



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO**  
**REGIONAL**  
**DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA SUCROALCOOLEIRA**



**ANALYCE GALDINO DO NASCIMENTO**

**DA VINHAÇA AO BIOGÁS: AVALIAÇÃO DO SEU POTENCIAL ENERGÉTICO EM  
TRÊS NÍVEIS DE DILUIÇÃO**

João Pessoa

Setembro/2025

ANALYCE GALDINO DO NASCIMENTO

DA VINHAÇA AO BIOGÁS: AVALIAÇÃO DO SEU POTENCIAL ENERGÉTICO EM  
TRÊS NÍVEIS DE DILUIÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Departamento de  
Tecnologia Sucroalcooleira da  
Universidade Federal da Paraíba  
como parte dos requisitos para  
obtenção do título de Tecnólogo  
em Produção Sucroalcooleira.

Orientadora Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Danielle  
Christine Almeida Jaguaribe

João Pessoa  
Setembro/2025

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

N244d Nascimento, Analyce Galdino do.  
Da vinhaça ao biogás: avaliação do seu potencial energético em três níveis de diluição / Analyce Galdino do Nascimento. - João Pessoa, 2025.  
53 f. : il.

Orientação: Danielle Christine Almeida Jaguaribe.  
TCC (Graduação) - UFPE/CTDR.

1. Vinhaça. 2. Biogás. 3. Digestão anaeróbia. 4. Setor sucroalcooleiro. 5. Sustentabilidade. I. Jaguaribe, Danielle Christine Almeida. II. Título.

UFPE/CTDR

CDU 633.61:662.767.2

TCC aprovado em 29/09/2018 como requisito para a conclusão do curso de Tecnologia em Produção Suroalcooleira da Universidade Federal da Paraíba.

**BANCA EXAMINADORA:**

*Danielle Christine Almeida Jaguaribe*

PROF<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup>. Danielle Christine Almeida Jaguaribe - (UFPB – Orientador)

*Kelson Carvalho Lopes*

PROF Dr. Kelson Carvalho Lopes - (UFPB – Membro interno)

*Joelma Morais Ferreira*

PROF<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup>. Joelma Morais Ferreira - (UFPB – Membro interno)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, de forma genuína, a Deus, que sempre esteve ao meu lado, fortalecendo minha fé e me dando forças para não desistir dos meus sonhos e objetivos.

Expresso minha eterna gratidão à minha família: à minha mãe, pelo incentivo e apoio incondicionais em todas as etapas da minha vida; ao meu pai, pelo suporte essencial, especialmente nesta reta final; e à minha irmã, pela presença constante, pelo apoio e companheirismo em todos os momentos.

Estendo meus agradecimentos aos amigos que caminharam comigo nesta jornada, enfrentando com serenidade e dignidade os desafios que surgiram e celebrando, com alegria, cada conquista alcançada.

Sou profundamente grata aos professores que contribuíram de forma significativa para minha formação, tornando este percurso repleto de aprendizados e descobertas. Em especial, agradeço ao Professor Kelson Carvalho Lopes, que esteve presente em todas as etapas, não apenas da minha trajetória, mas também na de meus colegas, oferecendo suporte, dedicação e compromisso.

Agradeço a Usina que disponibilizou gentilmente a vinhaça e ao colega Rhangel Santos que fez a ponte para que fosse possível as análises.

Dirijo um agradecimento especial à minha orientadora, Professora Danielle Jaguaribe, pela orientação cuidadosa e competente, que me possibilitou enxergar oportunidades em meio às dificuldades e acreditar mais no meu potencial.

Por fim, agradeço a mim mesma, pela coragem de persistir mesmo diante das dificuldades, pela resiliência em não desistir quando tudo parecia incerto e pela determinação em transformar cada obstáculo em aprendizado. Reconheço a força que encontrei em mim para seguir adiante e a dedicação que me trouxe até aqui, tornando possível a realização de mais este sonho.

## RESUMO

A vinhaça é um dos principais resíduos líquidos gerados no processo produtivo do setor sucroalcooleiro, caracterizando-se por sua elevada carga orgânica e potencial poluidor. Por outro lado, apresenta-se como um substrato promissor para a digestão anaeróbia, possibilitando a geração de biogás e contribuindo para a valorização energética de resíduos agroindustriais. Este trabalho teve como objetivo avaliar a produção de biogás a partir da vinhaça de cana-de-açúcar em escala laboratorial, analisando diferentes proporções de inóculo e três condições de pH 6, 7 e 8. Foram realizados ensaios em biodigestores experimentais, monitorados por balões acoplados para verificação da geração de gás. A caracterização físico-química da vinhaça confirmou sua viabilidade como substrato, enquanto os testes práticos mostraram maior evidência de produção nos biodigestores mantidos em pH 8. Entretanto, o problema de rompimento dos balões comprometeu a continuidade do acompanhamento, resultando em dados inconclusivos sobre rendimento e composição do biogás. Mesmo diante dessas limitações, o estudo reforça o potencial da vinhaça como matéria-prima para geração de energia renovável, destacando a importância do controle do pH para a estabilidade do processo e a necessidade de melhorias na infraestrutura experimental. Conclui-se que a digestão anaeróbia pode representar uma alternativa sustentável para o setor sucroalcooleiro, contribuindo para a redução de impactos ambientais e para o aproveitamento energético de resíduos industriais.

Palavras-chaves: Vinhaça. Biogás. Digestão anaeróbia. Setor sucroalcooleiro. Sustentabilidade.

## **ABSTRACT**

Vinasse is one of the main liquid wastes generated in the sugarcane and ethanol industry, characterized by its high organic load and polluting potential. On the other hand, it presents a promising substrate for anaerobic digestion, enabling the generation of biogas and contributing to the energy recovery of agro-industrial waste. This study aimed to evaluate biogas production from sugarcane vinasse on a laboratory scale, analyzing different inoculum proportions and three pH conditions 6, 7, and 8. Tests were conducted in experimental biodigesters, monitored by attached balloons to verify gas generation. The physicochemical characterization of the vinasse confirmed its viability as a substrate, while practical tests showed greater evidence of production in biodigesters maintained at pH 8. However, balloon ruptures compromised continued monitoring, resulting in inconclusive data on biogas yield and composition. Even given these limitations, the study reinforces the potential of vinasse as a raw material for renewable energy generation, highlighting the importance of pH control for process stability and the need for improvements in experimental infrastructure. The study concludes that anaerobic digestion can represent a sustainable alternative for the sugar and ethanol industry, contributing to the reduction of environmental impacts and the energy recovery of industrial waste.

**Keywords:** Vinasse. Biogas. Anaerobic digestion. Sugar and ethanol industry. Sustainability.

## LISTA DE TABELA

Tabela 1: Composição da vinhaça de acordo com tipo de mosto.....	15
Tabela 2: Lista de materiais e quantidade .....	24
Tabela 3: Planejamento experimental para amostras.....	28
Tabela 4: Valores encontrados na vinhaça in natura .....	38

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação das etapas do processo de biodigestão anaeróbica .....	18
Figura 2: Seringa adaptada .....	26
Figura 3:Esquema das garrafas .....	27
Figura 4: Coleta do esterco bovino .....	29
Figura 5: Pesagem do inóculo .....	29
Figura 6: Amostra de vinhaça.....	30
Figura 7:Análise de condutividade da vinhaça in natura .....	31
Figura 8: Análise de PH da vinhaça in natura .....	31
Figura 9: Viscosímetro capilar.....	33
Figura 10: Correção de PH da Vinhaça.....	34
Figura 11:Amostra de vinhaça em Ph 6,7 e 8.....	34
Figura 12: Suporte para biodigestores .....	35
Figura 13: Garrafas prontas para posicionamento .....	36
Figura 14: Garrafas posicionadas .....	36
Figura 15: Mergulhão aquecedor.....	37
Figura 16: Controlador de temperatura .....	37
Figura 17: Amostra no dia 10/09/2025 .....	40
Figura 18: Amostra 5 .....	41
Figura 19: Amostra 6 .....	42
Figura 20: Amostra 7 .....	42
Figura 21: Amostra 8 .....	42
Figura 22:Estado final do experimento .....	43

