando o montante de esterco produzido ao valor de referência apresentado por KUSMIUATY.

Tabela 13 - Produção de Esterco Bovino

Período (dias)	Esterco Produzido (kg)
1	360
30	10800
365	129600

Fonte: Autor.

Tabela 14 - Produção de Biogás

Período (dias)	Biogás (m ³)
1	360
30	10800
365	129600

Fonte: Autor.

Com esses resultados podemos realizar um comparativo com o gás comercial vendido em botijão de 13kg que comporta 16,38 m³ de gás natural custando em média na localidade, durante o período de estudo, R\$95,00 (botijão de GLP no mês de fevereiro no ano de 2024 na cidade de João Pessoa).

Com a produção estipulada o equipamento seria capaz de produzir aproximadamente 21 botijões por mês, gerando em valor R\$ 1995,00. No entanto, a intenção deste trabalho é definir a utilização biogás em três frentes.

O biogás gerado, como descrito nas linhas de gás para este projeto, irá alimentar fogões e fornos na residência e o setor de esterilização. Atualmente, o consumo de botijão na propriedade é de 6 unidades por mês. Com a implementação do biodigestor restariam em média 15 unidades em volume de botijão, considerando o uso apenas para essa função e não para uso no grupo motogerador.

5.6.2 ESTIMATIVA PRODUÇÃO BIOFERTILIZANTE

Via de regra, empreendimentos familiares que produzem leite somam como atividade do local a agricultura. Deste modo, um dos resultados do uso de biodigestores é o biofertilizante.

Ao realizar a alimentação do equipamento, o esterco previamente é misturado com água, de preferência destilada, sendo a mistura realizada para essa região de 1:1, visando a economia de água em uma localidade com índices de escassez. Como aprovação dessa proporção LIRA (2021) apresenta em sua pesquisa resultados melhores seguindo a proporção escolhida pela equipe de pesquisa.

Na pesquisa apresentada por KUSMIYATI *et al* (2023a), a mistura água e esterco, após a retirada do biodigestor reduziu em torno de 7% de volume, assumiremos essa proporção para aplicação neste trabalho. Destarte, podemos relacionar na tabela 15 a quantidade produzida de biofertilizante para o local de estudo seguindo dados obtidos anteriormente.

Esse material pode ser utilizado na propriedade para seu setor de agricultura e também poderia ser direcionado para uma cooperativa de agricultores, assim fomentando o uso do biofertilizante ao invés de fertilizantes químicos e de valor alto para aquisição e em grande maioria são importados. Segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), apresentado no 6º Levantamento de Safra de Grãos 21/22, cerca de 30 a 40% do custo do produto agropecuário está relacionado ao fertilizante. Deste modo, a economia gerada ao estabelecimento rural gira em torno desta porcentagem.

Tabela 15 - Produção Esperada de Biofertilizante

Período (dias)	Biofertilizante Produzido (litros)
1	669,60
30	20088,00
365	241056,00

Fonte: Autor.

5.6.3 ESTIMATIVA PRODUÇÃO GERAÇÃO ELÉTRICA

Considerando a Equação 3 desenvolvida por WRESTA (2015) e utilizando os dados obtidos na seção anteriores, teríamos o cenário apresentado na Equação 7. Onde o *mc* utilizado foi de 360 quilogramas por dia.

$$360 = \frac{E}{0,008973} \times 0,1 \quad (7)$$

Na tabela 16 temos a apresentação da estimativa de energia para três períodos de tempos utilizando a equação 7.

Esses valores podem variar de acordo com o grupo moto gerador utilizado, então se faz necessário um estudo mais aprofundado para seleção desse equipamento, de maneira que seja o mais adequado para a situação. A unidade produtora de leite gasta em média 800 KW por mês. Assumindo os valores apresentados na Tabela 16, podemos concluir que com a produção esperada de esterco teríamos um empreendimento autossuficiente eletricamente, caso opte por utilizar o biogás apenas no grupo motogerador.

Tabela 16 - Energia produzida

Período (dias)	Energia Estimada Produzida (KWh)
1	32,30
30	969,00
365	11628,00

Fonte: Autor.

Ao correlacionar o consumo com a tarifa adota pela concessionaria de energia no mês de fevereiro de 2024 no estado da Paraíba, que é de R\$ 0,795360, teríamos uma economia esperada de R\$ 636,29.

