



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA  
CAMPUS IV – UNIDADE ACADÊMICA SOUSA  
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E AGRÁRIAS  
DEPARTAMENTO DE AGRÁRIAS E EXATAS  
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM ENERGIAS RENOVÁVEIS

**Rafael Estrela de Oliveira**

**ESTUDO DE UM BIODIGESTOR CASEIRO: ANÁLISE DE PRODUÇÃO DE  
BIOGÁS E DESAFIOS OPERACIONAIS**

Sousa – PB  
2025

Rafael Estrela de Oliveira

**ESTUDO DE UM BIODIGESTOR CASEIRO: ANÁLISE DE PRODUÇÃO DE  
BIOGÁS E DESAFIOS OPERACIONAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Curso Superior de Tecnologia em Energias Renováveis da UEPB como requisito parcial à obtenção do grau de tecnólogo em Sistemas de Energias Renováveis.

Área de Concentração: Biomassa

Orientador: Prof. Dr. João Paulo D. de Carvalho

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto em versão impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que, na reprodução, figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

O48e Oliveira, Rafael Estrela de.  
Estudo de um biodigestor caseiro: análise de produção de biogás e desafios operacionais [manuscrito] / Rafael Estrela de Oliveira. - 2025.  
54 f. : il. color.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Energias renováveis) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências Humanas e Agrárias, 2025.

"Orientação : Prof. Dr. João Paulo Dantas de Carvalho, Coordenação do Curso Superior de Tecnologia em Sistemas de Energias Renováveis - CCHA".

1. Biodigestor. 2. Biogás. 3. Biofertilizante. 4. Energia renovável. I. Título

21. ed. CDD 710.261

RAFAEL ESTRELA DE OLIVEIRA

ESTUDO DE UM BIODIGESTOR CASEIRO: ANÁLISE DE PRODUÇÃO DE  
BIOGÁS E DESAFIOS OPERACIONAIS

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Coordenação do Curso  
de Energias Renováveis da  
Universidade Estadual da Paraíba,  
como requisito parcial à obtenção do  
título de Tecnólogo em Sistemas de  
Energias Renováveis

Aprovada em: 16/05/2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado eletronicamente por:

- **João Paulo Dantas de Carvalho** (\*\*\*.185.134-\*\*), em **22/05/2025 19:00:12** com chave **2257ef1a375811f0a4fc1a7cc27eb1f9**.
- **Jose Aleksandro da Silva** (\*\*\*.034.194-\*\*), em **23/05/2025 10:05:10** com chave **8e6dc1ce37d611f0970806adb0a3afce**.
- **Paulo Abrantes de Oliveira** (\*\*\*.320.664-\*\*), em **23/05/2025 12:52:59** com chave **fffe0cd837ed11f08a5106adb0a3afce**.

Documento emitido pelo SUAP. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QrCode ao lado ou acesse [https://suap.uepb.edu.br/comum/autenticar\\_documento/](https://suap.uepb.edu.br/comum/autenticar_documento/) e informe os dados a seguir.

**Tipo de Documento:** Folha de Aprovação do Projeto Final

**Data da Emissão:** 23/05/2025

**Código de Autenticação:** 00238e



*A minha família, esposa e filhos meu amor a todos por esse momento único.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela força, saúde e sabedoria concedidas ao longo desta jornada. Sem Ele, nada disso seria possível.

A conclusão deste trabalho é resultado do apoio, incentivo e dedicação de muitas pessoas, à qual expresso minha mais profunda gratidão.

Agradeço ao meu orientador, João Paulo Dantas de Carvalho, pela orientação e pelo suporte durante todo o desenvolvimento deste projeto, cuja orientação foi fundamental para a realização deste trabalho.

À minha esposa, Marise Gomes, pelo amor, paciência e compreensão durante essa jornada acadêmica, e aos meus filhos, Annelise e Jonas, que sempre foram minha maior inspiração e fonte de energia.

À minha mãe, Fátima, e ao meu pai, Raimundo, por seu apoio incondicional e por acreditarem sempre em meu potencial. À minha irmã, Rafaela, e aos meus avós paternos, Maria Emília e José André (in memoriam), e aos maternos, Maria Domingos e Chico Nazaré (in memoriam), deixo meu carinho e reconhecimento por todo o suporte, amor e valores transmitidos.

Aos meus amigos de trabalho, Toinho, Kelly, Valdemi, Lafayette e Myriam, minha gratidão pela amizade e companheirismo. Em especial, o saudoso Salomão Gadelha, um verdadeiro pioneiro e defensor das energias renováveis. Durante sua gestão como prefeito, ele implantou o primeiro módulo fotovoltaico em Sousa, no ano de 2008, e hoje o prédio que abriga a Unidade Acadêmica de Sousa da UEPB leva seu nome.

Aos meus colegas de curso, especialmente Adilson, Thiago Silva, Alberto, Jânio, Guilherme, Beatriz, Eduarda, Lucas e outros colegas que, infelizmente, não puderam concluir essa jornada, minha gratidão pelo companheirismo, apoio e amizade ao longo de todo o percurso.

Aos docentes desta Unidade Acadêmica, representados pelo professor José Alexsandro da Silva, aos servidores, representados por Glauber, agradecemos o apoio e o compromisso com a formação de todos nós, estudantes. A todos, minha sincera gratidão. Este trabalho reflete o apoio e a influência de cada um de vocês em minha trajetória.

## RESUMO

Este estudo analisou o funcionamento de um biodigestor doméstico com capacidade de 30 litros, instalado no laboratório de biotecnologia da Unidade Academia de Sousa-PB da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB). O substrato utilizado foi uma combinação de esterco bovino, restos de alimentos e inóculo de um biodigestor já em funcionamento, com o objetivo de otimizar a eficiência da digestão anaeróbica e a produção subsequente de biogás. Ao longo do estudo, foram acompanhados parâmetros operacionais como pH, composição química do biogás e a integridade estrutural do equipamento em várias fases. A adoção de medidas técnicas, como o reforço das junções e a adição de um gasômetro, foi crucial para assegurar a segurança do sistema. O biogás apresentou concentrações de metano entre 57,5% - 87,5%, sendo classificado como de boa qualidade já que sua chama obteve a coloração azul clara. Por fim destaca a viabilidade de biodigestores de pequeno porte na produção de energia renovável e na gestão sustentável de resíduos, ressaltando sua utilidade em áreas semiáridas e sua contribuição para a sustentabilidade energética e agrícola.

**Palavras-chave:** biodigestor; biogás; biofertilizante; energia renovável.

## ABSTRACT

This study analyzed the performance of a domestic biodigester with a capacity of 30 liters, installed in the biotechnology laboratory at the Academic Unit of Sousa-PB, State University of Paraíba (UEPB). The substrate used was a combination of cattle manure, food waste, and inoculum from an operating biodigester, aiming to optimize the efficiency of anaerobic digestion and the subsequent production of biogas. Throughout the study, operational parameters such as pH, chemical composition of the biogas, and structural integrity of the equipment were monitored at various stages. The adoption of technical measures, such as reinforcing the joints and adding a gasometer, was crucial to ensure the safety of the system. The biogas showed methane concentrations ranging from 57.5% to 87.5%, being classified as high quality due to the clear blue color of its flame. Finally, the study highlights the feasibility of small-scale biodigesters for renewable energy production and sustainable waste management, emphasizing their usefulness in semi-arid regions and their contribution to energy and agricultural sustainability.

**Keywords:** biodigester; biogas; biofertilizer; renewable energy.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Vias de digestão anaeróbia para produção de biogás .....	19
Figura 02 – Biodigestor Indiano .....	27
Figura 03 – Biodigestor Canadense .....	29
Figura 04 – Biodigestor Chinês .....	30
Figura 05 – Biodigestor Caseiro .....	33
Figura 06 – Alimentando biodigestor .....	34
Figura 07 – Biodigestor alimentado .....	35
Figura 08 – Coletando inóculo .....	37
Figura 09 – Gasômetro ligado ao biodigestor.....	39
Figura 10 – Medidor de pH mPA210 .....	40
Figura 11 – Alfakit/Embrapa Kit de análise Biogás Portátil .....	41
Figura 12 – Incidente no biodigestor .....	44
Figura 13 – Gasômetro vedado .....	45
Figura 14 – Chama Biogás .....	48
Figura 15 – Chama Biogás .....	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais vantagens e desvantagens da biodigestão anaeróbia.....	15
Tabela 2 – Equivalência Energética do biogás com outras fontes .....	26
Tabela 3 – Composição do Biogás Produzido .....	46

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°C	Graus Celsius
CH <sub>4</sub>	Metano
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
H <sub>2</sub>	Hidrogênio
H <sub>2</sub> O	Água
H <sub>2</sub> S	Sulfeto de Hidrogênio
K	Potássio
Kg	Quilograma
kWh	Quilowatt hora
m <sup>3</sup>	Metro Cúbico
MJ/kg	Megajoule por Quilograma
MJ/m <sup>3</sup>	Megajoule por Metro Cúbico
ml	Mililitro
N	Nitrogênio
NH <sub>3</sub>	Amônia
P	Fosforo
pH	Potencial Hidrogeniônico
UEPB	Universidade Estadual da Paraíba

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>Geral.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2</b>	<b>Específicos.....</b>	<b>13</b>
<b>3.</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>14</b>
<b>3.1.</b>	<b>Biodigestão anaeróbica .....</b>	<b>14</b>
<b>3.2</b>	<b>As fases da biodigestão anaeróbica .....</b>	<b>15</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Hidrólise.....</b>	<b>16</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Acidogênese .....</b>	<b>16</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Acetogênese.....</b>	<b>17</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Metanogênese .....</b>	<b>18</b>
<b>3.3</b>	<b>Esterco bovino como substrato .....</b>	<b>20</b>
<b>3.4</b>	<b>Inóculo.....</b>	<b>21</b>
<b>3.6</b>	<b>Biofertilizantes (digestato).....</b>	<b>24</b>
<b>3.7</b>	<b>Equivalência energética .....</b>	<b>25</b>
<b>3.8</b>	<b>Tipos de biodigestores.....</b>	<b>26</b>
<b>3.8.1</b>	<b>Modelo Indiano .....</b>	<b>27</b>
<b>3.8.2</b>	<b>Modelo Canadense .....</b>	<b>28</b>
<b>3.8.3</b>	<b>Modelo Chinês .....</b>	<b>29</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>32</b>
<b>4.1</b>	<b>Localização e caracterização do biodigestor .....</b>	<b>32</b>
<b>4.2</b>	<b>Preparação e alimentação inicial do biodigestor.....</b>	<b>34</b>
<b>4.3</b>	<b>Adaptações estruturais do biodigestor .....</b>	<b>36</b>
<b>4.3.1</b>	<b>Adaptações iniciais.....</b>	<b>36</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Segunda adaptação .....</b>	<b>36</b>
<b>4.4</b>	<b>Nova alimentação com inóculo, substrato adequado.....</b>	<b>37</b>

4.4.1	Implementação do gasômetro para controle de pressão e armazenamentos seguro .....	38
4.5	Métodos para a coleta de informações .....	39
4.5.1	Determinação de pH .....	39
4.5.2	Teste de qualidade do biogás .....	40
4.5.3	Gasômetro.....	41
4.5.4	Teste de chama com fogareiro modificado .....	41
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>43</b>
5.1	Inicialização da adaptação, primeiro consumo e crescimento exponencial .....	43
5.2	Segunda modificação, Segundo Consumo e conexão com gasômetro.....	44
5.3	Características do biogás e nível de pH .....	46
5.4	Avaliação da chama .....	48
5.5	Potenciais problemas .....	49
6	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>51</b>
6.1	Sugestões finais.....	51
7	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>53</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O cenário brasileiro encontra-se marcado por desafios socioeconômicos e ambientais, todos estão à busca de soluções inovadoras. O emprego de tecnologias como biodigestão anaeróbica é uma alternativa promissora, não apenas de gerar energia renovável, mas de promover o desenvolvimento local e a gestão ambiental (CIBIOGÁS, 2020 e DIACONIA 2020). A utilização de biodigestores para o processamento de resíduos orgânicos é considerada uma alternativa eficiente para gestão de resíduos e geração de energia. No Brasil, principalmente em áreas rurais esta se tornando cada vez mais relevante, o qual é gerado pela decomposição de materiais orgânicos sem a presença de oxigênio, constituindo uma fonte significativa de energia para regiões rurais (XAVIER; LUCAS, 2010 e DEGANUTTI et al., 2002).