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AGVs- ácidos graxos voláteis

CBIOs- créditos de descarbonização

CE- Condutividade Elétrica

CH<sub>4</sub> – Metano

CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono

DA- Digestão anaeróbia

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO- Demanda química de oxigênio

H<sub>2</sub> – Hidrogênio

H<sub>2</sub>S – Sulfeto de hidrogênio

HRT- tempo de retenção hidráulica

MJ/m<sup>3</sup> – Megajoule por metro cúbico

N<sub>2</sub> – Nitrogênio

NH<sub>3</sub> – Amônia

NTU – Unidade Nefelométrica de Turbidez

O<sub>2</sub> – Oxigênio

OLR- taxa de carga orgânica

PAG- potencial de aquecimento global

pH – Potencial Hidrogeniônico

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1 Justificativa .....	12
<b>1.2 OBJETIVOS</b> .....	<b>13</b>
1.2.1 <i>Objetivo Geral</i> .....	13
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	13
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>14</b>
2.1 Vinhaça.....	14
2.2 Biogás.....	15
2.3 Digestão Anaeróbia .....	16
2.3.1 Fases da Digestão Anaeróbia.....	17
2.4 Classificação e Legislação sobre a vinhaça .....	18
2.5 Esterco Bovino.....	19
2.6 Fatores de Inibição e Limitação da produção do Biogás.....	19
2.7 Fatores que influenciam as bactérias anaeróbicas .....	20
2.7.1 Temperatura.....	20
2.7.2 PH .....	21
2.7.3 Inoculante e fase de arranque.....	21
2.8 Aplicações do Biogás .....	22
2.9 Vantagens Ambientais e Energéticas .....	23
2.9.1 Vantagens Ambientais.....	23
2.9.2 Vantagens Energéticas.....	23
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>24</b>
3.1 Lista de Materiais .....	24
3.2 Montagem dos Biodigestores de Bancada.....	25
3.2.1 Preparação das Garrafas .....	25
3.2.2 Vedação e adaptação da tampa .....	26
3.2.3 Verificação de vazamentos .....	26
3.3 Planejamento Experimental .....	27
3.4 Carregamento dos biodigestores .....	28
3.4.1 Inóculo.....	28
3.4.2 Vinhaça.....	29

3.4.3	Caracterização da Vinhaça .....	30
3.4.4	Identificação e posicionamento dos Biodigestores de Bancada.....	35
3.4.5	Controle de temperatura .....	36
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>38</b>
4.1	Caracterização da vinhaça e resultados obtidos .....	38
4.1.2	Cálculo da Viscosidade Relativa .....	38
4.1.3	Avaliação da Produção de Biogás .....	40
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>44</b>
<b>6.</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>45</b>

## 1. INTRODUÇÃO

No mundo atual moderno, os desafios relacionados à recuperação energética representam algumas das maiores questões políticas, sociais e ambientais. Entre os setores que mais têm buscado soluções para esse problema está o de geração de energia, impulsionado pelo constante aumento da demanda energética ao longo dos anos.

No cenário mundial, o Brasil figura como um dos maiores consumidores e produtores de energia. Em 2017, o país foi classificado como nono maior consumidor, com aproximadamente 2,2% do consumo mundial de energia – segundo relatório de BP (2018), e em 2016, como sétimo maior produtor de energia primária (Iea, 2018). Dentre as fontes de energias renováveis se encontra o biogás que é um gás resultante da fermentação anaeróbia (em ausência de oxigênio livre do ar) da matéria orgânica. Resíduos vegetais e dejetos de animais, como suínos, aves e bovinos de leite, podem ser tratados com sucesso em biodigestores, produzindo biogás e biofertilizante (subproduto do processo), reduzindo o poder poluente que o despejo in natura dos resíduos causa ao meio ambiente (Embrapa, 2021).

A vinhaça, principal resíduo do processo de destilação, é um efluente marrom escuro, composto por 93% de água e 7% de matéria orgânica e minerais (Sica et al., 2020a). Embora seja utilizada como fertilizante para substituir os fertilizantes potássicos nas lavouras de cana-de-açúcar (Sica et al., 2020b). No contexto brasileiro, a vinhaça principal efluente líquida da produção de etanol destaca-se como resíduo de elevado potencial energético. Para cada litro de etanol produzido, podem ser gerados entre 10 a 13 litros de vinhaça, caracterizada por alta carga orgânica, acidez e presença de nutrientes como potássio e enxofre (Ferraz Júnior et al., 2022). Esse subproduto, se descartado sem tratamento adequado, ocasiona sérios problemas ambientais, incluindo contaminação de solos e águas subterrâneas (Kiani et al., 2022).

Com isso, a adoção de tecnologias como a Digestão Anaeróbia está ganhando força no Brasil e mais pesquisas são imperativas para otimizar essas práticas. Sica et al. (2020b) demonstraram que a concentração da vinhaça pode aumentar a eficiência da DA, destacando sua dependência da demanda química de oxigênio (DQO) e da taxa de carga orgânica (OLR). Além disso, a composição da vinhaça muda ao longo da época de colheita, podendo causar variações na carga do digestor ao longo do ano (Godoi et al., 2019).

Muitos são os fatores que influenciam na capacidade de produção de biogás a partir da vinhaça, tais como temperatura, pH, composição da vinhaça, tipo de reator, qualidade e

quantidade de inóculo, entre outros (Baldacin; Pinto, 2015). Para que haja um processo eficiente é necessário o conhecimento prévio desses parâmetros e quanto esse processo é delicado.

Portanto, investigar as correlações entre a composição inicial da vinhaça e a produção de biogás é crucial para prever a produção potencial de metano e otimizar esse processo.

## 1.1 Justificativa

Este trabalho tem como foco a avaliação do potencial energético da vinhaça de cana-de-açúcar submetida à digestão anaeróbia em reatores de bancada, com ajuste de pH em três níveis distintos. O estudo busca compreender como a variação do pH influencia a produção de metano e, conseqüentemente, a geração de biogás e créditos de descarbonização (CBIOS). Para isso, foram realizados experimentos que envolveram a caracterização físico-química da vinhaça, o monitoramento do processo de digestão anaeróbia e a análise cromatográfica dos gases gerados ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{H}_2$ ). Dessa forma, pretende-se identificar a condição ótima de operação, avaliando a eficiência de conversão energética em cada nível de pH testado, e apontar estratégias para a valorização da vinhaça como fonte renovável de energia.

Além da variação do pH, também foram testadas diferentes proporções entre o inóculo e a vinhaça, a fim de verificar a influência dessa relação sobre a estabilidade e a eficiência do processo. A escolha do pH como variável principal de estudo deve-se ao fato de que esse parâmetro exerce papel fundamental na atividade microbológica durante a digestão anaeróbia. O pH influencia diretamente as fases de acidogênese, acetogênese e metanogênese, podendo favorecer ou inibir os microrganismos responsáveis pela produção de metano. Assim, compreender o comportamento do sistema em diferentes faixas de pH permite otimizar as condições operacionais e maximizar a geração de biogás, tornando o processo mais eficiente e economicamente viável para aplicação em escala industrial.

## **1.2 OBJETIVOS**

### ***1.2.1 Objetivo Geral***

Avaliar a produção de biogás a partir da vinhaça de cana-de-açúcar submetida à digestão anaeróbia em reatores de bancada, sob variação do PH, concentração de vinhaça e inóculo, por meio de análises físico-químicas e cromatográficas dos gases gerados (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e H<sub>2</sub>).