5.6.4 PROGRAMA DE UTILIZAÇÃO DA CADEIA PRODUTIVA

A partir dos dados apreciados nas seções anteriores, a equipe fez um estudo para uma melhor utilização da planta. Partindo da necessidade de consumo médio de 6 botijões de gás por mês e um consumo elétrico em torno de 800 KW, gerando um consumo diário de aproximadamente 26,67 KW, foi apresentado ao proprietário a seguinte utilização, considerando um mês com 30 dias.

De modo a obter o melhor resultado, foi realizado um cronograma de execução diária. Com um consumo médio diário de 26,67 KW, que corresponde a 82,6% da produção diária esperada de eletricidade. Indicou o funcionamento de 20 horas de uso exclusivo do gás para geração elétrica, obtido com o fechamento da válvula que antecede a entrada para a residência e abertura da válvula que antecede o grupo moto gerador, de modo a suprir a necessidade diária de eletricidade.

Assim, restariam 4 horas para uso do gás exclusivamente para o setor de esterilização, podendo ser programado esse horário de modo a otimizar a produção com um baixo custo de uso do gás.

Essa metodologia visa gerar as necessidades apresentadas pelo proprietário no momento de apresentação dos dados. Objetivando a maior diminuição de custo para um melhor retorno financeiro.

5.6.5 ANÁLISE ECONÔMICA DO SISTEMA DA CADEIA PRODUTIVA

Para realizar essa análise iremos considerar as recomendações explicitadas na seção anterior que visa um melhor aproveitamento por parte do empreendimento.

Na Tabela 17 são apresentados os custos necessários para implementação do biodigestor. O custo com o local não foi levado em conta por se tratar de espaço dentro da propriedade e sem utilização.

Tabela 17 - Custos para implementação

Item	Valor	
Construção em alvenaria	R\$	6.500,00
Lona	R\$	2.000,00
Linha de transmissão	R\$	4.200,00
Grupo Motogerador	R\$	13.490,00

Fonte: Autor.

Os custos para implementação seriam de aproximadamente de R\$ 26.190,00, podendo ter outros itens a incidir a depender de um projeto mais elaborado para aplicação.

Considerando uma economia mensal de R\$ 636,29 relacionados ao custo da eletricidade, e uma economia de R\$ 570,00 relacionados ao consumo de botijão de gás mensal no empreendimento, se obtém uma economia mensal de R\$ 1.206,29. Contudo, para alimentação do biodigestor é necessário a diluição, estimando o uso de 10 m³ por mês de água para uso exclusivo nesse setor, teríamos um custo de aproximadamente R\$ 70,00. Considerando também um custo de R\$ 100,00 mensal para manutenções no sistema. Sendo então a economia real mensal no valor de R\$ 1036,29.

Assumindo esse custo, realizando a divisão do valor investido pela economia mensal, em 26 meses de operação, o valor economizado seria equivalente ao valor investido para implementação, tendo uma taxa de retorno rápida. Isso desconsiderando aumento das taxas de energia, preço de revenda do botijão de gás e outros custos inerentes ao biodigestor.

5.6.6 ANÁLISE AMBIENTAL

O tratamento de resíduos é uma problemática mundial, sendo a utilização de biodigestores uma solução. Analisando o caso específico da área delimitada para estudo deste trabalho, é possível observar que em torno de 129 toneladas de esterco que seriam descartados podem ser utilizados como um biocombustível, além de como um outro resultado ter a produção de biofertilizante.

Quanto ao manejo adequado do esterco bovino, este um grande gerador de CO₂, um gás de efeito estufa (GEE), podemos afirmar que a utilização deste substrato iria mitigar essa grande emissão. KUSMIYATI (2023b), pontua em sua pesquisa que 1 Kg de esterco bovino libera o equivalente a 312 Kg de CO₂.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÃO

A partir da metodologia empregada e dos resultados obtidos nesta pesquisa, é o possível afirmar que o biogás pode ser utilizado pensando em uma transição energética justa, sendo esse tipo de combustível potencialmente adaptado e adequado para utilização em países como o Brasil. Sua utilização apresenta pontos positivos desde a sua geração sendo responsável por aplicar um destino correto a determinados resíduos. O país apresenta diversos possíveis substratos e também inúmeros nichos industriais, rurais e residências que podem fazer uso desse biocombustível.