Além disso, segundo SANTOS e SILVA (2020), destacam-se os benefícios dos biodigestores na redução de custos energéticos para famílias de baixa renda. A introdução eficaz dessas tecnologias não se limita apenas à produção de energia, mas abrange também os aspectos socioeconômicos e ambientais, integrando assim ao cotidiano das comunidades. Projetos educativos e de capacitação, conforme evidenciado por CUNHA e LIMA (2021), têm demonstrado que a implementação bem-sucedida de biodigestores não se resume apenas à tecnologia, mas à inclusão da comunidade no processo. Essa abordagem participativa não apenas assegura a eficácia técnica, mas também promove a autonomia local.

No sertão do Brasil, os biodigestores se configuram como uma alternativa viável e econômica para a geração de biogás e biofertilizante. A adoção de inovações como o Biodigestor “Sertanejo” favorece o progresso sustentável da localidade, auxiliando na redução dos impactos do desmatamento e das alterações climáticas (DIACONIA, 2020).

Os biodigestores têm uma função essencial na redução dos impactos ambientais, especialmente no enfrentamento do desmatamento e das alterações climáticas. Ao substituir a lenha e o carvão vegetal pelo biogás, diminui-se a pressão sobre as florestas, favorecendo a preservação dos ecossistemas naturais (DIACONIA, 2020). Ademais, a biodigestão anaeróbica capta e utiliza o metano ( $\text{CH}_4$ ), um gás com elevado potencial de aquecimento global, evitando sua liberação na atmosfera. Esse método não só diminui as emissões de gases que causam o efeito estufa, mas também incentiva o uso eficiente de resíduos orgânicos,

reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e fertilizantes químicos, tornando-se uma opção sustentável para a geração de energia renovável e o manejo ambiental adequado.

O biogás é um produto gerado por meio da biodigestão anaeróbica, por intermédio microbiológico que ocorre em sistemas de biodigestão, onde microrganismos decompõem matéria orgânica na ausência de oxigênio. A sua composição pode variar conforme o tipo de material utilizado, geralmente consistindo em média de 50 a 75% de metano ( $\text{CH}_4$ ) e 25 a 45% de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), além de pequenas proporções de hidrogênio ( $\text{H}_2$ ), sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ) e outros gases em menor quantidade (CIBIOGÁS, 2020). O metano, sendo o principal elemento do biogás, proporciona um alto poder calorífico, permitindo que seja utilizado como uma fonte renovável de energia para cozinhar, aquecer e gerar eletricidade. Assim, os biodigestores têm um papel crucial na transformação de resíduos orgânicos em energia limpa, favorecendo a sustentabilidade energética e ambiental (XAVIER e LUCAS, 2010).

A região semiárida do Brasil necessita de inovações tecnológicas que favoreçam a utilização sustentável dos recursos naturais e a produção de energia renovável. O biodigestor caseiro se apresenta como uma opção viável para comunidades rurais que têm dificuldades no acesso a energia (DIACONIA, 2020 e CIBIOGÁS, 2020).

O metano resultante da biodigestão anaeróbica pode ser uma opção eficaz para enfrentar as dificuldades na obtenção de combustíveis convencionais, como o gás liquefeito de petróleo (GLP) e a lenha, especialmente em áreas rurais e comunidades remotas. O biogás gerado, que contém uma alta concentração de metano ( $\text{CH}_4$ ), pode ser empregado para cozinhar, aquecer ambientes e até produzir energia elétrica, diminuindo a dependência de combustíveis fósseis e reduzindo os impactos no meio ambiente.

Por fim este estudo visa o funcionamento de um biodigestor de uso doméstico situado na Unidade Acadêmica de Sousa da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB, com a finalidade de avaliar a eficácia do sistema na geração de biogás e reconhecer os principais aspectos que afetam a atividade dos microrganismos em cada etapa da digestão anaeróbica. Além disso, a pesquisa abordou os desafios operacionais associados ao manejo do biodigestor, tais como a manutenção do pH ideal e a prevenção de vazamentos, que impactam diretamente tanto a geração de biogás quanto a segurança do sistema, juntamente com a

observação de parâmetros fundamentais, como pH e temperatura, o qual são objetivos deste trabalho.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Geral**

Examinar a operação e a eficácia de um biodigestor caseiro com capacidade de 30 litros.

### **2.2 Específicos**

- Analisar as variações do pH na digestão anaeróbica.
- Determinar as concentrações dos gases: Metano, Amônia, Sulfeto de hidrogênio e Dióxido de carbono.
- Identificar e solucionar problemas operacionais.
- Avaliar a produção e a qualidade do biogás ao longo do estudo, por intermédio de medições periódicas.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1. Biodigestão anaeróbica

Biodigestão anaeróbica representa um método bioquímico que degrada matéria orgânica sem a presença de oxigênio, produzindo biogás, uma combinação de metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) em sua maioria, além de outros gases, de um efluente líquido rico em nutrientes, chamado digestato. Esse procedimento é realizado por bactérias ou arqueas anaeróbicas que quebram resíduos orgânicos, convertendo-os em energia e em insumos que podem ser aproveitados na agricultura, o que promove a sustentabilidade ambiental e a geração de energia renovável (XAVIER e LUCAS, 2010).

Esse fenômeno acontece de forma espontânea em locais com acúmulo de matéria orgânica e baixa presença de oxigênio, como em pântanos, lodos de esgoto e instalações desenvolvidas para a biodigestão, como os biodigestores. Nos ambientes controlados, a biodigestão é aprimorada para aumentar a geração de biogás rico em metano e a utilização de subprodutos, o que representa uma alternativa sustentável ao gerenciamento de resíduos em áreas urbanas e rurais (ALMEIDA, 2020).

A biodigestão anaeróbica apresenta diversos benefícios técnicos, ambientais e econômicos, sendo uma alternativa promissora para o tratamento de resíduos orgânicos e produção de energia renovável. No entanto, o processo também possui limitações operacionais que devem ser consideradas no planejamento e na implementação de sistemas biodigestores. A **Tabela 1** a seguir sintetiza as principais vantagens e desvantagens associadas à biodigestão anaeróbica.

Tabela 1 – Principais vantagens e desvantagens da biodigestão anaeróbia.

VANTAGENS	DESVANTAGENS
Baixa produção de sólidos;	A partida do processo pode ser lenta na ausência de um inóculo apropriado;
Baixo consumo de energia;	Formas de pré-tratamento dos resíduos são comumente necessária;
Baixa demanda de área;	Possibilidade de geração de maus odores;
Aplicabilidade em pequena e grande escala;	Elevada demanda química de oxigênio (DQO);
Tolerância a elevadas cargas orgânicas;	Remoção de nutrientes (nitrogênio e fosforo)
Produção de metano (CH <sub>4</sub> )	e patógenos insatisfatória.

Fonte: Adaptado de Chernicharo (2007) e Kunz et al. (2014).

Biodigestores têm um impacto importante na produção de uma energia renovável que pode substituir os combustíveis fósseis e ajudar na diminuição das emissões de gases que provocam o efeito estufa. A quantidade e a composição do biogás, em particular a concentração de metano, podem diferir dependendo da natureza do resíduo e das condições de pH e temperatura, e o manejo do biodigestor (DIACONIA, 2020; UDDIN; WRIGHT, 2022).

### 3.2 As fases da biodigestão anaeróbica

A biodigestão anaeróbica se desenvolve em quatro etapas que se inter-relacionam: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Ao contrário de um processo linear, essas fases ocorrem de forma simultânea no biodigestor, com diferentes grupos de microrganismos colaborando para a decomposição da matéria orgânica e a produção de biogás (CIBIOGÁS, 2020).

Essa harmonia dinâmica é fundamental para a eficácia do sistema, uma vez que o resultado de uma etapa atua como insumo para a próxima. Qualquer modificação no pH, na temperatura ou na composição do substrato pode prejudicar o desempenho da digestão anaeróbica, ocasionando uma diminuição na geração de biogás ou o acúmulo de intermediários metabólicos que podem inibir o processo (XAVIER e LUCAS, 2010).

Assim, entender que as quatro etapas acontecem ao mesmo tempo possibilita aprimorar o funcionamento do biodigestor, assegurando condições ideais para a ação dos

microrganismos participantes e aumentando a eficácia na transformação da matéria orgânica em energia renovável (DEGANUTTI et al. 2002).

### 3.2.1 Hidrólise

A hidrólise representa a etapa inicial da biodigestão anaeróbica, durante a qual macromoléculas contidas na matéria orgânica, como carboidratos, proteínas e gorduras, são decompostas em estruturas menores. Nesta fase de hidrólise, as bactérias hidrolíticas decompõem macromoléculas orgânicas, em compostos menores, como açúcares, aminoácidos e ácidos graxos. Segundo DEGANUTTI et al. (2002), essas bactérias como os do Gêneros: *Clostridium e Bacteroides* secretam enzimas extracelulares (amilases, proteases e lipases) que catalisam a quebra das moléculas complexas, facilitando o acesso aos nutrientes necessários para os próximos processos.

A hidrólise desempenha um papel crucial no processo de digestão anaeróbica ao converter substâncias complexas e insolúveis, como carboidratos, lipídios e proteínas, em compostos menores e solúveis, como açúcares simples, ácidos graxos e aminoácidos. Essa conversão facilita o aproveitamento desses compostos nas etapas seguintes do processo, especialmente na acidogênese e acetogênese. Frequentemente, a hidrólise é considerada a fase mais lenta da biodigestão, pois sua eficácia depende da natureza química do substrato e de variáveis ambientais como a temperatura e o pH no interior do biodigestor.

Do ponto de vista bioquímico, essa etapa envolve a biotransformação de moléculas poliméricas por meio da adição de grupos polares como hidroxila ( $-OH$ ), carbonila ( $C=O$ ) e amino ( $-NH_2$ ), que tornam as macromoléculas mais hidrossolúveis e acessíveis às enzimas hidrolíticas. No caso de resíduos vegetais, por exemplo, a presença de celulose, hemicelulose e lignina representa um desafio à degradação, pois são compostos de alta complexidade estrutural e baixa solubilidade. Nessas situações, a eficiência da hidrólise depende de condições ótimas de temperatura (mesofílica ou termofílica) e de um pH ligeiramente ácido (em torno de 6,0), que favorecem a ação das enzimas excretadas pelas bactérias hidrolíticas (ALMEIDA, 2020).

### 3.2.2 Acidogênese

Na acidogênese, os compostos formados na hidrólise são fermentados por bactérias acidogênicas, produzindo ácidos voláteis (como ácido acético), além de outros subprodutos,

como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) e amônia ( $\text{NH}_3$ ). Essa etapa é exotérmica, ou seja, libera energia, e gera intermediários que serão processados nas fases seguintes (UDDIN; WRIGHT, 2022).