### ***1.2.2 Objetivos Específicos***

- Realizar a caracterização físico-química da vinhaça in natura;
- Monitorar e montar o processo de Digestão Anaeróbia em reatores de bancada;
- Identificar e quantificar os principais gases produzidos (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e H<sub>2</sub>) por cromatografia gasosa;
- Realizar um planejamento experimental para investigar o efeito da variação da vinhaça e do inóculo, bem como o ajuste das faixas de pH (6, 7 e 8), para geração de biogás;
- Avaliar a eficiência de conversão energética em cada faixa de pH testada.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Vinhaça

A vinhaça é o principal resíduo líquido gerado na etapa de destilação do etanol a partir da cana-de-açúcar. Para cada litro de etanol produzido, são gerados entre 10 e 15 litros de vinhaça, o que evidencia o grande volume desse subproduto e a necessidade de estratégias adequadas para sua gestão (Balakrishnan, 2024). A composição da vinhaça pode variar conforme o tipo de cana, processo industrial e etapa de colheita mas geralmente contém sólidos dissolvidos, ácidos graxos voláteis (AGVs), matéria orgânica biodegradável e compostos fenólicos (Oliveira et al., 2023). Esses elementos favorecem sua utilização como substrato na digestão anaeróbia para produção de biogás. Sua composição pode variar de acordo com o tipo de matéria-prima utilizada caldo de cana, melação ou misturas e com a tecnologia empregada na produção do etanol (Ferraz Júnior et al., 2022). Historicamente, a vinhaça tem sido utilizada na agricultura por meio da fertirrigação, devido ao seu potencial de substituir fertilizantes minerais, especialmente os potássicos. Contudo, o uso contínuo e sem critérios técnicos pode provocar efeitos adversos, como salinização e compactação do solo, alteração da microbiota, lixiviação de nutrientes e contaminação de águas superficiais e subterrâneas (Laime et al., 2011; Godoi et al., 2019). Além disso, quando descartada de forma inadequada, a vinhaça contribui para problemas ambientais como eutrofização de corpos hídricos, emissão de gases de efeito estufa e degradação da qualidade ambiental (Cruz-Salomón et al., 2016).

A tabela 1 mostra a composição química média da vinhaça obtida do mosto de caldo de cana, do mosto de melação e da mistura de ambos.

Tabela 1: Composição da vinhaça de acordo com tipo de mosto

<b>Parâmetros</b>	<b>M. do Caldo</b>	<b>M. do Melaço</b>	<b>Misto</b>
<b>pH</b>	3,7 – 4,6	4,2 – 5,0	4,4 – 4,6
<b>Temperatura</b>	80 – 100	80 – 100	80 – 100
<b>DBO (mg/l)</b>	6.000–16.500	25.000	19.800
<b>DQO (mg/l)</b>	15.000-33.000	65.000	45.000
<b>Sólidos totais (mg/L)</b>	23.700	81.500	52.700
<b>Sólidos voláteis (mg/L)</b>	20.000	60.000	40.000
<b>Sólidos fixos (mg/L)</b>	3.700	21.500	12.700
<b>Nitrogênio (mg/L N)</b>	150-700	450-1.610	480-710
<b>Fósforo (mg/L P)</b>	10-210	100-290	9-200
<b>Potássio (mg/L K)</b>	1.200-2.100	3.740-7.830	3.340-4.600
<b>Cálcio (mg/L CaO)</b>	130 – 1.540	450 – 5.180	1.340–4.600
<b>Magnésio (mg/L MgO)</b>	200 – 490	420-1.520	580-700
<b>Sulfato (mg/L SO4)</b>	600-760	6.400	3.700-3.730
<b>Carbono (mg/L C)</b>	5.700-13.400	11.200-22.900	8.700-12.100
<b>Relação C/N</b>	19,7-21,7	16-16,27	16,4-16,43
<b>Matéria orgânica (mg/L)</b>	19.500	63.000	3.800
<b>Substancias reductoras (mg/L)</b>	7.900	9.500	8.300

Fonte: Adaptada de Michael et al., 1994.

## 2.2 Biogás

O biogás é um combustível gasoso renovável resultante da digestão anaeróbia da matéria orgânica, processo em que consórcios microbianos decompõem compostos complexos na ausência de oxigênio. Esse processo ocorre em quatro etapas principais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, sendo esta última responsável pela formação do

metano ( $\text{CH}_4$ ), o principal componente energético do biogás (Silva, 2025; Britto, 2021). A composição típica do biogás inclui 50% a 75% de metano ( $\text{CH}_4$ ), 25% a 45% de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e pequenas quantidades de gases como hidrogênio ( $\text{H}_2$ ), sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ), nitrogênio ( $\text{N}_2$ ), oxigênio ( $\text{O}_2$ ) e amônia ( $\text{NH}_3$ ) (Britto, 2021; Silva, 2025). O teor de metano é determinante para o seu poder calorífico, que varia entre 20 e 25  $\text{MJ/m}^3$ , tornando o biogás comparável ao gás natural em termos energéticos (Silva, 2025). A produção de biogás a partir de resíduos agroindustriais apresenta vantagens ambientais e econômicas. Do ponto de vista ambiental, promove a redução da carga poluente de efluentes como a vinhaça, além de contribuir para a mitigação de gases de efeito estufa ao capturar o metano que seria emitido diretamente na atmosfera (Belhamidi et al., 2024). Economicamente, possibilita a recuperação de energia e a diversificação da matriz energética com uma fonte renovável e descentralizada.

O uso do biogás é bastante versátil: pode ser empregado na geração de energia elétrica e térmica, no aquecimento industrial, como combustível veicular (após purificação para biometano) e até injetado em redes de gás natural (Silva, 2025). Além disso, o subproduto do processo, o digestato, é rico em nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio, podendo ser utilizado como biofertilizante (Britto, 2021). Diversos fatores influenciam o rendimento do biogás, como a composição do substrato, a carga orgânica aplicada, a temperatura, o tempo de retenção hidráulica (HRT) e o pH. Estudos recentes indicam que a faixa de pH próxima à neutralidade (6,5–7,5) favorece a atividade das bactérias metanogênicas, aumentando a eficiência do processo (Belhamidi et al., 2024).

Dessa forma, o biogás configura-se como uma alternativa estratégica para o setor sucroenergético brasileiro, especialmente pela abundância de vinhaça e outros resíduos da cadeia produtiva da cana-de-açúcar, reforçando sua importância na transição energética e no cumprimento de metas de sustentabilidade.

### 2.3 Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia (DA) é um processo biológico no qual a matéria orgânica é degradada por microrganismos em ambiente sem a presença de oxigênio livre, resultando principalmente na formação de biogás e de um efluente estabilizado conhecido como digestato que é o subproduto do processo (Chernicharo, 2007; Silva, 2025). Esse processo é amplamente aplicado no tratamento de resíduos agroindustriais, urbanos e dejetos animais, devido ao seu potencial de reduzir a carga poluidora dos efluentes e, ao mesmo tempo, gerar energia renovável (Britto, 2021).

### **2.3.1 Fases da Digestão Anaeróbia**

A digestão anaeróbia ocorre em quatro etapas interdependentes, conduzidas por consórcios microbianos específicos, cada um é responsável por transformar diferentes compostos da matéria orgânica:

#### **2.3.1.1 Hidrólise**

Nesta etapa inicial, macromoléculas complexas, como carboidratos, proteínas e lipídios, são quebradas em compostos mais simples e solúveis (açúcares, aminoácidos e ácidos graxos de cadeia longa). Essa fase é considerada muitas vezes a etapa limitante do processo, já que a velocidade da degradação depende da natureza e da complexidade do substrato (Chernicharo, 2007; Silva, 2025).

#### **2.3.1.2 Acidogênese**

Os produtos da hidrólise são convertidos por bactérias acidogênicas em ácidos graxos voláteis (AGVs), etanol, lactato, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e hidrogênio ( $\text{H}_2$ ). Essa fase é marcada pela redução do pH do meio, devido ao acúmulo de AGVs, o que pode comprometer a estabilidade do processo se não houver tamponamento adequado (Kunz et al., 2019; Britto, 2021).