A escolha do esterco bovino como um substrato foi confirmada através dos ensaios para análise energética, apresentando um potencial para utilização para geração de energia seja através de sua queima na forma sólida, como também para geração do biogás. Um ponto importante relacionado a esse material é sua abundância, o Brasil é um país forte na produção deste tipo de animal, com um rebanho que passa dos 240 milhões de animais.

A cadeia produtiva desenvolvida no decorrer da pesquisa apresentou resultados satisfatórios, com uma taxa de retorno de investimento curta de 26 meses, sendo também um investimento de custo médio. O modelo aplicado se mostra como uma solução economicamente viável para ser implementada a localidades rurais que tenham atividades fins semelhantes à do local estudado, possibilitando a difusão tecnológica no campo, trazendo rentabilidade e

apresentando soluções lógicas para destinação dos resíduos. Alguns pontos devem ser melhor explorados de modo a otimizar o ganho real do sistema, como dimensionamento específica da linha de transmissão, escolha direcionada de grupo motogerador.

Com as características do local que foi desenvolvido os resultados esperados de geração de eletricidade, 969 Kwh/mês, uma geração mensal de biogás de 10800 m³, apresentam resultados satisfatórios para serem aplicados.

Assim, é possível concluir que o estudo deixa como contribuição uma análise energética de um substrato, como também é apresentado um modelo que tem característica intercambiável para ser aplicado em outros setores e utilizando novos substratos.

Em uma perspectiva ambiental, esse modelo de sistema com biodigestor pode ser adequado para uso em comunidades rurais que não apresentam saneamento básico, sendo possível realizar uma combinação do esgotamento sanitário com os resíduos residências, se apresentando assim como uma solução para alcançar os índices estabelecidos no Marco do Saneamento Brasileiro.

A construção de protótipo de biodigestores em laboratório exige alguns cuidados específicos quanto a vedação, no entanto, a depender do modelo esses problemas não possíveis de mitigação total. Apesar disso, o protótipo do tipo bombona apresentou comportamento adequado e produção de biogás. Em relação ao do tipo lago, por escolha de material apresentou vazamento e foi utilizado para validação do mecanismo desenvolvido para o biodigestor da cadeia produtiva.

O biogás produzido em laboratório apresentou uma grande concentração de metano, que se constatou através da utilização da câmara térmica, apresentando temperaturas favoráveis os microrganismos importantes na fase da metanogênese. No teste de chama a coloração azul vibrante foi contundente quanto a alta concentração de metano. Vale ressaltar que mesmo com esses resultados a necessidade de um filtro antes da utilização do gás é importante, visto que a mistura apresenta concentrações de outros gases que podem vir a danificar estruturas dos equipamentos.

De modo a aprimorar os resultados, sugestões para trabalhos futuros se dão em relação a verificar a modificação de dieta dos animais junto a modificação da produção. Outro quesito seria a utilização de aceleradores na digestão, isto é, utilização de substâncias químicas em um

pré tratamento do esterco bovino, com o intuito de quebrar em parte menores as partículas do esterco com a intenção de acelerar e aprimorar o processo de digestão anaeróbica.

Ao tratarmos do sistema da cadeia produtiva a sugestão apresentar é sobre realizar um estudo exegético do modelo completo, de modo a se obter uma análise exergoeconômica e posteriormente uma análise exergoambiental. Assim, será possível obter índices melhores para afirmar a validade econômica do sistema sem ficar distante da validade ambiental necessária.

Em relação ao biogás, a necessidade de estudo cromatográfico para análise do poder calorífico e purificação são necessários, de modo aprimorar o conhecimento sobre os métodos de purificação e os ganhos obtidos.

REFERÊNCIAS

AGROPLUS, AGROPLUS. **MANUAL DE RESÍDUOS EM PROPRIEDADES RURAIS**. 2022. Disponível em: <https://agroplusbrasil.com.br/wp-content/uploads/2022/11/manual-de-residuos-agroplus-web.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2024.

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2017**. Edição especial 15 anos. Disponível em: http://abrelpe.org.br/pdfs/panorama/panorama_abrelpe_2017.pdf. Acesso em: 20 jan. 2024.