As bactérias acidogênicas desempenham um papel fundamental na transformação dos produtos resultantes da hidrólise em ácidos orgânicos, álcool, hidrogênio e dióxido de carbono. Entre as mais relevantes, destacam-se *Clostridium spp.* e *Bacteroides spp.*, que fermentam carboidratos e proteínas, produzindo ácidos como o acético e o butírico (XAVIER; e LUCAS, 2010; SILVEIRA, 2017). *Fusobacterium spp.* e *Enterococcus spp.* também têm um papel na acidificação do ambiente, o que favorece as etapas subsequentes da digestão anaeróbica (DEGANUTTI et al. 2002). A interação dessas bactérias é crucial para a eficácia do biodigestor e a geração de biogás (MARCHI et al. 2014).

A acidogênese também leva à formação de álcoois e outros ácidos orgânicos, que contribuem para a redução do pH no sistema, podendo impactar a eficiência do processo. É importante que o sistema mantenha um pH controlado, pois a acidificação excessiva pode inibir as bactérias responsáveis pelas próximas fases. A acidogênese cria condições favoráveis para a acetogênese, uma vez que gera compostos mais simples que serão convertidos em acetato na próxima fase (ANAEROBIC DIGESTION, 2023).

### 3.2.3 Acetogênese

Na acetogênese, os compostos gerados na acidogênese, como ácidos graxos de cadeia curta e álcoois, são convertidos pelas bactérias acetogênicas em acetato, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e hidrogênio ( $\text{H}_2$ ). Essa transformação ocorre por meio da oxidação de compostos orgânicos e sua conversão em piruvato, que atua como intermediário metabólico. A partir do piruvato, são gerados acetato e  $\text{CO}_2$ , com liberação de elétrons que reduzem coenzimas, levando à produção de  $\text{H}_2$  (XAVIER; LUCAS, 2010).

Esse processo é de grande importância porque o acetato é o principal precursor do metano na fase de metanogênese, representando cerca de 70% do metano produzido em sistemas anaeróbicos (CIBIOGÁS, 2020). No entanto, a acumulação de hidrogênio no meio pode inibir a atividade das bactérias acetogênicas, pois o excesso de  $\text{H}_2$  aumenta o potencial redox do sistema e bloqueia a transferência eficiente de elétrons, prejudicando a continuidade da conversão de substratos (DIACONIA, 2020).

Bactérias dos gêneros *Syntrophobacter* e *Syntrophomonas* desempenham papel crucial nesta fase, trabalhando em cooperação com arqueas metanogênicas que consomem o hidrogênio (MARCHI et al. 2014).

Para garantir a eficácia da acetogênese, é fundamental que o hidrogênio seja continuamente utilizado por outros microrganismos, notadamente pelas arqueas metanogênicas na etapa subsequente. A acetogênese desempenha um papel vital na qualidade do biogás, já que converte subprodutos em acetato e reduz a presença de compostos que poderiam afetar negativamente a eficiência do sistema (XAVIER e LUCAS, 2010; DEGANUTTI et al. 2002; CIBIOGÁS, 2020)..

### 3.2.4 Metanogênese

A metanogênese representa a etapa final e crucial do processo de biodigestão anaeróbica, sendo conduzida exclusivamente por arqueas metanogênicas. Nessa fase, ocorre a transformação do acetato ou da combinação de hidrogênio molecular ( $H_2$ ) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ) em metano ( $CH_4$ ). Esse processo é viabilizado por reações de oxirredução, nas quais coenzimas como o NADH (nicotinamida adenina dinucleotídeo reduzido) são oxidadas a  $NAD^+$ , liberando elétrons que são utilizados na redução do  $CO_2$  ou do grupo metila do acetato, resultando na formação de metano e água (XAVIER; LUCAS, 2010; UDDIN; WRIGHT, 2022).

As arqueas metanogênicas são classificadas principalmente em dois grupos: Acetoclásticas, que convertem acetato em metano e  $CO_2$  e Hidrogenotróficas, que utilizam  $H_2$  como doador de elétrons e  $CO_2$  como aceptor terminal, formando metano e água.

As arqueas metanogênicas convertem ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono em metano e água, formando o biogás. Essas arqueas são extremamente sensíveis a variações de pH e temperatura, e seu desempenho determina diretamente a quantidade e a qualidade do biogás produzido. Segundo CIBIOGÁS (2020), as arqueas dos gêneros *Methanobacterium*, *Methanosarcina* e *Methanosaeta* são as principais responsáveis pela metanogênese.

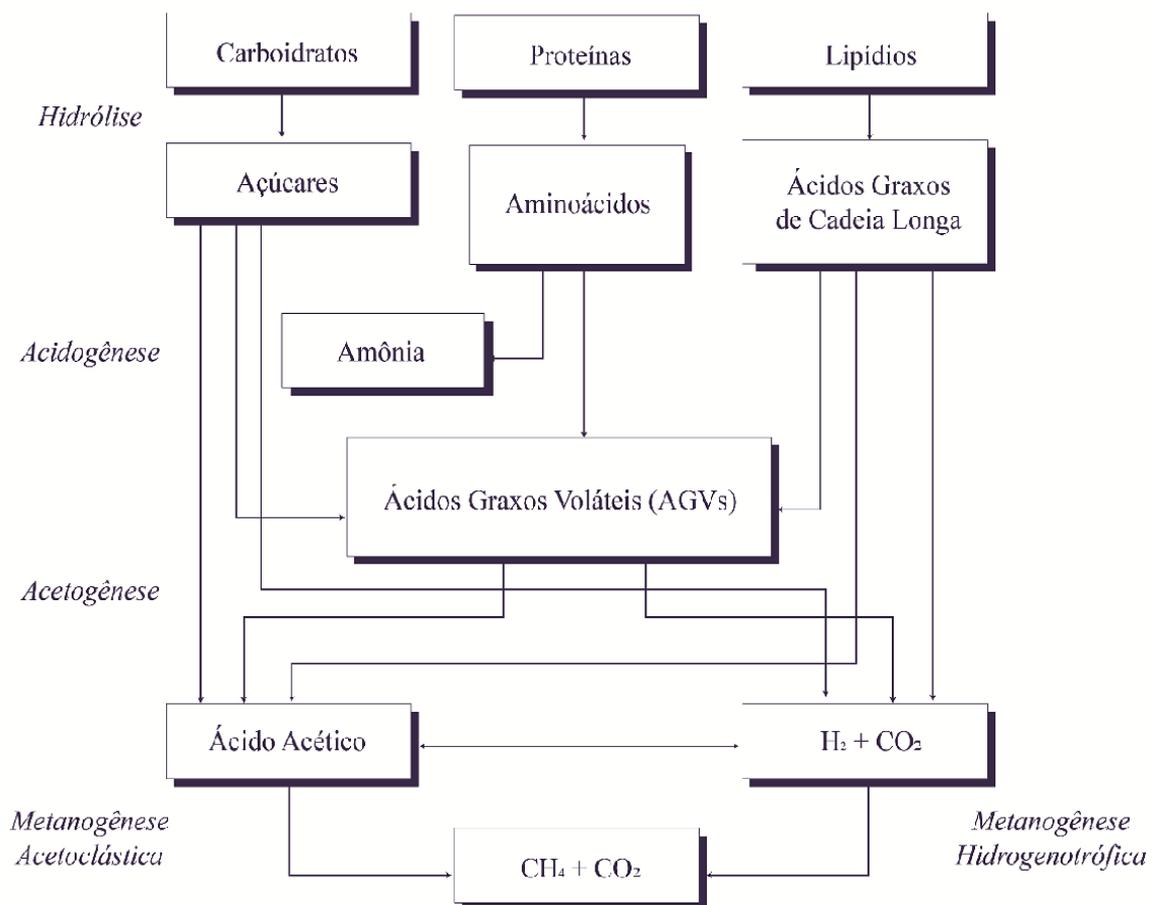
*Methanobacterium*, *Methanosarcina* e *Methanosaeta* atuam como arqueas metanogênicas, convertendo os produtos finais em metano, principal componente do biogás (CIBIOGÁS, 2020).

A metanogênese exige um pH que fique entre 6,5 e 7,5, além de temperaturas que podem oscilar entre mesofílicas (aproximadamente 35°C) e termofílicas (cerca de 55°C), conforme as condições de operação do biodigestor. A eficácia dessa etapa é crucial para otimizar o potencial energético do biogás. O monitoramento cuidadoso do ambiente nessa fase é imprescindível, pois as arqueas metanogênicas são mais sensíveis a variações de pH e temperatura do que as das fases anteriores (ANAEROBIC DIGESTION, 2023).

As quatro etapas atuam em conjunto, conforme figura 01, para digerir totalmente a matéria orgânica e otimizar a geração de biogás. Cada uma dessas fases está interligada e afeta tanto a eficácia quanto a estabilidade do sistema de biodigestão anaeróbica de maneira geral, sendo o controle do ambiente essencial para a produção contínua e otimizada de energia renovável a partir de resíduos orgânicos (DIACONIA, 2020; ALMEIDA, 2020).

A Figura 1 apresenta uma visão geral do processo de degradação de matéria orgânica durante as etapas da biodigestão anaeróbia.

Figura 01 – Vias de digestão anaeróbia para produção de biogás.



Fonte: Adaptado de Rabii et al. (2019).

### 3.3 Esterco bovino como substrato

A utilização de esterco bovino como base para biodigestores oferece diversos benefícios, destacando-se como um dos recursos mais comuns para a produção de biogás, graças à sua composição balanceada e à presença natural de microrganismos anaeróbicos. Esses microrganismos funcionam como inoculantes, acelerando o processo de digestão e promovendo a estabilização do sistema, o que torna mais fácil a transformação de matéria orgânica em biogás. O esterco bovino contém quantidades equilibradas de carboidratos, proteínas e lipídios, além de fibras vegetais, o que contribui para um processo de digestão mais estável e eficiente (XAVIER e LUCAS, 2010).

Sob a perspectiva operacional, o uso de esterco bovino contribui para a preservação de um pH adequado, que é perfeito para o funcionamento das arqueas metanogênicas. Esse equilíbrio natural reduz a necessidade de correções frequentes do pH, o que se torna especialmente benéfico em biodigestores de pequeno a médio porte, onde o gerenciamento das condições pode ser mais desafiador. O pH adequado permite que as diferentes fases da biodigestão (hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese) ocorram de maneira integrada, o que otimiza a produção de biogás (ALMEIDA, 2020).

Um benefício adicional é a quantidade de fibra contida no estrume bovino, que auxilia na regulação da liberação de vitaminas voláteis. Esses ácidos são gerados nas etapas iniciais da digestão e, em níveis elevados, podem reduzir a atividade das arqueas metanogênicas. As fibras são como uma espécie de “amortecedor”, permitindo que a liberação de ácidos graxos seja gradual e constante, o que mantém a produção de metano estável e aumenta a eficiência do biodigestor (SILVEIRA, 2017).

Além das vantagens do processo de biodigestão, o esterco bovino produz um digestato de excelente qualidade, que pode ser empregado como biofertilizante. Esse subproduto é abundante em nutrientes importantes, como nitrogênio, fósforo e potássio, além de conter micronutrientes que favorecem a saúde do solo, tornando-se, assim, um insumo extremamente valioso para o setor agrícola. O uso do digestato reduz a dependência de fertilizantes químicos, promovendo a sustentabilidade agrícola e fechando o ciclo de nutrientes na produção rural (CIBIOGÁS, 2020).