#### **2.3.1.3 Acetogênese**

Nessa etapa, os AGVs de cadeia mais longa, como propionato e butirato, são transformados em acetato,  $\text{H}_2$  e  $\text{CO}_2$ . Esses produtos são essenciais para a próxima fase, uma vez que mais de 70% do metano produzido na digestão anaeróbia tem origem no acetato (Gerardi, 2003). Esse equilíbrio entre bactérias acetogênicas e metanogênicas é fundamental para evitar o acúmulo de intermediários tóxicos.

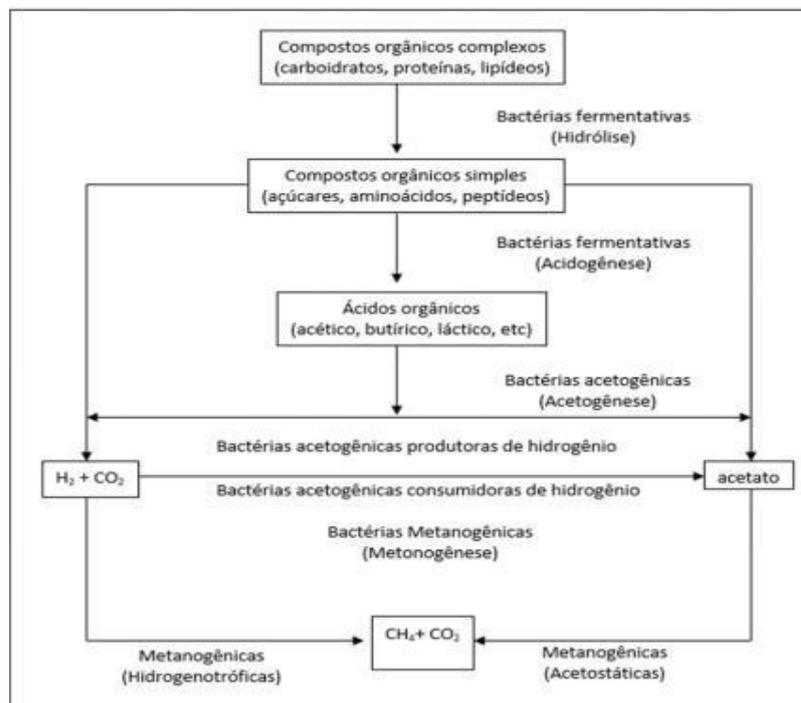
#### **2.3.1.4 Metanogênese**

Na última etapa, microrganismos metanogênicos convertem o acetato, o  $H_2$  e o  $CO_2$  em metano ( $CH_4$ ). Essa fase é a principal responsável pela formação do biogás, geralmente composto por 55–70% de  $CH_4$  e 30–45% de  $CO_2$  (Belhamidi et al., 2024). As arqueias metanogênicas são extremamente sensíveis a variações de pH, temperatura e presença de substâncias inibidoras, o que exige condições controladas para o bom desempenho do processo. Essas quatro fases garante o funcionamento contínuo e estável da digestão anaeróbia.

Contudo, qualquer desequilíbrio em uma delas pode comprometer a produção de biogás e a eficiência geral do sistema. Por isso, fatores como pH, temperatura, tempo de retenção e carga orgânica aplicada devem ser cuidadosamente monitorados (Silva, 2025; Britto, 2021).

A Figura 1 representa, esquematicamente, as etapas do processo de digestão anaeróbica:

Figura 1: Representação das etapas do processo de biodigestão anaeróbica



Fonte: BALDACIN e PINTO, 2015

#### 2.4 Classificação e Legislação sobre a vinhaça

Segundo a norma ABNT NBR 10004, a vinhaça é classificada como um resíduo sólido classe II-A, não perigoso e não inerte, devido à ausência de um tratamento convencional que

permita seu lançamento em corpos hídricos. Em relação à legislação sobre sua disposição, a Portaria n.º 323 do antigo Ministério do Interior, de 29/11/1978, determinou que, a partir da safra 1979/1980, ficaria proibido o lançamento direto ou indireto da vinhaça em qualquer coleção hídrica, por parte das destilarias de álcool já existentes ou futuras no Brasil.

Além disso, em 2005, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) publicou a Resolução n.º 357, de 17 de março de 2005, a qual dispõe sobre a classificação dos corpos de água, diretrizes para seu enquadramento e estabelece condições e padrões para o lançamento de efluentes.

## 2.5 Esterco Bovino

O esterco bovino apresenta características específicas que o tornam como substrato na digestão anaeróbia (Ribeiro et al., 2020). Com DQO típico de 15-20 g/L, pH próximo ao neutro (6,5-7,5) e relação C/N entre 20-30, o esterco bovino oferece condições balanceadas para o crescimento microbiano (Ribeiro et al., 2020; Cruz et al., 2016). O conteúdo de sólidos totais varia entre 8-15%, sendo 70-85% constituído por sólidos voláteis (Ribeiro et al., 2020).

A composição do esterco bovino é influenciada pela alimentação dos animais e pelo sistema de manejo adotado (Orrico Junior et al., 2017). Animais criados sob sistema convencional, com alimentação baseada em concentração e ração comercial, produzem dejetos com maior potencial de produção de biogás comparativamente aos sistemas orgânicos baseados exclusivamente em forragens (Orrico Junior et al., 2017). A produtividade típica do esterco bovino fresco situa-se em 0,04 m<sup>3</sup> de biogás por kg de substrato (SBPE, sd).

## 2.6 Fatores de Inibição e Limitação da produção do Biogás

Diversos fatores podem limitar ou inibir a atividade microbiana na digestão anaeróbia de vinhaça e esterco bovino (Moraes; Zaiat; Bonomi, 2015).

A presença de compostos fenólicos na vinhaça, originados da degradação térmica de açúcares durante a destilação, pode exercer efeitos inibitórios sobre microrganismos metanogênicos (Moraes; Zaiat; Bonomi, 2015).

Concentrações de sulfato superiores a 2 g/L podem promover atividade de bactérias redutoras de sulfato, competindo com metanogênicos por substratos comuns (Moraes; Zaiat; Bonomi, 2015).

O acúmulo de ácidos graxos voláteis, particularmente ácidos propiônico e butírico, representa outro fator limitante comum (Cavaleiro; Alves, 2020). Este desequilíbrio resulta frequentemente de sobrecargas orgânicas ou condições inadequadas de pH e temperatura (Cavaleiro; Alves, 2020).

A presença de amônia em concentrações elevadas, especialmente em sistemas processando altas proporções de esterco bovino, pode igualmente inibir a metanogênese (Cruz et al., 2016).

## 2.7 Fatores que influenciam as bactérias anaeróbicas

Abaixo estarão listados fatores de influenciam diretamente no crescimento e funcionamento dos micro-organismos fermentativos mediante a produção do Biogás e que foram utilizadas durante o desenvolvimento do planejamento fatorial.

### 2.7.1 *Temperatura*

A temperatura de digestão anaeróbia é um parâmetro essencial no processo de biodigestão, pois influencia diretamente a eficiência da conversão da matéria orgânica em biogás, além de impactar os procedimentos operacionais e os custos da planta. De acordo com Kiepper (2023), a digestão anaeróbia pode ser classificada em três faixas térmicas principais: psicofílica, mesofílica e termofílica.

A digestão psicofílica, conduzida em temperaturas inferiores a 25 °C, apresenta baixo rendimento de biogás, já que a atividade microbiana é reduzida. Nessa condição, não há necessidade de sistemas de aquecimento, o que diminui os custos, porém a taxa de degradação da matéria orgânica é significativamente inferior às demais faixas (Tabatabaei; Ghanavati, 2018).

Na digestão mesofílica, realizada entre 25 °C e 42 °C, a produção de biogás é mais eficiente em comparação ao processo psicofílico. Essa faixa demanda pouca energia térmica para manter a estabilidade do sistema e não exige materiais especiais para a construção do reator, o que a torna a mais utilizada em plantas de biodigestão.