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2022**. [São Paulo]: ABRELPE, 2022. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/download-panorama-2022/>. Acesso em: 09 mai. 2023.

ALVES, André Filipe Mendes. **Análise Exergoeconômica e Exergoambiental de um sistema de trigeração usando gás natural e extensão para o uso do biogás de aterro sanitário**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba. Disponível em: https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/18550/1/Andr%c3%a9FilipeMendesAlves_Tese.pdf. Acesso em: 26 fev. 2024.

AMIDPOUR, M.; MANESH, M. H. K. **Cogeneration and polygeneration systems**. Academic Press. Londres. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **ABNT NBR 10004**: Resíduos sólidos: Classificação. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: [http://analiticaqmresiduos.paginas.ufsc.br/files/2014/07/Nbr-10004-2004-Classificacao - DeResiduos-Solidos.pdf](http://analiticaqmresiduos.paginas.ufsc.br/files/2014/07/Nbr-10004-2004-Classificacao-DeResiduos-Solidos.pdf). Acesso em: 15 jun. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112**: Carvão Vegetal – Análise imediata. Rio de Janeiro, 1986. Available at: <https://pt.scribd.com/document/791305620/ABNT-NBR-8112-1986>.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2010b. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 15 mai. 2024

Brandão, M. C. P., et al, 2023. **Avaliação da Viabilidade do uso do Caroço de Algodão como Insumo Energético**. PEER REVIEW, VOL. 5, Nº 11, 2023, DOI: 10.53660/592.PRW1610 ISSN: 1541-1389.

CCEE, Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. **Balanço 2022**. Disponível em: https://www.ccee.org.br/o/ccee/documentos/CCEE_1068101. Acesso em: 01 mar. 2024.

CIBIOGÁS, 2022. Disponível em: < <https://materiais.cibiogas.org/downloadpanorama-do-biogas-no-brasil-2021>>. Acessado em 01 de dezembro de 2024.

CONAB, CONAB. Boletim da Safra de Grãos. In: Boletim da Safra de Grãos. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em: 18 jul. 2024.

COSBEY, A. Trade, sustainable development and a green economy: Benefits, challenges and risks. *The Transition to a Green Economy: Benefits, Challenges and Risks from a Sustainable Development Perspective*, p. 40, 2011.

DHYANI, V.; BHASKAR, T. **A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass**. *Renewable Energy*. v. 129, p. 695-716, 2018.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2023**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>. Acesso em: 04 mar. 2024.

FEITOSA, Ana Caroline. **DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UM SISTEMA UTILIZANDO MEDIDORES DEPRIMOGENIOS E MICROCONTROLADOR PARA MEDIÇÃO DE VAZÃO DE BIOGÁS**. Orientador: Professor Dr. Carlos Antônio Cabral dos Santos. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, [S. l.], 2023.

FETTA, Mathewos Melore; ANCHA, Venkata Ramayya; FANTAYE, Fikadu Kifle; LEMMA, Dejene Beyene. **Experimental evaluation of biogas production from anaerobic co-digestion of cactus cladodes, cow dung, and goat manure**. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, [s. l.], 2024. DOI <https://doi.org/10.1007/s43153-024-00437-z>. Acesso em: 7 fev. 2024.

G1, GLOBO. **Produtores investem em biodigestor para reduzir conta de energia**. G1, [S. l.], p. 1-1, 3 out. 2021. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/sorocaba-jundiai/nosso-campo/noticia/2021/10/03/produtores-investem-em-biodigestor-para-reduzir-conta-de-energia.ghtml>. Acesso em: 7 jan. 2025.

GARCÍA, R.; PIZARRO, C.; LAVÍN, A. G.; BUENO, J. L. **Characterization of Spanish biomass wastes for energy use**. *Bioresource Technology.*, v. 103, n. 1, p. 249-258, 2012.

GARCILASSO, V. P.; FERRAZ JUNIOR, A. D. Nunes; SANTOS, M. M. dos; JOPPERT, C. L. **Tecnologias de produção e uso de biogás e biometano**. São Paulo: Instituto de Energia e Meio Ambiente da Universidade de São Paulo. 2018.

GRANDO, R.L., ANTUNE, A.M., de, S., FONSECA, F.V. da, SÁNCHEZ, A., BARRENA, R., FONT, X. Technology overview of biogas production in anaerobic digestion plants: a European evaluation of research and development. **Renewable Sustainable Energy Rev.** 8. 2017.