O esterco de bovinos é facilmente encontrado em regiões rurais, o que o transforma em uma opção de substrato econômica e acessível, especialmente em fazendas que trabalham com gado. Sua abundância e eficácia como fertilizante fazem do esterco bovino uma alternativa viável e sustentável para biodigestores, sendo particularmente apropriado para áreas rurais e pequenas propriedades que desejam tanto produzir energia renovável quanto fertilizantes orgânicos. Além disso, a utilização do esterco como substrato contribui para a redução de emissões de gases de efeito estufa associada ao descarte de resíduos em ambientes abertos, promovendo a sustentabilidade ambiental e o desenvolvimento de uma economia circular (KOCH et al. 2015).

### **3.4 Inóculo**

O inóculo é útil para a biodigestão anaeróbica, uma vez que fornece uma população inicial de microrganismos que são essenciais para iniciar e manter a decomposição da matéria orgânica em um biodigestor. A introdução de inóculo promove uma colonização mais rápida do sistema por bactérias acidogênicas e metanogênicas, que são indispensáveis para transformar matéria orgânica em biogás. O inóculo é fundamental para reduzir o período de estabilização do biodigestor, especialmente nos primeiros ciclos de operação, e para aumentar a eficiência da produção de biogás em longo prazo (ALMEIDA, 2020).

São uma porção do material digerido em biodigestores em funcionamento, onde os inóculos mais frequentes incluem dejetos de animais, como esterco bovino e de suínos, materiais de biodigestores em funcionamento e lodo gerado por estações de tratamento de esgoto. Estes materiais contêm grandes populações de microrganismos anaeróbicos, como bactérias ou arqueas hidrolíticas, acidogênicas, acetogênicas e metanogênicas, que colaboram para as diferentes etapas do processo de biodigestão (MARCHI et al. 2014). A existência dessas comunidades microbianas desenvolvidas no inóculo facilita que o sistema alcance um equilíbrio microbiológico de forma mais ágil, além de potencializar a geração de metano.

Além de promover a aceleração do processo de biodigestão, o inóculo desempenha um papel crucial na manutenção do pH em níveis adequados, normalmente variando entre 6,5 e 7,5. A adição de microrganismos específicos facilita a metabolização dos ácidos graxos voláteis que se acumulam nas etapas iniciais de hidrólise e acidogênese, que poderiam acidificar o meio e inibir as arqueas metanogênicas responsáveis pela produção de metano (XAVIER e LUCAS, 2010). Essa estabilidade do pH é especialmente importante em

biodigestores de operação contínua, onde o equilíbrio entre a geração de ácidos e a metanogênese precisa ser constante.

A dosagem sugerida de inóculo varia conforme o tamanho e a categoria do biodigestor, assim como o tipo de substrato empregado. Geralmente, uma proporção entre 10% e 20% do inóculo em relação ao volume total do biodigestor é vista como apropriada para dar início ao processo. Contudo, essa proporção pode variar conforme as condições de operação e o tipo de resíduo a ser tratado (CIBIOGÁS, 2020). Substratos que são mais elaborados e de decomposição desafiadora, como os resíduos vegetais com alto teor de lignina, podem necessitar de um volume maior de inóculo ou de um tempo de adaptação prolongado para assegurar a eficácia do processo de digestão anaeróbica.

A adição de inóculo é particularmente vantajosa em sistemas que recebem resíduos frescos ou de forma irregular, pois assegura que uma população ativa de microrganismos esteja constantemente disponível para metabolizar a matéria orgânica. Nos biodigestores de pequeno porte, especialmente em áreas rurais, incorporar inóculo em cada ciclo ou carga de resíduos contribui para a estabilidade do processo e potencializa a geração de biogás (CIBIOGÁS, 2020).

### **3.5 Biogás**

O biogás é o resultado primário da biodigestão anaeróbica e é formado, em sua maior parte, por metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Além desses, estão presentes em quantidades menores outros gases, como sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ) e vapor d'água. O metano é o componente que proporciona ao biogás seu potencial energético, possibilitando sua utilização como combustível para a produção de calor, eletricidade e, inclusive, para o abastecimento de veículos., após tratamento para remoção de impurezas (DIACONIA, 2020).

A fórmula do biogás pode mudar conforme o tipo de material inicial empregado e as condições de operação do biodigestor, incluindo fatores como pH e temperatura. A quantidade de metano presente no biogás é um dos principais parâmetros que indicam sua qualidade energética; quanto mais elevada for a concentração de metano, maior será a eficiência do biogás na geração de energia. Para alcançar alta eficiência, o processo de biodigestão deve ser cuidadosamente monitorado e ajustado para otimizar a produção de

metano e reduzir os gases indesejados, como o  $\text{H}_2\text{S}$ , que pode corroer equipamentos (ALMEIDA, 2020; ANAEROBIC DIGESTION, 2023).

- Metano ( $\text{CH}_4$ ): entre 50% e 70% – é o componente que confere ao biogás seu poder energético e calorífico.
- Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ): entre 30% e 40% – um gás não reativo que reduz o potencial energético do biogás e costuma ser eliminado em etapas de purificação.
- Sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ): menos de 1% – um produto corrosivo que, em níveis elevados, necessita ser eliminado para prevenir prejuízos a maquinários.
- A presença de vapor de água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) e amônia ( $\text{NH}_3$ ) em quantidades reduzidas influencia a qualidade do gás, sendo eliminados durante as etapas de purificação e compressão.

O metano constitui a principal parte do biogás, conferindo a este gás seu valor energético. Ele pode ser utilizado para várias aplicações, como a produção de eletricidade, aquecimento e combustível para veículos, depois de passar por processos de purificação e compressão. O biogás se apresenta como uma opção renovável aos combustíveis fósseis e oferece diversos benefícios ambientais. Por ser gerado a partir de resíduos orgânicos, o biogás possibilita o reaproveitamento de detritos de origem animal, vegetal e até industrial, que, de outra forma, poderiam ser descartados, poderiam contribuir para o acúmulo de lixo e para a emissão de gases de efeito estufa em aterros sanitários (ALMEIDA, 2020; ANAEROBIC DIGESTION, 2023).

Entretanto, para que o biogás tenha o melhor rendimento em  $\text{CH}_4$  e qualidade energética, é necessário submetê-lo a um processo de purificação, especialmente em usos delicados, como combustível para automóveis ou na injeção em sistemas de gás. Esse processo de purificação envolve a eliminação de substâncias como  $\text{H}_2\text{S}$  e  $\text{CO}_2$ , o que eleva a concentração de metano no gás. Existem várias técnicas de purificação disponíveis, incluindo a absorção em água ou aminas, a adsorção utilizando carvão ativado e a aplicação de membranas semipermeáveis, cada um adequado para contextos específicos (UDDIN e WRIGHT, 2022).

Os impactos positivos do biogás, tanto para o meio ambiente quanto para a economia, são significativos. Ele ajuda a diminuir as emissões de gases que causam o efeito estufa, oferece uma alternativa eficaz para a gestão de resíduos e reduz a dependência de

combustíveis fósseis, favorecendo práticas sustentáveis e a economia circular. Em regiões rurais, o biogás pode resultar em economia ao substituir combustíveis como o gás liquefeito de petróleo (GLP) e a energia elétrica, promovendo a autonomia das comunidades. Ademais, o emprego do digestato como um biofertilizante proporciona redução nos custos de produção agrícola e melhora a qualidade do solo, aumentando a retenção de umidade, a atividade microbiológica e a disponibilidade de nutrientes. Assim, o biogás se estabelece como uma opção sustentável para a produção de energia e a valorização de resíduos, trazendo benefícios sociais, econômicos e ambientais significativos (DIACONIA, 2020; ANAEROBIC DIGESTION, 2023).

### **3.6 Biofertilizantes (digestato)**

O biofertilizante, frequentemente chamado de digestato, é um dos resultados do processo de biodigestão anaeróbica e possui um alto potencial para a agricultura. Durante a decomposição de materiais orgânicos em biodigestores, além da produção de biogás, é gerado um resíduo líquido inodoro, que contém nutrientes importantes para o desenvolvimento vegetal, incluindo nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), além de micronutrientes como cálcio, magnésio e enxofre. Esses elementos tornam o digestato um fertilizante natural e sustentável, capaz de substituir, em diversas aplicações, os fertilizantes químicos convencionais, que geralmente possuem elevado custo (ALMEIDA, 2020).

A aplicação de biofertilizantes desempenha um papel essencial na promoção de uma agricultura sustentável, ajudando a completar o ciclo de nutrientes. Isso implica que os nutrientes extraídos do solo durante a produção agrícola são reintegrados ao sistema por meio do digestato, o que ajuda a preservar a fertilidade e a saúde do solo. Ademais, o biofertilizante influencia positivamente as características físico-químicas do solo, aumentando sua capacidade de retenção de água, aprimorando a estrutura e a porosidade, e estimulando a atividade microbiológica benéfica. Esses aspectos não só favorecem o crescimento saudável das plantas, como também contribuem para a proteção do solo contra a erosão e a degradação, promovendo sua conservação a longo prazo (XAVIER e LUCAS, 2010).

Uma vantagem do digestato em relação aos fertilizantes químicos é sua liberação lenta de nutrientes, o que garante uma alimentação contínua para as plantas e diminui a probabilidade de contaminação do solo e das fontes de água. Sendo biologicamente estável, o biofertilizante se decompõe de maneira gradual, possibilitando que os nutrientes sejam

liberados ao longo do tempo, evitando perdas excessivas por lixiviação, especialmente em solos arenosos e em áreas com alta pluviosidade. Essa propriedade torna o digestato um recurso particularmente benéfico em regiões que demandam um manejo cuidadoso da fertilidade do solo, como ocorre no semiárido brasileiro, onde a retenção de nutrientes é essencial para a viabilidade agrícola (DIACONIA, 2020).

Além das vantagens para o meio ambiente, a utilização de biofertilizantes oferece também benefícios econômicos importantes, uma vez que diminui os gastos com insumos agrícolas ao substituir fertilizantes químicos.

A utilização do digestato como biofertilizantes promove a economia circular, na qual os resíduos são convertidos em insumos valiosos, estabelecendo um ciclo sustentável de produção e utilização de nutrientes. Diante da crescente preocupação com os problemas ambientais, a adoção de biofertilizante tem sido amplamente promovida por sua contribuição para a proteção dos recursos naturais e a redução dos impactos ambientais das práticas agrícolas. Dessa forma, o digestato se apresenta como uma solução viável para o gerenciamento sustentável de resíduos e uma escolha ecologicamente correta para o aumento da eficiência na agricultura (CIBIOGÁS, 2020).

### **3.7 Equivalência energética**

O metano é o componente principal que confere ao biogás seu potencial energético, o que o torna uma opção viável para substituir combustíveis fósseis em várias aplicações, incluindo a produção de calor, eletricidade e combustível para veículos. Concentração de metano no biogás pode variar entre 50% e 70% e resultam em uma capacidade calorífica que permite a comparação com outras fontes energéticas (XAVIER e LUCAS, 2010).

A comparação do biogás com outros tipos de combustíveis energéticos facilita a análise de sua viabilidade para diversas aplicações, especialmente em áreas com grande disponibilidade de resíduos orgânicos e demanda por soluções energéticas sustentáveis e econômicas. Embora o biogás tenha um poder calorífico inferior ao do gás natural, gasolina e gás liquefeito de petróleo (GLP), ele pode ser uma alternativa vantajosa do ponto de vista econômico e ambiental, especialmente quando produzido localmente a partir de resíduos orgânicos disponíveis. Para compreender de maneira mais aprofundada o potencial energético do biogás, analisa-se medida do poder calorífico, que determina a energia liberada ao se

queimar uma determinada unidade de volume ou massa. O biogás, que apresenta uma concentração de metano em torno de 60%, tem um poder calorífico em torno de 22 MJ/m<sup>3</sup>. Em comparação, o gás natural possui cerca de 35 MJ/m<sup>3</sup>, enquanto a gasolina apresenta aproximadamente 44 MJ/kg (CIBIOGÁS, 2020). A seguir, serão mostradas algumas equivalências práticas do biogás em relação a diferentes combustíveis:

A tabela 2 a seguir apresenta as equivalências energéticas do biogás com outras fontes de energia, considerando uma concentração média de 60% de metano:

Tabela 2 – Equivalência Energética do biogás com outras fontes.