A digestão termofílica ocorre em temperaturas superiores a 45 °C, geralmente entre 50 °C e 60 °C. Nessa condição, a taxa de degradação da matéria orgânica é mais elevada, resultando em maior produção de biogás e em tempos de retenção hidráulica reduzidos quando comparada às demais faixas.

Além disso, essa faixa de temperatura favorece a destruição de patógenos e a higienização do digestato. Contudo, o processo apresenta algumas desvantagens, como maior demanda energética para manutenção térmica, maior instabilidade operacional e necessidade de materiais mais resistentes para a construção do reator (Tabatabaei; Ghanavati, 2018).

De acordo com Wellinger, Murphy e Baxter (2013), a hidrólise promovida por microrganismos mesofílicos ocorre de forma mais eficiente em pH entre 5,2 e 6,3, com temperatura ideal de 25 °C a 35 °C. Já a etapa de metanogênese apresenta maior eficiência em pH entre 6,7 e 7,5, com temperatura adequada variando de 32 °C a 42 °C.

### **2.7.2 PH**

O pH representa o grau de acidez ou alcalinidade de uma substância, classificando-a como ácida, neutra ou básica. No processo de biodigestão, esse parâmetro é determinante para o desempenho microbiano e, conseqüentemente, para a produção de biogás. Os microrganismos fermentativos apresentam capacidade de adaptação a variações de pH entre 4 e 8,5; entretanto, as arqueas metanogênicas são muito mais sensíveis, atuando de forma eficiente apenas em uma faixa estreita, entre 6,7 e 7,5 (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2022).

Dessa forma, para que o biogás produzido apresente alto poder calorífico, ou seja, elevada concentração de metano, é fundamental que o pH do meio seja mantido dentro desse intervalo ideal. Contudo, durante a digestão anaeróbia, é comum ocorrer acúmulo de ácidos graxos voláteis, o que tende a reduzir o pH do sistema e comprometer a estabilidade do processo.

A correção dessa acidificação pode ser realizada por meio da adição de agentes tamponantes, tais como hidróxido de sódio (NaOH), bicarbonato de potássio (KHCO<sub>3</sub>), bicarbonato de sódio (NaHCO<sub>3</sub>) e carbonato de sódio (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), que ajudam a restabelecer o equilíbrio do meio e garantir a eficiência da produção de metano (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2022).

### **2.7.3 Inoculante e fase de arranque**

Para assegurar uma produção eficiente de biogás, o biodigestor deve ser previamente inoculado com microrganismos responsáveis pelo processo de digestão anaeróbia. O esterco bovino é considerado um dos melhores inoculantes, especialmente quando diluído em proporção 1:1 com água, pois confere maior capacidade de tamponamento à mistura e reduz o risco de acidificação (Da Silva, 2021).

Em termos de volume, recomenda-se que a quantidade mínima de esterco utilizada na inoculação corresponda a 10% da capacidade total do biodigestor. Contudo, o uso de volumes maiores tende a favorecer a adaptação microbiana e acelerar o processo (Vögeli et al., 2014).

Após a inoculação, inicia-se a chamada fase de arranque, que dura em média de duas a quatro semanas. Nesse período inicial, o gás predominante é o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Com a estabilização gradual da comunidade microbiana, observa-se um aumento progressivo na concentração de metano ( $\text{CH}_4$ ), que pode atingir valores entre 55% e 70% do volume total de biogás, tornando-o adequado para aplicações energéticas, como a cocção de alimentos.

## 2.8 Aplicações do Biogás

- **Geração de energia elétrica:** O biogás é composto principalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), sendo utilizado como combustível para geração de energia elétrica e térmica. Pode ser queimado diretamente em motores de combustão interna para acionar geradores elétricos, aproveitando a energia mecânica para produção de eletricidade, frequentemente utilizada em propriedades rurais e industriais. O calor gerado pela queima do biogás pode ser utilizado para aquecimento de ambientes, processos industriais, secagem de produtos agrícolas ou produção de vapor em caldeiras (MONGABAY, 2021).
- **Combustível veicular e Gás natural:** Após purificação para remoção de  $\text{CO}_2$  e impurezas, o biogás pode ser convertido em biometano, equivalente ao gás natural. O biometano pode ser injetado na rede de gás natural ou utilizado como combustível para veículos em substituição ao diesel ou gasolina, promovendo maior sustentabilidade no transporte (PNBW, 2024).
- **Aplicações Agrícolas:** Na agricultura, o biogás fornece tratamento de resíduos orgânicos como ester bovino, resíduos vegetais e vinhaça, reduzindo os impactos ambientais do descarte inadequado. O processo anaeróbio gera, além do biogás, o digestato que é um biofertilizante rico em nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio, que pode ser aplicado diretamente no solo, promovendo a melhoria da fertilidade e redução do uso de fertilizantes químicos (JORNAL UNICAMP, 2025).
- **Tratamentos de resíduos e Saneamento Ambiental:** O uso de biodigestores auxilia no tratamento de resíduos orgânicos urbanos e industriais, minimizando a poluição ambiental. O reaproveitamento desses resíduos gera energia e contribui para o saneamento ambiental, transportando a carga orgânica em corpos hídricos e reduzindo a transferência de metano para a atmosfera (ENERGIA NA AGRICULTURA, 2022).

Com todas essas alternativas possíveis para sua utilização, torna que o Biogás é um método viável e prático para implementação.

## 2.9 Vantagens Ambientais e Energéticas

### 2.9.1 Vantagens Ambientais

- Redução das Emissões de Gases de Efeito Estufa:

A digestão anaeróbia de resíduos orgânicos como vinhaça, esterco bovino e resíduos urbanos converte o carbono presente na matéria orgânica em metano capturado no biogás. Isso reduz a emissão direta de metano para a atmosfera, um gás com potencial de aquecimento global (PAG) muito superior ao dióxido de carbono. Além disso, ao substituir combustíveis fósseis no uso energético, o biogás contribui para a redução líquida das emissões de gases de efeito estufa (Moraes; Zaiat; Bonomi, 2015).

- Controle da Poluição de águas e solos:

O tratamento dos resíduos pela digestão anaeróbia diminui a carga orgânica e microbiológica dos efluentes, reduzindo o risco de contaminação de corpos d'água e do solo. O digestato produzido é um fertilizante orgânico com menor potencial poluente que os resíduos brutos, favorecendo práticas agrícolas (Unicamp, 2025).

- Valorização de Resíduos e da Economia:

O processo promove a valorização energética e agrícola de resíduos que seriam descartados de forma convencional, evitando a poluição ambiental. Isso contribui para a economia circular, com reaproveitamento de subprodutos e redução da necessidade de insumos químicos (Energia na Agricultura, 2022).

### 2.9.2 Vantagens Energéticas

- Geração de Energia Renovável e Descentralizada:

O biogás é uma fonte de energia renovável que pode ser gerada localmente, perto do centro de consumo, reduzindo perdas no transporte e aumentando a eficiência energética. Ele pode ser convertido em energia elétrica, térmica ou biometano para uso veicular, ampliando as opções de matrizes energéticas sustentáveis (Gnpw, 2024).

- Diversificação da Matriz Energética:

A incorporação do biogás amplia a diversidade das fontes energéticas, reduzindo a

dependência de combustíveis fósseis e aumentando a segurança energética nacional. Isso é especialmente importante para regiões rurais e indústrias agropecuárias (Mongabay, 2021).

- Potencial para integração em sistemas de Cogeração:

O biogás pode ser utilizado em sistemas de cogeração (produção conjunta de eletricidade e calor), aumentando a eficiência global do aproveitamento energético e promovendo menor consumo de energia externa em processos industriais (Palotina, 2020).

Contudo, pode-se dizer que o processo de produção e uso do biogás promove redução significativa dos impactos ambientais negativos ao mesmo tempo em que oferece uma fonte de energia renovável, flexível e eficiente, com potencial de contribuição para o desenvolvimento sustentável e a segurança energética.