IBGE, IBGE. **Pesquisa da Pecuária Municipal**. IBGE, [S. l.], p. 1-1, 28 jan. 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9107-producao-da-pecuaria-municipal.html?edicao=37928>. Acesso em: 29 maio 2024.

IEA, International Energy Agency. **World Energy Outlook. 2023**. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>. Acesso: 15 fev. 2024.

IRENA, International Renewable Energy Agency. **Renewable Capacity Statistics 2023**. In English. Disponível em: <https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/Renewable-capacity-statistics-2023>. Acesso em: 24 fev. 2024.

KUSMIYATI, KUSMIYATI; WIJAYA, DEWA KUSUMA; HARTONO, B. J. RIDWAN; SHIDIK, GURUH FAJAR; FUDHOLI, AHMAD. **Harnessing the power of cow dung: Exploring the environmental, energy, and economic potential of biogas production in Indonesia**. 2023a. In English. Disponível em: www.sciencedirect.com/journal/results-in-engineering. Acesso em: 19 fev. 2024.

KUSMIYATI, Kusmiyati; WIJAYA, Dewa Kusuma; HARTONO, B.J Ridwan. **Advancements in Biogas Production from Cow Dung: A Review of Present and Future Innovations**. ICENIS 2023b, [s. l.], 2023. DOI <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202344804005>. Disponível em: E3S Web of Conferences. Acesso em: 9 jul. 2024.

KUNZ, A.; SULZBACH, A. **Kit Biogás Portátil: Para análise da concentração de gás metano, dióxido de carbono, amônia e gás sulfídrico em biogás**. 2007, Brasil. Número de protocolo: 012070001117 –DEDF/INPI, instituição de registro: INPI – Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Depósito: 09/10/2007.

LIRA, E. **Biodigestor anaeróbico na agricultura familiar: produção de biogás e biofertilizante a partir de resíduos pecuários e implantação de cultivo de microalgas**. UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA, 2021.

MAO, Chunlan et al. **Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion**. Renewable And Sustainable Energy Reviews, [s.l.], v. 45, p.540-555, maio 2015.

MARTINS, Jorge. **Motores de combustão interna**. Publindústria. Guimarães. 2006.

MILANEZ, A. Y.; GUIMARÃES, D. D.; MAIA, G. B. da S.; DE SOUZA, J. A. P.; LEMOS, M. L. F. **Biogás de resíduos agroindustriais: panorama e perspectivas**. BNDES Setorial. 2018.

OLIVEIRA, Davi Brito. **ESTUDO DA PRODUÇÃO DO BIOGÁS E A APLICAÇÃO DE UMA ANÁLISE EXERGONECONÔMICA PARA UM SISTEMA DE COGERAÇÃO**

USANDO BIOMETANO. Orientador: Professor Doutor Carlos Antônio Cabral dos Santos. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, [S. l.], 2023.

PIRES, João Batista; SALES, Matheus; SALES, Larissa; DOS SANTOS, Carlos Antonio; PIRES, Miriam; ERIVANDRO, João. **AVALIAÇÃO DA POLPA DE ALGODÃO COMO INSUMO ENERGÉTICO PARA A PRODUÇÃO DE BIODIESEL EM UMA UNIDADE PILOTO EM ROTA ETÍLICA.** CONEM 2024, [S. l.], p. 1-1, 31 jul. 2024.

SALES, Larissa. **ANÁLISE DA COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS E APLICAÇÃO DA ECONOMIA CIRCULAR NO MUNICÍPIO DE JOÃO PESSOA – PARAÍBA.** 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, [S. l.], 2023.

SANT'ANNA, G. L. **Tratamento Biológico de Efluentes: Fundamento e Aplicações.** Rio de Janeiro: Interciência, 424 p. 2010.

SILVA, Gisely Alves. **Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos e lodo de esgoto.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

STEMAC, STEMAC. **GERADORES.** STEMAC, [S. l.], p. 1-1, 9 jan. 2025. Disponível em: <https://www.stemac.com.br/GruposGeradoresDiesel.aspx>. Acesso em: 15 jan. 2025.