<b>Combustível</b>	<b>Poder Calorífico (MJ)</b>	<b>Equivalência com 1 m<sup>3</sup> de Biogás (60% CH<sub>4</sub>)</b>
Gás Natural	35 MJ/m <sup>3</sup>	1 m <sup>3</sup> de GN ≈ 1,6 m <sup>3</sup> de biogás
Gasolina	44 MJ/kg	1 litro de gasolina ≈ 1,7 m <sup>3</sup> de biogás
Gás Liquefeito de Petróleo (GLP)	46 MJ/kg	1 kg de GLP ≈ 2 m <sup>3</sup> de biogás
Eletricidade (geração)	3,6 MJ/kWh	1 kWh ≈ 0,7 m <sup>3</sup> de biogás

Fonte: Adaptado de Xavier e Lucas (2010), CIBIOGÁS (2020) e Silveira (2017)

As análises mostram que, embora o biogás possua um poder calorífico inferior ao do gás natural, da gasolina e do GLP, ele pode servir como uma alternativa a esses combustíveis em várias circunstâncias, especialmente quando é gerado e consumido localmente. O uso do biogás incentiva uma economia circular e reduz a dependência de combustíveis fósseis, ajudando a diminuir as emissões de carbono e oferecendo uma opção viável para áreas rurais ou indústrias que produzem grandes volumes de resíduos orgânicos.

### 3.8 Tipos de biodigestores

Os biodigestores podem ser elaborados de diferentes maneiras e com uma grande gama de materiais, que variam desde construções sólidas em alvenaria e concreto até versões mais simples feitas de plásticos maleáveis e tambores reaproveitados. A seleção do tipo de biodigestor está relacionada ao propósito da instalação, à quantidade e ao tipo de substrato disponível, além dos recursos financeiros e tecnológicos da área (CIBIOGÁS, 2020).

Em regiões rurais e de baixa renda, é habitual o uso de materiais baratos e acessíveis, como tambores plásticos, lonas de PVC e canos de PVC para o armazenamento e a condução do biogás. Essa adaptabilidade proporciona que pequenos agricultores possam utilizar a



O funcionamento do biodigestor com cúpula flutuante é bastante simples e fácil de entender. Quando o biogás é produzido a partir da digestão anaeróbica do material, ele se acumula na cúpula flutuante, que se eleva gradualmente à medida que a pressão do gás aumenta. Este movimento para cima e para baixo da cúpula proporciona ao usuário uma maneira clara e prática de acompanhar a quantidade de gás disponível, uma vez que a altura da cúpula indica a quantidade de biogás armazenado no sistema (ALMEIDA, 2020) o que contribui para a pressão ser constante.

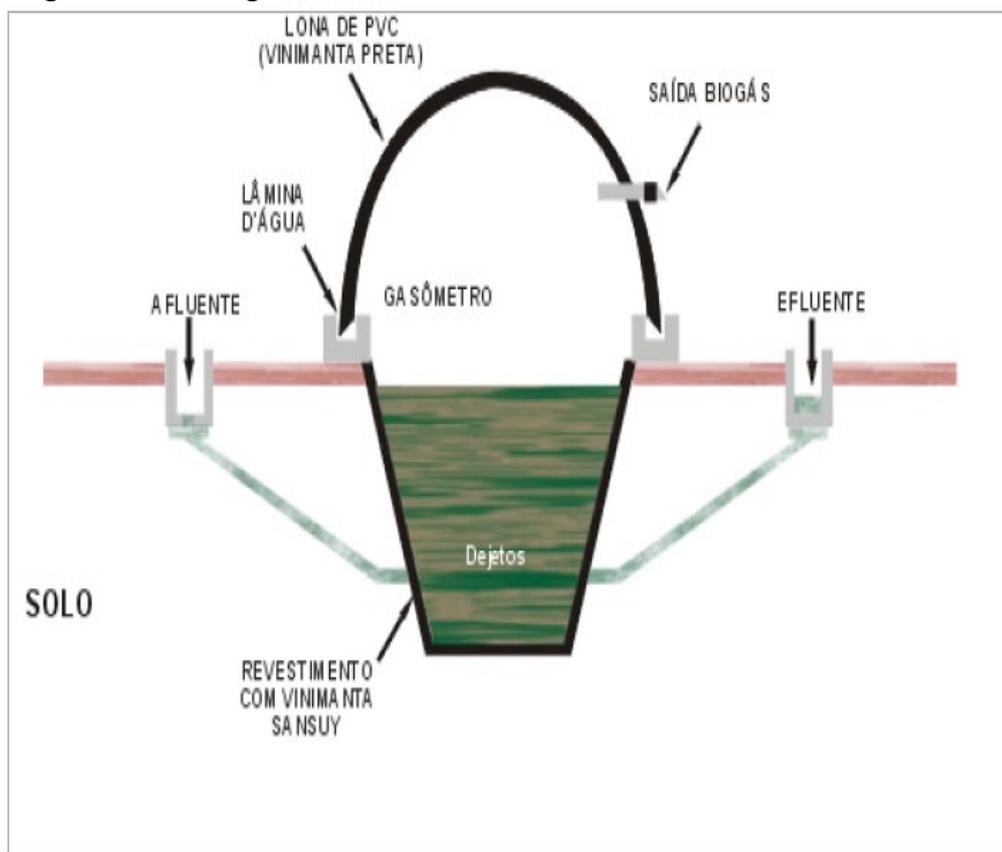
A estrutura metálica também aplica uma pressão ao gás, contribuindo para um fornecimento contínuo. Essa leve pressão intrínseca torna o sistema bastante eficiente para oferecer biogás diretamente aos dispositivos, sem a demanda por equipamentos suplementares com especificações ou pressão específicas (DEGANUTTI et al., 2002).

Esse sistema transforma resíduos orgânicos, em particular o estrume, em energia sustentável. O resíduo sólido gerado, conhecido como digestato, é abundante em nutrientes e pode ser aplicado diretamente como biofertilizante, promovendo um ciclo de nutrientes e restauração da necessidade de fertilizantes químicos (MARCHI et al., 2014).

### **3.8.2 Modelo Canadense**

O sistema canadense, chamado de biodigestor de lagoa coberta, é bastante aplicado em áreas com atividade agropecuária elevada, onde há uma abundante geração de resíduos líquidos, como os provenientes de rebanhos. Este sistema é composto por uma lagoa ou tanque de grande porte que possui uma cobertura de membrana como mostra a Figura 3.

Figura 03 – Biodigestor Canadense



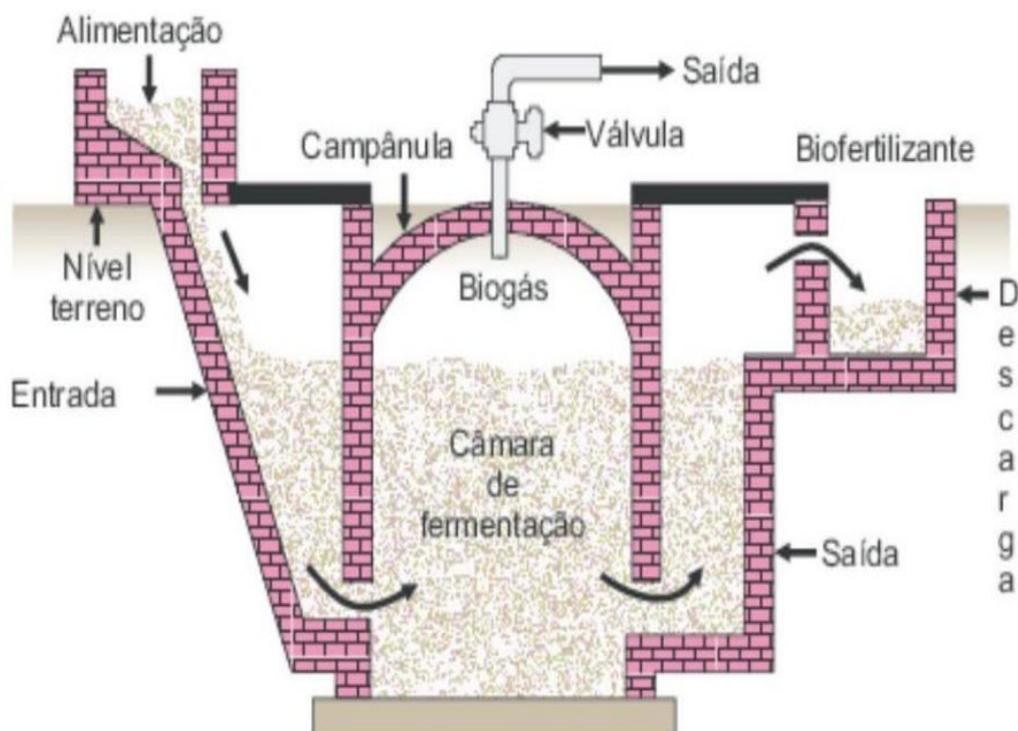
Fonte: DEGANUTTI et al. (2002)

Esse sistema é considerado passivo, já que não requer mistura interna ou aquecimento, resultando em menores custos operacionais. Sua estrutura simples também diminui a necessidade de manutenções complicadas e possibilita o tratamento de grandes quantidades de resíduos líquidos (SILVEIRA, 2017).

### 3.8.3 Modelo Chinês

O biodigestor de cúpula fixa, originário da China conforme figura 04, é um dos sistemas mais utilizados para a geração de biogás em zonas rurais. Esse tipo de biodigestor se espalhou principalmente na China, como parte de iniciativas governamentais que incentivam a utilização de energia renovável e a gestão sustentável de resíduos orgânicos. Ele é formado por um tanque com uma cúpula fixa, geralmente feito de concreto, que mantém o biogás gerado sem a necessidade de componentes móveis. Esse design robusto o torna resistente e ideal para instalação em áreas remotas ou rurais (MARCHI et. al. 2014).

Figura 04 – Biodigestor Chinês



Fonte: DEGANUTTI et al., (2002)

O biodigestor com cúpula fixa apresenta um reservatório destinado à digestão anaeróbica de resíduos orgânicos, resultando na produção de biogás. A cúpula de concreto, que é a parte superior do biodigestor, funciona como uma câmara de retenção para o biogás gerado, mantendo-se estável e sem deslocar-se. À medida que o biogás se acumula na cúpula, ele cria pressão dentro do sistema, facilitando o transporte do gás para fogões, sugestões a gás ou outros equipamentos sem necessidade de equipamentos adicionais de atualizações (SANTOS, 2020).

Diferente do sistema indiano, que apresenta uma cúpula móvel que se adapta à produção de biogás, o modelo chinês conta com uma cúpula fixa que assegura uma pressão variável dependendo de quanto biogás é gerado, resultando em uma construção mais simples e resiliente. Essa abordagem tem se mostrado especialmente vantajosa em áreas rurais da China, onde a resistência e a facilidade de manutenção são essenciais, e ainda é empregada em diversos países como uma alternativa prática e econômica para pequenos agricultores (DEGANUTTI et al., 2002).