### **3 METODOLOGIA**

O experimento, em escala laboratorial, foi realizado no Laboratório de Tecnologia Sucroalcooleira (LTS), e as análises para caracterização da vinhaça foram feitas no laboratório de Operações Unitárias (LPOU) ambos do Departamento de Tecnologia em Produção Sucroalcooleira, da Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

A vinhaça utilizada nos ensaios foi gentilmente doada por uma usina localizada no estado de Pernambuco. O efluente utilizado era proveniente de mosto misto, resultante da fermentação de caldo de cana-de-açúcar e melaço, característica comum em usinas que operam com diferentes matérias-primas ao longo da safra.

O inóculo (esterco bovino) foi coletado no Sítio Estivas, que fica localizado na zona rural, da cidade de Natuba na Paraíba.

#### **3.1 Lista de Materiais**

Para a montagem do sistema experimental utilizado nos ensaios, foi necessário reunir os materiais e equipamentos descritos na tabela 2.

Tabela 2: Lista de materiais e quantidade

<b>Materiais</b>	<b>Quantidade</b>
Bolas de sopro 16"	12 unidades (2pct)
Kit 10 Válvula E Tampa Bico Para Câmara de Bicicleta	11 unidades
Garrafas de plástico 1 litro com tampa	11 unidades
Tinta spray preta	01 unidade
Abraçadeiras de Nylon	pct com 100 unidades
Seringa de 60 mL luer lock	cx com 50 unidades
Torneirinha 3 vias luer lock estéril terapia venosa	11 unidades
Bico de bomba de ar	01 unidade
cola de silicone	01 unidade
suporte de madeira para garrafas	01 unidade
banho maria	-----
balança analítica	-----
béquero	-----
suporte universal	01 unidade
fita veda rosca	01 unidade
Mergulhão	01 unidade

Fonte: Autor 2025.

## 3.2 Montagem dos Biodigestores de Bancada

### 3.2.1 *Preparação das Garrafas*

- As garrafas foram pintadas externamente com tinta spray para evitar a entrada de luz e, conseqüentemente, a inibição da atividade microbiana, conforme mostrado na Figura 3;
- Logo após, na parte superior de cada garrafa foi realizada uma abertura para fixação de uma válvula de câmara de bicicleta, utilizando cola de silicone para vedação, onde permitiria a coleta do Biogás.

A Figura 2 representa a Seringa com o bico adaptado com a valvula de três vias para a coleta do gás.

Figura 2: Seringa adaptada



Fonte: Autor, 2025.

### ***3.2.2 Vedação e adaptação da tampa***

- As tampas e lacres originais foram retirados;
- A rosca da boca da garrafa foi revestida com fita veda-rosca, permitindo melhor acoplamento e vedação;
- Em seguida, foi acoplada uma bola de 16” para o armazenamento do biogás, sendo fixada firmemente com abraçadeira de nylon.

### ***3.2.3 Verificação de vazamentos***

- Cada garrafa foi pressurizada com ar por meio de uma bomba manual de pneu;
- As garrafas, já acopladas às bolas, foram imersas em um balde com água para verificação da presença de bolhas, indicando possíveis pontos de vazamento;
- Nos casos em que houve escape de ar, as correções de vedação foram refeitas.

Figura 3:Esquema das garrafas



Fonte: Autor 2025.

Logo após os testes de vedação e identificação das garrafas com número das amostras, foi feita a pesagem das frações de inóculo e ajuste de PH das frações de vinhaça para cada uma de acordo com o planejamento fatorial.

### 3.3 Planejamento Experimental

O planejamento fatorial apresentado na tabela 3, tem como objetivo avaliar a influência da concentração de vinhaça, do percentual de inóculo e do pH da vinhaça sobre o processo de biodigestão.

Para isso, foi estruturado um delineamento experimental considerando diferentes combinações desses fatores, de forma a identificar os efeitos principais e possíveis interações entre as variáveis. Foram estabelecidos limites inferiores (20%), superiores (80%) e ponto central (50%) tanto para a vinhaça quanto para o inóculo, além da variação do pH da vinhaça em três níveis (6, 7 e 8). Esse arranjo experimental possibilita uma análise sistemática e eficiente, fornecendo dados consistentes para compreender a resposta do sistema em cada condição testada.

Tabela 3: Planejamento experimental para amostras

<b>Amostra</b>	<b>%Vinhaça</b>	<b>%Inóculo</b>	<b>PH vinhaça</b>	<b>%Vinhaça</b>	<b>(ml)Vinhaça</b>	<b>%Inóculo</b>	<b>(g)Inóculo</b>
<b>1</b>	20	20	6	0,2	100 ml	0,2	40 g
<b>2</b>	80	20	6	0,8	400 ml	0,2	40 g
<b>3</b>	20	80	6	0,2	100 ml	0,8	160 g
<b>4</b>	80	80	6	0,8	400 ml	0,8	160 g
<b>5</b>	20	20	8	0,2	100 ml	0,2	40 g
<b>6</b>	80	20	8	0,8	400 ml	0,2	40 g
<b>7</b>	20	80	8	0,2	100 ml	0,8	160 g
<b>8</b>	80	80	8	0,8	400 ml	0,8	160 g
<b>9 ©</b>	50	50	7	0,5	250 ml	0,5	100 g
<b>10 ©</b>	50	50	7	0,5	250 ml	0,5	100 g

Fonte: Autor 2025.

### 3.1 Carregamento dos biodigestores

#### **3.4.1 Inóculo**

Foram coletados 2 kg de esterco bovino fresco da raça Nelore no dia 05/09/25 conforme a Figura 4, dos quais 1 kg foi destinado à preparação e pesagem das amostras. O material não passou por processo de diluição, sendo diretamente pesado como mostrado na Figura 5 e posteriormente introduzido no biodigestor, conforme a sequência estabelecida na Tabela 3.

Figura 4: Coleta do esterco bovino



Fonte: Autor 2025.

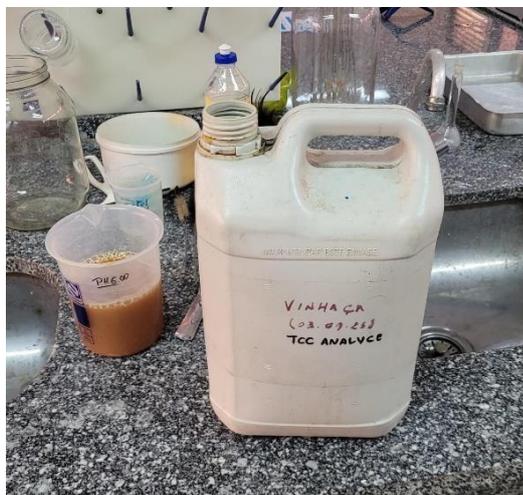
Figura 5: Pesagem do inoculo



### **3.1.1 Vinhaça**

A vinhaça foi coletada no dia 03/09/2025, sendo cedidos 10 litros, dos quais foram utilizados 5 litros representado na Figura 6, já considerando a margem de erro. Inicialmente, realizou-se a caracterização in natura, por meio das análises descritas a seguir. Em seguida, a amostra foi dividida em frações, ajustadas para pH 6, 7 e 8, utilizando solução de hidróxido de sódio a 13%. Após a correção, as frações foram distribuídas conforme apresentado na Tabela 3.

Figura 6: Amostra de vinhaça



Fonte: Autor 2025.

### 3.1.2 Caracterização da Vinhaça

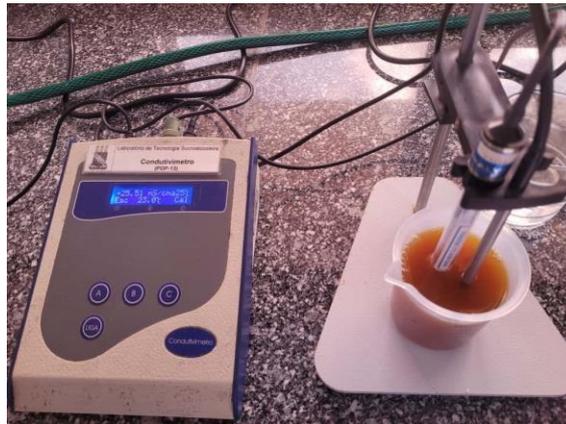
A caracterização da vinhaça é necessária porque se trata de um resíduo líquido resultante da destilação do etanol e apresenta composição variável, dependendo da matéria-prima utilizada, do processo de fermentação e do tipo de destilação. Essa variabilidade torna essencial conhecer suas propriedades físico-químicas antes de qualquer forma de reaproveitamento ou disposição.