TALLOU, Anas. **Avaliação do biogás e biofertilizante produzido a partir da codigestão anaeróbia de águas residuais de moinhos de azeite com águas residuais municipais e esterco de vaca.** Tecnologia Ambiental e Inovação, v. 20, p. 101152, 2020

THIANGCHANTA, Susarit; Kwiewwijit, Runghapha; Mona, Yuttana. **Environmental impact of the biogás production from dairy cows. In English.** Disponível em: www.sciencedirect.com. Acesso em: 15 fev. 2024.

TOGAWA, TOGAWA. **Cogeração de Energia.**, 1 out. 2018. Disponível em: <https://togawaengenharia.com.br/blog/cogerao-de-energia/>. Acesso em: 29 maio 2024.

UFPEL. **Apostila de motores a combustão interna.** Disponível em: <<https://wp.ufpel.edu.br/mlaura/files/2013/01/Apostila-de-Motores-aCombust%C3%A3o-Interna.pdf>>. Acessado em 6 de dezembro de 2021.

UFGRS, INSTITUTO DE FÍSICA. **CICLO DE OTTO.** INSTITUTO DE FÍSICA, [S. l.], p. 1-1, 13 jun. 2009. Disponível em: https://www.if.ufrgs.br/~dschulz/web/ciclo_otto.htm. Acesso em: 9 abr. 2024.

VITAL, ANDREIA. **Planta da Cocal em Narandiba - SP é a vencedora no Fórum Mundial do Biogás.** Jornal da Cana, [S. l.], p. 1-1, 16 jul. 2024. Disponível em: <https://jornalcana.com.br/usinas-notas/planta-da-cocal-em-narandiba-sp-e-a-vencedora-no-forum-mundial-do-biogas/>. Acesso em: 17 dez. 2024.

WRESTA, A.; Andriani, D.; Saepudin A.; Sudibyo, H. **Economic analysis of cow manure biogas as energy source for electricity power generation in small scale ranch.** In English. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.240>. Acesso em: 22 fev. 2024.



Aluno: Matheus dos Santos Sales - 20221016609
Orientador: Prof. Dr. Carlos Antonio Cabral dos Santos
Área: Termofluidos
Nível: Mestrado

Relatório para Construção

Projeto: Protótipo de Biodigestor

1. O Projeto

Será utilizado um modelo prático próximo ao modelo canadense de biodigestor. Esse equipamento será construído na Universidade Federal da Paraíba com dimensões para estudo e modelo de análise. Sendo utilizado 3 ambientes principais:

1. **Caixa de Areia:** Onde será alimentado a princípio com esterco de vacas, nesse ambiente ocorre a decantação de pedras e areia, de modo a somente o esterco entrar no biodigestor;
2. **Biodigestor:** Ambiente onde ocorre a digestão da matéria orgânica e consequentemente a geração do gás;
3. **Esterqueira:** Neste ambiente será onde estará todo o material que já passou pelo biodigestor, tem comunicação com o biodigestor através de vaso comunicante, de modo a quantidade de material que entra será a mesma do que sai.

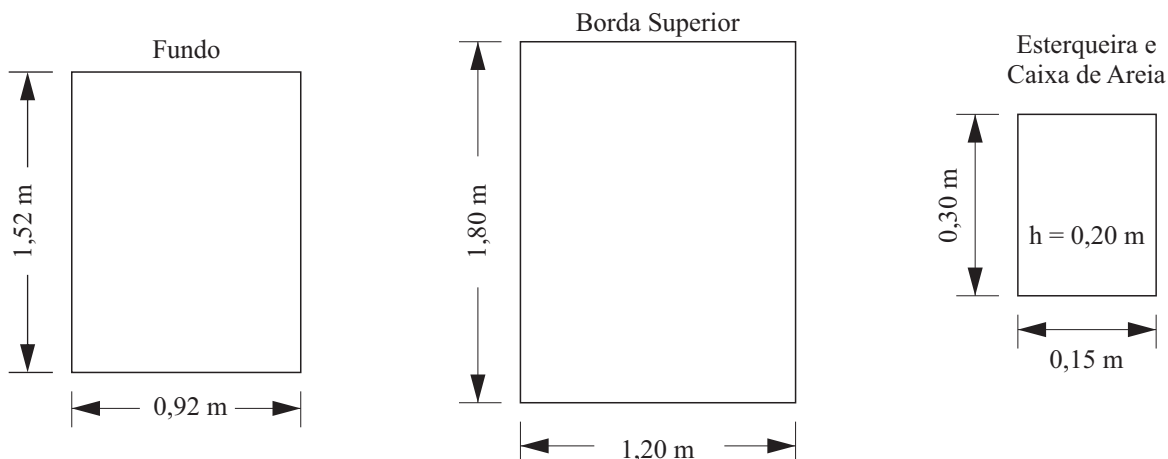
Junto ao biodigestor teremos uma lona, de modo a facilitar a construção, se utilizará uma utilizada no transporte de carga com caminhão. Sendo esta responsável por reter o biogás no biodigestor.