Feito predominantemente de concreto, a estrutura chinesa apresenta uma durabilidade significativa e requer pouca manutenção. Essa solidez é especialmente benéfica em regiões

rurais, onde materiais e técnicos especializados podem ser de difícil acesso (MARCHI et al. 2014). Dado que o biodigestor chinês não possui componentes móveis, como a cúpula que flutua no modelo indiano, seus custos de operação são reduzidos e ele é menos propenso ao desgaste mecânico, o que o torna uma opção viável e econômica a longo prazo.

No cenário social, esse biodigestor tem contribuído significativamente para a elevação da qualidade de vida das famílias no meio rural da China, oferecendo uma fonte de energia renovável e de fácil acesso. Nos últimos anos, as iniciativas do governo chinês incentivaram a implementação desse sistema, levando a uma expansão significativa do uso de biogás em áreas rurais e influenciando políticas de energia renovável em países em desenvolvimento (SANTOS, 2020).

O biodigestor analisado neste estudo, contudo, se enquadra em um modelo de pequeno porte operado em batelada, com cúpula fixa e alimentação periódica, aproximando-se estruturalmente do modelo chinês, mas utilizando materiais alternativos e de baixo custo, o que o torna mais acessível ao contexto das comunidades rurais do semiárido brasileiro.

## 4 METODOLOGIA

Este trabalho é classificado como uma investigação que combina métodos qualitativos e quantitativos, tendo um caráter aplicado e finalidades exploratórias e descritivas. No que diz respeito à metodologia, é um estudo de caso que envolveu a supervisão técnica e operacional do desempenho de um biodigestor doméstico com capacidade de 30 litros, instalado na Unidade Acadêmica de Sousa da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB).

Segundo Marconi e Lakatos (2017), a combinação da pesquisa de campo com a análise de documentos possibilita a compreensão de fenômenos particulares por meio da observação direta e da organização dos dados em tempo real. O processo de coleta incluiu análises periódicas de pH, análise da composição do biogás, verificação de falhas estruturais e ajustes funcionais dos equipamentos.

A análise de conteúdo foi empregada como método de investigação, seguindo os fundamentos apresentados por Bardin (2016), o que possibilitou uma descrição sistemática, objetiva e quantitativa das informações obtidas. Os dados foram organizados em planilhas eletrônicas (Excel), permitindo a criação de tabelas para a identificação de padrões e tendências. O método científico utilizado foi o dedutivo, que se baseou em teorias já estabelecidas sobre biodigestores, incluindo os modelos indiano e chinês, e aplicou esses conceitos ao protótipo artesanal em questão, conforme sugerido por Gil (2019).

A área de estudo abrange o campus IV da UEPB na Unidade Acadêmica em Sousa-PB, região de clima semiárido, cuja realidade impõe desafios para o acesso à energia e o tratamento de resíduos orgânicos. A construção do biodigestor foi fundamentada no modelo proposto por Ferreira (2024), com estrutura de polietileno e conexões em PVC, sendo um projeto de baixo custo e fácil replicação, ideal para a realidade de pequenos produtores e comunidades rurais.

### 4.1 Localização e caracterização do biodigestor

O biodigestor examinado nesta pesquisa foi desenvolvido na Unidade Acadêmica Sousa-PB do campus IV da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), e tem uma capacidade de 30 litros. Esse dispositivo foi construído por Ferreira (2024), que visou criar um biodigestor artesanal com materiais acessíveis e de baixo custo, oferecendo uma solução

sustentável para a geração de energia e o manejo de resíduos orgânicos tanto no ambiente acadêmico quanto na comunidade Ferreira (2024).

O biodigestor em questão conforme figura 05 se destaca por ser um sistema pequeno e eficaz para a produção de biogás e biofertilizante, com o objetivo de atender às diretrizes técnicas e econômicas voltadas para pequenas propriedades e instalações de teste. Esta pesquisa fundamenta-se na estrutura inicial do biodigestor, o que serviu para monitorar a produção de biogás e examinar variáveis operacionais, como a concentração de gases (metano, amônia e sulfeto de hidrogênio) e o controle do pH. Assim, procurou-se avaliar a eficiência do processo de digestão anaeróbica e sugerir melhorias que assegurem a estabilidade e a segurança do sistema.

De acordo com Ferreira (2024), o biodigestor segue o modelo de fluxo contínuo, que permite a alimentação periódica com substrato orgânico e a remoção gradual do digestato, sem necessidade de interrupções no processo. Esse modelo é eficiente para a produção contínua de biogás, pois possibilita um ambiente microbiológico estável dentro da câmara de digestão.

Figura 05 – Biodigestor Caseiro



Fonte: Própria, 2024.

## 4.2 Preparação e alimentação inicial do biodigestor

A alimentação inicial do biodigestor ocorreu em 18 de setembro de 2024 conforme figura 06, quando foi utilizada uma mistura selecionada de restos de alimentos, esterco e água, visando criar condições adequadas para a digestão anaeróbica e iniciar a geração de biogás. A seleção do substrato foi feita com base em uma combinação de elementos que oferecem diferentes fontes de carbono, nitrogênio e outros nutrientes essenciais para os microrganismos envolvidos em cada fase do processo anaeróbico.

Figura 06 – Alimentando biodigestor



Fonte: Própria, 2024.

O biodigestor possui 30 litros de capacidade, porém foi utilizado o volume inicial continha 18 litros de água, que atua como veículo para os nutrientes e promove a circulação dos microrganismos. Complementarmente, foram incorporados 0,8 kg de esterco de gado, uma matéria-prima abundante em microrganismos anaeróbicos e nutrientes, oferecendo uma base inicial de bactérias ou arqueas que promovem o processo de fermentação. O excremento de gado possui microrganismos hidrolíticos, fermentadores e acetogênicos que desempenham um papel fundamental nas fases iniciais da digestão anaeróbica, facilitando a manipulação inicial dos resíduos orgânicos em compostos mais simples.

Adicionou-se também 1,7 kg de restos de alimentos, que incluem couve, cascas de beterraba, cascas de cenoura, cuscuz de milho, arroz e feijão. Essa mistura proporciona uma diversidade significativa de matéria orgânica, englobando carboidratos e proteínas, que servem como substrato para os microrganismos fermentativos e acetogênicos presentes no sistema (DEGANUTTI et al., 2002). A variedade de elementos é fundamental, uma vez que cada categoria de exclusão oferece nutrientes particulares que nutrem diferentes espécies de microrganismos, assegurando uma digestão mais abrangente e eficaz.

Além dos sólidos mencionados, foram adicionados 300 ml de inóculo de um biodigestor em funcionamento no Instituto Federal da Paraíba (IFPB) localizado em Sousa, com o objetivo de introduzir microrganismos que já estão adaptados e atuantes no processo de digestão anaeróbica. A utilização do inóculo acelera a etapa inicial da biodigestão, pois disponibiliza uma comunidade de microrganismos já ajustada ao ambiente anaeróbico. Com essa quantidade inicial, a meta era inserir uma microbiota variada e equilibrada, assegurando que os microrganismos vitais para cada etapa do processo de biodigestão. A expectativa era que essa configuração do substrato inicial apresentasse as condições ideais para que o biodigestor iniciasse a produção de biogás de forma mais rápida e consistente, criando uma base robusta para as fases subsequentes da pesquisa.

A Figura 07 ilustra o biodigestor alimentado, evidenciando a composição do substrato.

Figura 07 – Biodigestor alimentado



Fonte: Própria, 2024.

### **4.3 Adaptações estruturais do biodigestor**

O biodigestor originalmente construído por Ferreira (2024), passou por diversas adaptações estruturais para garantir a eficiência do sistema, minimizar vazamentos e otimizar a produção de biogás. Essas modificações foram realizadas conforme necessidades identificadas durante a operação do biodigestor e visaram aprimorar a vedação, controle da pressão interna e armazenamento do biogás.

#### **4.3.1 Adaptações iniciais**

Após a instalação do biodigestor, foram observadas falhas estruturais que comprometeram sua vedação, resultando na necessidade de ajustes. O primeiro problema identificado foi um vazamento de gás pela parte superior do equipamento. Para solucionar essa questão, foi realizada a vedação das conexões utilizando silicone PU e reforço com cola soldável para PVC. Além disso, houve a necessidade de reforçar a tampa do biodigestor para evitar escape de gás.

#### **4.3.2 Segunda adaptação**

Após a primeira fase de funcionamento do biodigestor, foi observada a necessidade de uma segunda adaptação para corrigir falhas estruturais que comprometeram a operação segura e eficiente do sistema.

Para solucionar esse problema, foi realizada a substituição da vedação por fita autossoldante de alta fusão, um material mais resistente que proporciona maior durabilidade e vedação eficiente para sistemas de pressão. Esse ajuste garantiu que as conexões permanecessem seguras e evitou novas perdas de gás ou rompimentos estruturais.

Além disso, observou-se que algumas conexões em PVC estavam se soltando com o tempo, provavelmente em decorrência da combinação entre o calor proveniente do processo fermentativo e o aquecimento externo causado pela exposição ao sol. Para reforçar a integridade estrutural, foi aplicada camada de silicone PU em todas as junções, criando uma barreira elástica e resistente à variação de temperatura e pressão.

Essa adaptação foi essencial para melhorar a segurança operacional do biodigestor, minimizar riscos de novos vazamentos e assegurar a retenção eficiente do biogás produzido.

Com essas melhorias, o sistema passou a apresentar maior estabilidade, favorecendo a continuidade do processo de biodigestão anaeróbica sem interrupções significativas.

#### 4.4 Nova alimentação com inóculo, substrato adequado.

Após as modificações estruturais no biodigestor, um novo período de alimentação começou em 6 de novembro de 2024, com o uso de uma combinação de inóculo, água e esterco de gado. A dieta revisada passou a integrar 5 litros de inóculo, 4,5 litros de água e 4,8 kg de esterco bovino. A seleção desse substrato e do inóculo foi planejada com a intenção de reintroduzir e estabilizar microrganismos fundamentais para as etapas do processo anaeróbico.

O inóculo, obtido de um biodigestor em funcionamento no IFPB, contém microrganismos que se adaptam às condições anaeróbicas e são capazes de impulsionar rapidamente as reações de simulação. Ele insere uma população ativa de bactérias hidrolíticas, fermentativas e arqueas metanogênicas, responsáveis pela decomposição da matéria orgânica e pela geração de metano (SILVEIRA, 2017). O inóculo acelera a fase inicial do processo e diminui o tempo de adaptação, resultando em uma produção de biogás mais ágil e consistente.

A Figura 08 ilustra o momento da coleta do inóculo no biodigestor do IFPB, demonstrando a etapa preparatória essencial para a reinoculação do sistema.

Figura 08 – Coletando inóculo



Fonte: Própria, 2024.

#### **4.4.1 Implementação do gasômetro para controle de pressão e armazenamentos seguro**

Foi realizado um reforço nas conexões com Cola de Solda para PVC: Na etapa de montagem do gasômetro, tornou-se imprescindível consolidar todas as uniões utilizando cola soldável de PVC, um tipo de material que assegura forte aderência e durabilidade, vital para selar as conexões que operam sob pressão.

O silicone PU foi empregado como uma camada extra nas principais conexões. Este tipo de vedante é eficiente para biodigestores, pois apresenta características de grande durabilidade e auxílio na resistência a diferentes pressões e gases (CIBIOGÁS, 2020).

Depois da instalação dos reforços, o gasômetro foi conectado ao biodigestor conforme figura 09, e a válvula foi liberada para facilitar a passagem do biogás para o sistema de armazenamento. Essa estrutura de armazenamento foi fundamental para minimizar a pressão interna do biodigestor, evitando potenciais explosões e garantindo o armazenamento seguro do biogás produzido.