#### 3.1.2.1 Condutividade Elétrica (CE)

A condutividade elétrica se refere à capacidade que uma solução aquosa possui em conduzir corrente elétrica. Esta capacidade depende basicamente da presença de íons, da concentração total, mobilidade, valência, concentrações relativas e medidas de temperatura. Soluções da maior parte dos ácidos, bases e sais inorgânicos são relativamente boas condutoras. Já as moléculas de compostos orgânicos que não dissociam em solução aquosa, em sua maioria, conduzem pouca corrente elétrica. A condutividade é medida por condutivímetro e é expressa em  $\mu\text{S cm}^{-1}$  ou  $\text{mS/cm}^{-1}$  (Embrapa,2011).

A leitura da amostra foi feita diretamente no condutivímetro digital ilustrado na Figura 7, e previamente foi feita a limpeza da sonda com água destilada.

Figura 7: Análise de condutividade da vinhaça in natura



Fonte: Autor 2025.

### 3.1.2.2 Potencial Hidrogeniônico (PH)

O termo pH (potencial hidrogeniônico) é uma grandeza que varia de 0 a 14 e indica a intensidade da acidez ( $\text{pH} < 7,0$ ), neutralidade ( $\text{pH} = 7,0$ ) ou alcalinidade ( $\text{pH} > 7,0$ ) de uma solução aquosa. É uma das ferramentas mais importantes e frequentes utilizadas na análise de líquidos (Embrapa, 2011).

A leitura foi feita diretamente com um pouco da amostra da vinhaça in natura, com o pHmêtro digital como ilustrado na Figura 8, previamente calibrado e a sonda higienizada com água destilada.

Figura 8: Análise de PH da vinhaça in natura



Fonte: Autor 2025.

### 3.1.2.3 Turbidez

A turbidez é uma expressão da propriedade óptica que faz com que a luz seja espalhada e absorvida e não transmitida em linha reta através da amostra (Embrapa, 2011.)

A turbidez foi determinada pelo método nefelométrico, utilizando-se um turbidímetro previamente calibrado com soluções-padrão fornecidas pelo fabricante. A amostra foi homogeneizada e transferida para cubetas adequadas, cuidando para evitar bolhas de ar que poderiam interferir no resultado. Em seguida, as cubetas foram posicionadas no equipamento e realizou-se a leitura direta em unidades nefelométricas de turbidez (NTU).

Na análise realizada a turbidez ultrapassou a faixa de calibração, as amostras foram devidamente diluídas com proporção ¼.

### 3.1.2.4 Viscosidade

Viscosidade é a resistência interna que um fluido oferece ao escoamento, caracterizando o atrito interno entre as moléculas do líquido ou gás. Essa propriedade determina como o fluido flui sob a aplicação de forças, influenciando diretamente a dinâmica do movimento dos fluidos (Almeida; Silva, 1995).

A viscosidade foi medida pelo Método de Ostwald que consiste em medir o tempo que um líquido leva para passar por um tubo capilar fino sob ação da gravidade. O aparelho tem um reservatório menor conectado a outro maior por esse tubo representado na Figura 9. Como as dimensões internas do capilar são difíceis de medir diretamente, o viscosímetro é calibrado com um líquido de viscosidade conhecida, como a que foi usada água destilada, para encontrar uma constante de calibração. Logo após, com o viscosímetro calibrado, foi medido o tempo de escoamento da amostra de interesse neste caso, a vinhaça e calcula sua viscosidade com base na calibração feita com a água.

A equação 1 representa o cálculo da viscosidade relativa:

Equação 1: Viscosidade Relativa

$$\eta_{relativa} = \frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{\rho_1 t_1}{\rho_2 t_2}$$

Fonte: Autor 2025.

Onde:

$\eta_{\text{relativa}}$  = Viscosidade relativa

$\eta_1$  = Viscosidade da água destilada

$\eta_2$  = Viscosidade da vinhaça

$\rho_1$  = Densidade da água destilada ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_2$  = Densidade da vinhaça ( $\text{kg/m}^3$ )

$t_1$  = Tempo de escoamento da água destilada (s)

$t_2$  = Tempo de escoamento da vinhaça (s)

Figura 9: Viscosímetro capilar



Fonte: Autor 2025.

### 3.1.2.5 Massa Específica

Massa específica, que também é chamada de densidade, é a razão entre a massa de uma substância e o volume que ela ocupa. Em termos simples, ela indica quanta matéria existe em um determinado espaço. A massa específica é uma propriedade intensiva muito importante na análise e caracterização de fluidos e sólidos, pois influencia fenômenos físicos como o escoamento, a pressão e a transferência de calor.

Para análise foi utilizado o densímetro digital, de forma direta com uma fração da amostra in natura de vinhaça.

A figura 10 mostra a correção de PH realizada na vinhaça in natura.

Figura 10: Correção de PH da Vinhaça



Fonte: Autor 2025.

Na Figura 11 temos as mostras das vinhaças corrigidas com Ph 6,7 e 8

Figura 11: Amostra de vinhaça em Ph 6,7 e 8



Fonte: Autor 2025.

### **3.1.3 Identificação e posicionamento dos Biodigestores de Bancada**

Logo após todas as garrafas terem sido preenchidas com a fração de inóculo e Vinhaça, de acordo com a Tabela 3. Logo após foi feito seu fechamento com toda vedação citada no item 4.2.2 e em seguida, o ar presente no espaço superior das garrafas foi removido manualmente, pressionando a garrafa para expulsar o ar pela válvula até atingir o vácuo parcial necessário ao processo.

Todas as garrafas foram devidamente numeradas e identificadas de acordo com a Figura 13;

Em seguida, foram fixadas em um suporte de madeira, de forma individual e organizada como mostra na Figura 12

Figura 12: Suporte para biodigestores



Fonte: Autor 2025.

Figura 13: Garrafas prontas para posicionamento



Fonte: Autor 2025.

A Figura 14 apresenta as garrafas já acondicionadas no banho-maria para o experimento.

Figura 14: Garrafas posicionadas



Fonte: Autor 2025.

### ***3.1.4 Controle de temperatura***

- Os biodigestores foram mantidos submersos em água até metade de seu volume ou, seja até uns 500 ml;
- O aquecimento foi realizado por meio de um mergulhão como demonstra na Figura 15, e de um controlador de acordo com a Figura 16, que manteve a temperatura Mesofílica média de 35 °C, com variação entre 34,5 e 35 °C, para manter a atividade microbiana.

Figura 15: Mergulhão aquecedor



Fonte: Autor 2025.

Figura 16: Controlador de temperatura



Fonte: Autor 2025.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização da vinhaça e resultados obtidos

Na Tabela 4 encontra-se os valores das análises da Caracterização da vinhaça.

Tabela 4: Valores encontrados na vinhaça in natura

Análises	Resultados
Temperatura	23,0 (°C)
PH	4,42
Viscosidade	0,75
Turbidez	706 (NTU)
Massa Especifica	1,025 (g/cm <sup>3</sup> )
Condutividade	25,51 (mS/cm <sup>2</sup> )

Fonte: Autor 2025.