Somando ao sistema toda canalização necessária para alimentação e saída do biodigestor, como também para transporte do gás.

1.1 Dimensões

Volume Útil aproximado (Piscina) = $0,89 \text{ m}^3$

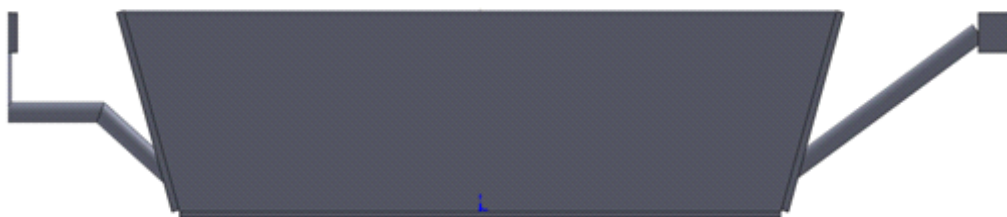
Profundidade (Piscina) = $0,5 \text{ m}$



1.1 Vistas

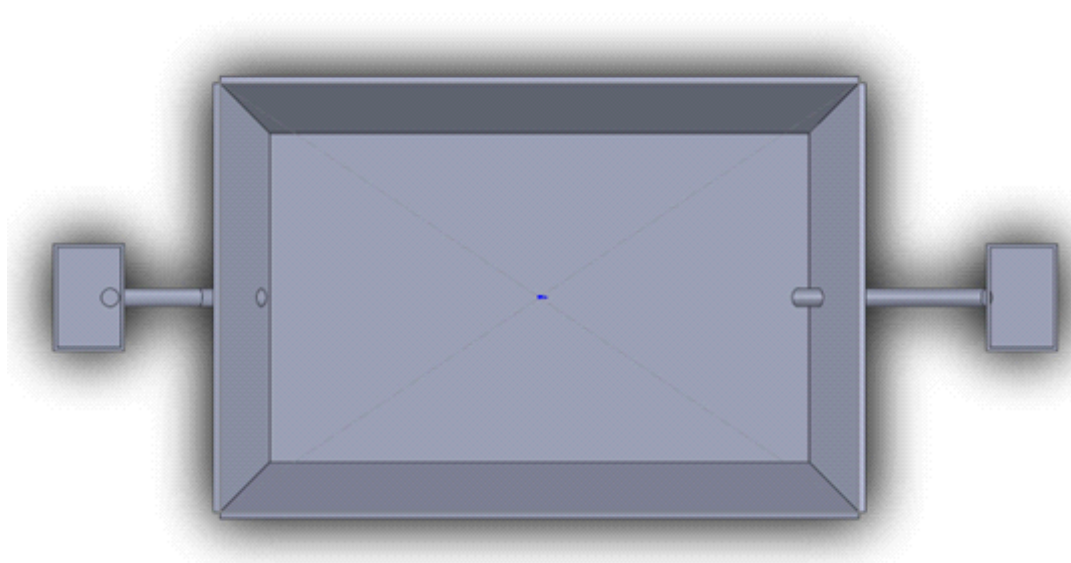
A seguir temos algumas vistas do projeto feito em SolidWorks:

Figura 1 – Vista Frontal do Sistema



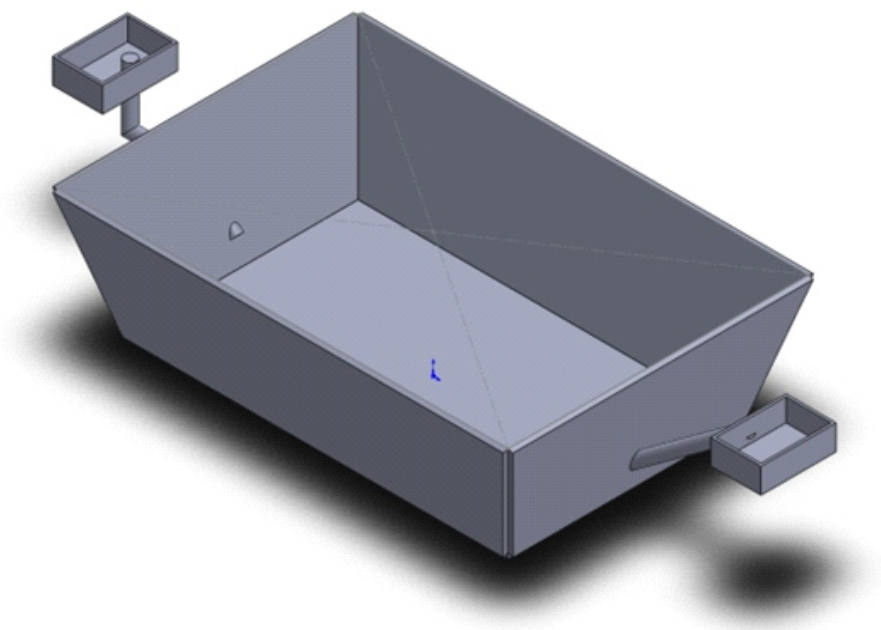
Fonte: Autor.

Figura 2 – Vista Superior do Sistema



Fonte: Autor.

Figura 3 – Vista Isométrica do Sistema



Fonte: Autor.

2. Materiais

Materiais a serem utilizados:

1. Lona para impermeabilização 7x4 m (Poliétileno);
2. Tijolos Convencionais (500 unidades) ;
3. Cimento (2 sacos);
4. Areia;
5. Água;
6. Lona de Algodão Encerrado 8x6 m;
7. Madeira (Fixar lona)
8. Canos de PVC 100mm (2 varas de 6m);
9. Cola de PVC;
10. 3 Joelhos PVC 100mm;
11. 2 Curvas PVC 100mm;
12. 3 Conexões T PVC 100mm;
13. Pregos;
14. Flange PVC.

No decorrer da construção é possível perceber a necessidade de acrescentar alguns materiais, sendo então essa lista alterada em relatório final.

3. Etapas de Construção

3.1. Demarcação e Escavação

De maneira inicial realizaremos a demarcação e isolamento da área de construção, com isto facilitamos a execução da escavação dos 3 locais (Caixa de Areia, Esterqueira e Biodigestor).

3.2. Impermeabilização do espaço do Biodigestor

Nesta etapa, após a escavação aplicaremos a lona de impermeabilização feita de polietileno de maneira a preservar o solo. Após a aplicação da lona colocaremos barro e compactaremos o solo, em seguida colocaremos uma cama de concreto magro para iniciar o assentamento dos tijolos cerâmicos.

3.3. Assentamento de Tijolos e Fixação da tubulação

Após a impermeabilização do solo se iniciará a colocação da tubulação de modo a fixar em lugares já predefinidos em projeto. Terminado esta etapa iniciamos os assentamentos de tijolos nos 3 ambientes.

3.4. Impermeabilização dos ambientes

Os 3 locais receberão técnicas de impermeabilização da construção civil, sendo realizada com a utilização de água e concreto, de modo a reter a umidade.

3.5. Aplicação das Madeiras

Nesta fase da construção serão inseridas as estruturas de madeira para iniciar a aplicação da lona, sendo esta preparada com um furo central junto a uma flange para extração do gás.

3.6. Tubulação de Extração

Será preparada toda a tubulação necessária para extração do Biogás gerado para um ambiente controlado de laboratório.

4. Cronograma de Execução

Demarcação e Escavação	Junho/2023
Impermeabilização do espaço do Biodigestor	Junho/2023
Assentamento de Tijolos e Fixação da tubulação	Junho/2023
Impermeabilização dos ambientes	Julho/2023
Aplicação das Madeiras	Julho/2023
Tubulação de Extração	Agosto/2023
Início da Utilização do Sistema	Setembro/2023

João Pessoa, 03 de maio de 2023