O gasômetro se apresenta como uma alternativa para o armazenamento do biogás produzido, permitindo sua utilização futura de maneira eficaz. Em sistemas que não dispõem de um gasômetro, o biogás excedente deve ser descartado, levando ao seu desperdício. Com a presença do gasômetro, o gás pode ser guardado e empregado quando necessário, otimizando assim a utilização do biogás (DEGANUTTI et al., 2002).

Figura 09 – Gasômetro ligado ao biodigestor



Fonte: Própria, 2024.

#### 4.5 Métodos para a coleta de informações

A obtenção de dados sobre o biogás gerado pelo biodigestor do laboratório de Biotecnologia da Unidade Acadêmica Sousa da UEPB foi conduzida por meio de aferições pontuais, realizadas em momentos estratégicos ao longo do experimento, de acordo com a disponibilidade dos equipamentos e a evolução perceptível do sistema. Essas análises foram suficientes para fornecer uma visão representativa da qualidade do biogás, da eficiência do biodigestor e dos fatores críticos que influenciam o processo de digestão anaeróbica, como o pH do substrato, a composição do biogás ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  e  $\text{NH}_3$ ), a pressão interna e o comportamento da produção de gás ao longo do tempo..

##### 4.5.1 Determinação de pH

Utilizou-se o Medidor de pH mPA210 (MS Tecnopon Instrumentação) conforme ilustra a figura 10, para acompanhar as alterações no pH do substrato durante o experimento. A manutenção do pH em níveis adequados é fundamental para proporcionar um ambiente propício às atividades microbianas, especialmente na metanogênese, que acontece de maneira

ideal numa faixa de pH entre 6,5 e 7,5 (MARCHI; BARBOSA; BRESSANI, 2014). O dispositivo, conhecido por sua alta precisão, passou por calibrações frequentes para garantir a confiabilidade das medições.

Figura 10 – Medidor de pH mPA210



Fonte: Própria, 2024.

#### 4.5.2 Teste de qualidade do biogás

Para a avaliação da qualidade do biogás gerado, foi utilizado o Kit de Análise de Biogás Portátil Alfakit/Embrapa, conforme ilustrado na Figura 11. Esse conjunto de instrumentos desempenhou um papel fundamental na análise da composição do biogás, permitindo mensurar os principais componentes responsáveis pela eficiência energética e operacional do biodigestor. Os parâmetros analisados foram:

**Metano (CH<sub>4</sub>):** Representa o principal indicativo da eficiência energética da digestão anaeróbica. Concentrações superiores a 70% são consideradas ideais e sinalizam um processo eficiente e estabilizado (SILVEIRA, 2017).

**Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>):** Subproduto natural da digestão anaeróbica, sua proporção em relação ao metano permite avaliar o equilíbrio entre as fases acidogênica e metanogênica (CIBIOGÁS, 2020).

**Sulfeto de Hidrogênio (H<sub>2</sub>S):** Embora presente em menores quantidades, é um composto corrosivo e tóxico. Sua presença influencia negativamente a qualidade do biogás, podendo danificar equipamentos e comprometer o aproveitamento energético.

**Amônia (NH<sub>3</sub>):** Indicador da degradação de matéria nitrogenada, especialmente proteínas. Em concentrações elevadas, pode inibir a atividade das arqueas metanogênicas, afetando a produção de metano (DEGANUTTI et al., 2002).

Figura 11 – Alfakit/Embrapa Kit de análise Biogás Portátil



Fonte: Própria, 2024.

A utilização desse conjunto possibilitou medições rápidas e exatas, proporcionando informações essenciais para avaliar o funcionamento do biodigestor e monitorar a qualidade do biogás.

### 4.5.3 Gasômetro

O gasômetro serviu para medir a pressão interna do biodigestor e armazenar o biogás gerado. Além de possibilitar o controle da pressão, o equipamento ajudou a calcular o volume total de gás produzido, fornecendo informações quantitativas que enriquecem a avaliação qualitativa do biogás (XAVIER; LUCAS, 2010).

### 4.5.4 Teste de chama com fogareiro modificado

A avaliação da queima do biogás gerado pelo biodigestor ocorreu em 27/11/2024, empregando um fogareiro pequeno que passou por modificações prévias. A alteração envolveu a adaptação da válvula do fogareiro, realizada com uma broca de aço de 2 mm, para ajustar a passagem do gás às propriedades do biogás produzido. Essa modificação assegurou um fluxo contínuo e controlado, fundamental para analisar a qualidade da queima.

A abordagem utilizada, baseada na alteração do fogareiro, é amplamente reconhecida como uma técnica em campo para a avaliação inicial da qualidade do biogás, representando uma alternativa prática para sistemas em pequena escala (CIBIOGÁS, 2020). Esse teste não só validou a eficácia do biodigestor, mas também destacou sua habilidade de produzir biogás de qualidade elevada, apropriado para suprir necessidades energéticas em situações experimentais e residenciais.

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

A avaliação dos resultados alcançados no estudo do biodigestor instalado na Unidade Acadêmica de Sousa da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB) possibilitou a análise da eficácia do sistema na geração de biogás e a influência das modificações estruturais na estabilidade do processo. As informações foram organizadas em quatro categorias principais: modificações e otimizações estruturais, fornecimento de matéria-prima ao biodigestor e seu efeito no rendimento, medições da qualidade do biogás e do pH, e teste de chama para verificar a combustibilidade do biogás.

### **5.1 Inicialização da adaptação, primeiro consumo e crescimento exponencial**

A alimentação inicial do biodigestor aconteceu em 18 de setembro de 2024, quando foram inseridos 18 litros de água, 0,8 kg de esterco de bovino, 1,7 kg de restos de alimentos e 300 ml de inóculo obtido de um biodigestor do Instituto Federal da Paraíba (IFPB). O propósito dessa primeira carga foi ativar a microbiota anaeróbica e dar início ao processo de biodigestão.

No dia 24 de setembro de 2024, foi registrada a primeira geração de gás, porém, constatou-se um vazamento na parte superior do biodigestor em virtude da pressão interna. A análise do pH revelou um índice de 4,8, indicando uma acidificação do ambiente, o que pode prejudicar a etapa de metanogênese. De acordo com a CIBIOGÁS (2020), é recomendado que o pH se mantenha entre 6,5 e 7,5 para otimizar a atividade das arqueas metanogênicas.

Em 15 de outubro de 2024, houve uma explosão no biodigestor como ilustra a figura 12. O incidente foi provocado pelo acúmulo excessivo de pressão, combinado com a vedação inadequada feita com fita veda-rosca, que não aguentou a pressão do biogás produzido. Essa ocorrência evidenciou a urgência de realizações de melhorias estruturais para prevenir acidentes similares e aumentar a segurança do sistema.

Figura 12 – Incidente no biodigestor



Fonte: Própria, 2024.

## 5.2 Segunda modificação, Segundo Consumo e conexão com gasômetro.

Em resposta às falhas estruturais observadas durante a primeira etapa do experimento, foi realizada uma segunda modificação técnica no biodigestor, com o intuito de melhorar a segurança operacional, a vedação e a eficiência da digestão anaeróbica. Um dos principais ajustes foi à instalação de um cano de PVC rosqueável na entrada do substrato, vedado com um tampão de rosca, o que possibilitou melhor controle de pressão e garantiu uma vedação mais segura. Esse novo sistema substituiu a vedação anterior, que era frágil e havia contribuído para o incidente de explosão em 15/10/2024.

Todas as conexões também foram seladas com cola soldável para PVC e silicone PU, garantindo maior aderência e resistência às variações térmicas e evitando novas perdas de gás. A aplicação cuidadosa desses materiais permitiu restaurar a integridade estrutural do sistema, conforme mostra a Figura 13.

No dia 06 de novembro de 2024, foi realizada a segunda alimentação do biodigestor, utilizando um substrato reformulado, composto por 5 litros de inóculo (coletado de um biodigestor funcional no IFPB – Sousa), 4,5 litros de água e 4,8 kg de esterco bovino. A adição do inóculo foi essencial para reintroduzir uma comunidade microbiana ativa, incluindo

arqueas metanogênicas, responsáveis pela etapa final de produção de metano. O pH do substrato, nesse momento, foi medido em 7,1, valor considerado ideal para o equilíbrio microbiológico do sistema e a eficiência da digestão anaeróbica.

Com o aumento gradual da geração de gás, no dia 07 de novembro de 2024, o sistema foi conectado a um gasômetro artesanal, que passou a atuar como reservatório e regulador da pressão interna. Essa estrutura não apenas assegurou o armazenamento seguro do biogás, como também permitiu o controle gradual da liberação do gás para testes de combustão e análises laboratoriais futuras. A instalação do gasômetro foi decisiva para evitar novos incidentes e garantir a continuidade segura do experimento.

As modificações realizadas nesta fase resultaram em maior estabilidade no sistema, com melhores índices de produção e qualidade do biogás, comprovando a eficácia das adaptações técnicas e da nova alimentação.

Figura 13 – Gasômetro vedado



Fonte: Própria, 2024.

### 5.3 Características do biogás e nível de pH

A geração de biogás foi avaliada em cinco intervalos distintos, com foco nas proporções de metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Os níveis de CH<sub>4</sub> oscilaram entre 57,5% e 87,5%, atingindo seu pico em 14/11/2024. Essa variação indica a eficiência da metanogênese em períodos de maior equilíbrio químico do substrato. Em contrapartida, o CO<sub>2</sub> apresentou um comportamento inversamente proporcional, variando de 12,5% a 42,5%, com valores mais elevados associados a instabilidades do sistema, como observado em 25/11/2024.

A Tabela 3 apresenta detalhadamente a composição do biogás produzido nos diferentes momentos do experimento, evidenciando a relação entre os componentes principais e as condições operacionais. Segundo Xavier e Lucas (2010), concentrações de metano superiores a 60% são consideradas adequadas para garantir uma combustão eficiente.

Tabela 3: Composição do biogás produzido

DATA	Metano (CH <sub>4</sub> ) (%)	Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ) (%)	Hidrogênio Sulfídrico (H <sub>2</sub> S) (ppm)	Amônia (NH <sub>3</sub> ) (ppm)	pH	Teste de Chama
08/11/2024	82,5	17,5	20	175	Não medido	Não realizado
11/11/2024	72,5	27,5	20	175	6,25	Não realizado
14/11/2024	87,5	12,5	20	175	6,1	Não realizado
25/11/2024	57,5	42,5	20	175	6,95	Não realizado
27/11/2024	65	35	20	175	Não medido	Chama azul clara

Fonte: Própria-2024

As informações apresentadas indicam que, apesar de o sistema ter passado por momentos de instabilidade, as ações implementadas foram bem-sucedidas em restaurar a produção de biogás e aprimorar sua qualidade.

O pH foi monitorado como um parâmetro essencial para a manutenção da estabilidade do sistema anaeróbico, uma vez que influencia diretamente a atividade microbiana, em todas as quatro fases do processo de biodigestão. Na primeira alimentação, o pH inicial do substrato foi de 4,32, valor considerado ácido, o que indicou um possível acúmulo de ácidos

graxos voláteis (AGVs) e resultou na inibição parcial da atividade microbiana, comprometendo a conversão eficiente da matéria orgânica e a produção de metano.

Já na segunda alimentação, realizada em 06/11/2024, após ajustes estruturais e a reintrodução do inóculo, o pH inicial registrado foi de 7,1, considerado ideal para a atuação das arqueas metanogênicas e para a promoção de uma digestão anaeróbica eficiente. Esse ambiente mais estável favoreceu a produção de metano, refletindo a eficiência da reformulação do substrato e da microbiota presente no sistema.

De acordo com Silveira (2017), o intervalo de pH mais adequado para biodigestores varia de 6,5 a 7,5, sendo crucial para preservar as condições ideais para os microrganismos. A manutenção do pH teve um impacto direto na qualidade do biogás, como evidenciado na produção de metano em 08/11/2024.

As concentrações de poluentes se mantiveram em 20 ppm de H<sub>2</sub>S e 175 ppm de NH<sub>3</sub>, quantidades tidas como seguras para processos de digestão anaeróbica (Deganutti et al., 2002). Esses dados sugerem que o material empregado estava adequadamente equilibrado em relação aos compostos sulfurados e nitrogenados, ajudando a preservar a qualidade do biogás.

As intervenções mais significativas realizadas ao longo do experimento foram:

- A adição de inóculo recém-coletado, água e esterco de gado no dia 06 de novembro de 2024 foi crucial para restaurar a microbiota do sistema e elevar a geração de metano.
- Instalação do Gasômetro: O gasômetro desempenhou um papel fundamental na regulação da pressão interna, prevenindo a perda de biogás e possibilitando um armazenamento seguro para utilização futura.
- Fortalecimento das conexões: A aplicação de adesivo soldável de PVC e silicone PU proporcionou uma vedação eficaz, prevenindo vazamentos e assegurando a estabilidade do sistema.

Essas medidas tiveram um papel importante na eficiência do biodigestor, provando que alterações técnicas básicas podem produzir efeitos benéficos em sistemas de menor porte. Os resultados evidenciam a viabilidade do biodigestor como uma opção sustentável para geração de energia renovável. As variações nos níveis de metano e pH ressaltam a necessidade de monitoramento regular e de manutenção preventiva para assegurar a

estabilidade do sistema. A presença da chama azul clara durante o teste atesta a qualidade do biogás gerado, validando as ações implementadas e o potencial do sistema para usos práticos.

Esses resultados são compatíveis com pesquisas importantes, como as de Xavier e Lucas (2010), e indicam a urgência de otimizações futuras, incluindo a implementação de sensores em tempo real para a vigilância do pH e da pressão. Ademais, a regulação da temperatura pode ajudar a reduzir os efeitos das variações ambientais, assegurando um funcionamento mais eficaz e consistente.

#### 5.4 Avaliação da chama

No dia 27 de novembro de 2024, foi executado um teste de chama com o intuito de avaliar a qualidade do biogás gerado conforme ilustra figura 14 e figura 15. O gás que estava guardado no gasômetro foi encaminhado para um fogareiro modificado, no qual a válvula foi alterada com o uso de uma broca de aço de 2 mm, permitindo um controle mais eficaz do fluxo.

Depois do ajuste e da ligação do fogareiro ao gasômetro, a chama resultante foi analisada e revelou uma coloração azul clara, o que sugere a predominância de metano ( $\text{CH}_4$ ) no biogás e a baixa presença de impurezas, como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) em grandes quantidades ou sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ). De acordo com Xavier e Lucas (2010), a chama azul é um sinal de que o biogás possui alta eficiência energética, confirmando uma concentração de  $\text{CH}_4$  acima de 60%.

Figura 14 – Chama biogás



Fonte: Própria, 2024.

A alteração técnica na válvula representou uma alternativa eficiente que possibilitou a utilização direta do biogás em um aparato experimental, evidenciando suas potencialidades para usos tanto residenciais quanto laboratoriais. O fluxo calibrado assegurou uma queima consistente, comprovando a qualidade do biogás gerado após as modificações estruturais e a nova alimentação implementada no biodigestor.

A presença da chama azul é um indicativo claro de que o biogás gerado estava em condições ótimas para a combustão, tornando-o apropriado para aplicação energética. Conforme mencionado por Deganutti et al. (2002), a eficiência do biogás está fortemente ligada à sua composição, especialmente à proporção de metano e à diminuição de impurezas como  $H_2S$  e amônia ( $NH_3$ ), que podem afetar tanto a qualidade da chama quanto a durabilidade dos equipamentos.

Figura 15 – Chama biogás



Fonte: Própria, 2024.

## 5.5 Potenciais problemas

Um aspecto fundamental foi à influência das condições ambientais, especialmente as variações de temperatura. O biodigestor estava sujeito às mudanças climáticas características da área de Sousa, o que afeta diretamente a atividade dos microrganismos envolvidos no processo de digestão anaeróbica. Temperaturas abaixo do nível ideal podem retardar a metanogênese, enquanto temperaturas muito elevadas podem inibir a ação microbiana. Apesar

do experimento ter ocorrido em uma região semiárida, onde as temperaturas normalmente favorecem a digestão anaeróbica, a ausência de um controle térmico adequado dificultou a manutenção de condições ideais de forma consistente.

Análise de elementos foi outra restrição. Apesar de a combinação de restos alimentares, esterco de gado e inóculo ter se mostrado apropriada para o experimento, a diversidade dos resíduos alimentares pode ter gerado variações na geração de biogás. Por exemplo, resíduos com alta concentração de proteínas elevam os níveis de amônia, enquanto aqueles ricos em gordura podem resultar em um acúmulo de ácidos graxos de cadeia longa, ambos podendo interferir negativamente no processo de metanogênese.

A adoção de materiais acessíveis na fabricação do biodigestor, embora crucial para a viabilidade financeira do empreendimento, comprometeu a solidez do sistema. Questões estruturais, como vazamento e uma explosão inicial, destacaram a urgência de reforços e manutenções regulares. Essa situação pode ter impactado negativamente o funcionamento geral do biodigestor e interrompido temporariamente a coleta de dados durante as fases de ajuste.

Essas restrições destacam a relevância de levar em conta as particularidades de sistemas de menor escala e a urgência de aprimoramentos estruturais e funcionais em investigações futuras. Embora enfrente esses obstáculos, a abordagem utilizada possibilitou a obtenção de informações significativas e aprendizados importantes, que podem ser utilizados em pesquisas mais extensas e na instalação de biodigestores em situações parecidas.

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho favorece a compreensão e o aprimoramento de biodigestores de pequeno porte, incentivando sua utilização em ambientes acadêmicos, residenciais e comunitários, apresentando-se como uma opção viável para a produção de energia renovável e a gestão sustentável de resíduos.

A pesquisa realizada com o biodigestor artesanal de 30 litros, localizado na Unidade Acadêmica de Sousa da UEPB, demonstrou a viabilidade técnica do uso dessa tecnologia em pequena escala como alternativa sustentável para a produção de biogás e biofertilizante. O sistema mostrou-se funcional, mesmo diante de limitações estruturais e operacionais, e comprovou a importância de medidas como o controle do pH, a qualidade do substrato e a manutenção das condições anaeróbicas.

Foram obtidos valores de metano entre 57,5% e 87,5%, com estabilidade significativa após a segunda alimentação, que incluiu inóculo e reforço na vedação. O teste de chama realizado ao final do experimento confirmou o potencial energético do biogás produzido.

Com base nos dados obtidos, conclui-se que o biodigestor analisado pode ser replicado em comunidades rurais ou instituições de ensino, promovendo a geração de energia renovável, o reaproveitamento de resíduos orgânicos e a sustentabilidade ambiental.

### 6.1 Sugestões finais

Apesar de os resultados serem encorajadores, é importante ressaltar que sistemas pequenos, como o biodigestor em análise, apresenta alta sensibilidade ao clima e condições ambientais. A adoção de sensores para monitoramento constante, juntamente com controles térmicos, poderia melhorar a eficiência do processo e diminuir a necessidade de intervenções corretivas. Finalmente, pesquisas futuras podem investigar a otimização de substratos e o aumento da escala do sistema para aplicações em maior escala, sempre com ênfase na sustentabilidade e na acessibilidade.

De acordo com os resultados alcançados, são sugeridas as seguintes orientações para futuras implementações:

- Acompanhamento Constante: A implementação de sensores para a supervisão em tempo real de fatores como pH, pressão e composição do biogás pode aumentar consideravelmente a eficácia e a segurança do sistema.
- Melhoria do Substrato: A mistura de diferentes substratos, como dejetos de gado e restos de comida, provou ser eficaz, mas modificações complementares podem aprimorar ainda mais a composição química do sistema.
- Capacidade de expansão: A unidade de 30 litros mostrou restrições por conta de seu tamanho compacto. Reproduzir em unidades de maior volume poderia otimizar o desempenho do biodigestor, preservando os fundamentos operacionais destacados nesta pesquisa.
- Gerenciamento Térmico: A adoção de estratégias para regular a temperatura interna do biodigestor pode minimizar as variações microbianas e químicas, particularmente em locais que enfrentam condições climáticas severas.

## 7 REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, C. E. D. **Importância do pH no Equilíbrio Químico de Biodigestores Anaeróbios**. Universidade Federal do Ceará, 2020.
- ANAEROBIC DIGESTION: **BIOGAS PRODUCTION AND ODOR REDUCTION**. Extension, Penn State University, 2023.
- BARDIN, Laurence. **Análise de conteúdo**. São Paulo: Edições 70, 2016.
- FERREIRA, Francisco Carlos Alexandre. Estudo de Caso: **Funcionamento e Desempenho de Biodigestores Caseiros**. Campus IV da UEPB. 2024.
- CIBIOGÁS **Manual de Produção de Biogás e Biofertilizante: Técnicas e Práticas Sustentáveis**. CIBIOGÁS, 2020.
- CUNHA, R. S., & LIMA, A. B. (2021). **Educação Ambiental e Biodigestores: Capacitação para o Desenvolvimento Sustentável**. Revista Brasileira de Educação Ambiental, 16(1), 110-122.
- DEGANUTTI, R.; PLÁCIDO PALHACI, MCJ; ROSSI, M.; TAVARES, R.; DOS SANTOS, C. **Biodigestores Rurais: Modelo Indiano, Chinês e Batelada**. Departamento de Artes e Representação Gráfica, FAAC - Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, UNESP - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2002.
- DIACONIA. **Manual de Construção do Biodigestor Sertanejo**. 2020.
- GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019.
- KOCH, K.; HELMREICH, B.; DREWES, J. E. **Influence of Seasonal Temperature Variations on Biogas Production Efficiency in Anaerobic Digesters**. Environmental Science & Technology, 2015.
- MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de metodologia científica**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017.
- MARCHI, G.; BARBOSA, C. E.; BRESSANI, R. **Técnicas de Operação de Biodigestores e Inóculos em Sistemas Rurais**. Revista Brasileira de Biogás, v.8, n.1, 2014.
- Santos, E. M., et al. (2019). **Compostagem e Biodigestores: Estratégias para a Sustentabilidade em Comunidades Rurais**. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, 23, e01404.
- Santos, R. G., Rocha, J. D., & Ribeiro, T. H. (2020). **Viabilidade técnica e econômica de biodigestores na geração de biogás em pequenas propriedades rurais**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.
- Silva, A. B., & Santos, C. D. (2020). **Biodigestores como Alternativa para Redução de Custos Energéticos em Comunidades de Baixa Renda**. Revista Brasileira de Energias Renováveis, 9(1), 1-15.

SILVEIRA, A. M. **Avaliação dos Parâmetros de Controle para Biodigestores com Dejetos Bovinos**. Universidade Federal de Viçosa, 2017.

UDDIN, Md Mosleh; WRIGHT, Mark Mba. **Anaerobic Digestion Fundamentals, Challenges, and Technological Advances**. De Gruyter, 2022.

XAVIER, C. A. N.; LUCAS, J. de. **Parâmetros de Dimensionamento para Biodigestores Batelada Operados com Dejetos de Vacas Leiteiras com e sem Uso de Inóculo**. Engenharia Agrícola, v.30, n.2, p. 239-247, 2010.