#### 4.1.2 Cálculo da Viscosidade Relativa

Para isso foi utilizado Equação 1

$$\eta_{relativa} = \frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{\rho_1 t_1}{\rho_2 t_2}$$

Dados encontrados:

Densidade da água = 0,9973(g/cm<sup>3</sup>)

Densidade da Vinhaça= 1,025 (g/cm<sup>3</sup>)

tempo da água= 57,89 segundos

tempo da vinhaça= 75 segundos

Então teremos:

$$\eta_{relativa} = \frac{0,9973 \times 57,89}{1,025 \times 75}$$

$$\eta_{relativa} = 0,75$$

A caracterização físico-química da vinhaça in natura (Tabela 4) evidencia propriedades condizentes com aquelas descritas na metodologia.

A temperatura registrada (23,0 °C) indica que a amostra encontrava-se em equilíbrio com o ambiente no momento da análise, uma vez que a vinhaça recém-saída do processo de destilação apresenta temperaturas superiores, podendo alcançar valores próximos a 80 °C (Cortez et al., 2010).

O pH obtido (4,42) confirma o caráter ácido da vinhaça, o que se deve à presença de ácidos orgânicos e compostos residuais da fermentação alcoólica. Esse parâmetro, comumente observado entre 3,5 e 5,0, reforça a necessidade de tratamento ou neutralização antes do descarte, a fim de evitar impactos ambientais adversos em corpos receptores (Fuess; Garcia, 2014).

A massa específica da vinhaça foi de 1,025 g/cm<sup>3</sup>, superior à da água, o que está de acordo com valores relatados na literatura (1,01 a 1,05 g/cm<sup>3</sup>). Esse resultado indica maior concentração de sais minerais e matéria orgânica dissolvida.

Quanto à condutividade elétrica, o valor obtido foi de 25,51 mS/cm<sup>2</sup>, o que está em consonância com estudos prévios que apontam para a alta condutividade da vinhaça devido à presença significativa de íons dissolvidos, especialmente potássio, cálcio, magnésio e sódio (Fuess; Garcia, 2014; Moraes et al., 2015).

No que se refere à viscosidade (0,75), observou-se valor relativamente próximo ao da água, o que favorece o bombeamento e o transporte do efluente.

Já a turbidez apresentou-se elevada (706 NTU), sendo necessária a diluição prévia da amostra na proporção de 1:4 (amostra: água destilada) para que o turbidímetro pudesse realizar a leitura corretamente. Esse resultado confirma a elevada concentração de sólidos suspensos e coloidais na vinhaça, provenientes principalmente de compostos orgânicos residuais do processo fermentativo, partículas minerais e microrganismos (Moraes et al., 2015).

De modo geral, os resultados obtidos demonstraram que a vinhaça in natura apresentou características típicas de um efluente de elevada carga orgânica e mineral, de natureza ácida e assim, confirmando seu potencial poluidor quando descartada sem tratamento adequado, mas também evidenciando sua viabilidade como insumo energético como na produção de biogás ou agrícola com o uso como fertilizante, desde que aplicado de forma controlada.

#### 4.1.3 Avaliação da Produção de Biogás

Os experimentos tiveram um tempo estimado de retenção de 10 dias para a coleta do gás e assim a realização da análise de Cromatografia Gasosa.

Durante o monitoramento dos biodigestores representado pela Figura 17, observou-se que aqueles mantidos em pH 8, independente da concentração de vinhaça e inóculo, foram os que apresentaram maior evidência de geração de biogás, perceptível pelo enchimento visível dos balões acoplados. Esse comportamento foi registrado de forma contínua por aproximadamente quatro dias, indicando atividade metabólica consistente e produção efetiva de gás no período inicial do experimento. Entretanto, no quinto dia, constatou-se o esvaziamento completo dos balões, devido ao vazamento do biogás acumulado. Esse evento impossibilitou a continuidade do acompanhamento da produção e, conseqüentemente, comprometeu a obtenção de dados conclusivos sobre o rendimento e a estabilidade do processo, comprometendo a análise de cromatografia gasosa que seria realizada.

Dessa forma, ainda que tenha sido possível identificar indícios da eficiência do pH 8 para estimular a formação de biogás nos primeiros dias, a perda do conteúdo gasoso inviabilizou a análise detalhada do comportamento ao longo de todo o ensaio, tornando os resultados parciais e limitando a comparação com as demais condições testadas.

Figura 17: Amostra no dia 10/09/2025



Já no primeiro dia foi possível observar o início da ação microbiana fermentativa, evidenciada pela produção de gases característicos da primeira fase do processo, correspondente à etapa de hidrólise.

Nas amostras 5, 6, 7 e 8, foram observadas diferenças no desenvolvimento microbiano. Na amostra 7, composta por 100 ml de vinhaça e 160 g de inóculo, o crescimento microbiano foi menor em relação às demais amostras. Um dos fatores que pode ter ocorrido foi devido a quantidade de vinhaça que estava em menor proporção, oferecendo menos substrato para os microrganismos se desenvolverem adequadamente. Como resultado, a produção de gases foi inferior em comparação com as amostras que continham maiores proporções de vinhaça e um equilíbrio entre a quantidade de vinhaça e inóculo.

Além disso, o pH do meio também pode ter exercido influência no processo. Se não houver um bom efeito tamponante, principalmente durante a fase acidogênica, o meio tende a acidificar com a formação de ácidos voláteis. Esse aumento da acidez pode ter sido um fator limitante para as amostras com pH entre 6 e 7, dificultando o crescimento microbiano e reduzindo a produção de biogás.

Portanto, tanto a proporção entre inóculo e vinhaça quanto o controle adequado do pH são essenciais para garantir um desenvolvimento microbiano eficiente e maximizar a produção de biogás.

A Figura 18 representa a amostra 5 com uma condição em Ph 8, 100 ml de vinhaça e 40 g de Inóculo.

Figura 18: Amostra 5



Fonte: Autor 2025

A Figura 19 representa a amostra 6 com uma condição em Ph 8, 400 ml de vinhaça e 40 g de inóculo.

Figura 19: Amostra 6



Fonte: Autor 2025

A Figura 20 representa a amostra 7 com uma condição em Ph 8 ,100 ml de vinhaça e 160 g de inóculo.

Figura 20: Amostra 7



Fonte: Autor 2025

A Figura 21 representa a amostra 8 com uma condição em Ph 8, 400 ml de vinhaça e 160 g de inóculo.

Figura 21: Amostra 8



Fonte: Autor 2025

Devido à elevada concentração das amostras, os balões, conforme ilustrado na Figura 22, não suportaram a pressão interna, o que resultou em vazamentos e rompimentos em grande parte deles. Em virtude dessa situação, todos os balões foram submetidos a uma análise criteriosa, na qual foram preenchidos com água para identificar as causas dos rompimentos e fundamentar as conclusões. Durante essa inspeção, foram observadas pequenas perfurações visíveis a olho nu em 7 balões, indicando pontos específicos de fragilidade que contribuíram para os vazamentos e rompimentos apresentados.

Essa análise permitiu entender os pontos de fragilidade dos balões para evitar problemas similares em futuras experimentações.

Figura 22:Estado final do experimento



Fonte: Autor 2025.

## 5. CONCLUSÃO

A partir do trabalho desenvolvido, foi possível avaliar o potencial energético da vinhaça de cana-de-açúcar submetida à digestão anaeróbia em escala laboratorial, considerando diferentes proporções de inóculo, da concentração da vinhaça e três níveis de pH (6, 7 e 8). A caracterização físico-química da vinhaça in natura confirmou seu elevado potencial poluidor, mas também sua viabilidade como substrato para geração de biogás, devido à alta carga orgânica e presença de nutrientes.

Durante o experimento, observou-se que os biodigestores mantidos em pH 8 apresentaram maior evidência de produção de biogás nos primeiros dias, perceptível pelo enchimento dos balões acoplados. Entretanto, o curto tempo e rompimento dos balões comprometeram a continuidade do monitoramento, impossibilitando análises conclusivas de rendimento e cromatografia gasosa. Ainda assim, os resultados iniciais reforçam a importância do controle do pH, e da variação da concentração da vinhaça e Inóculo para estimular a atividade microbiana e a produção de metano.

Apesar das limitações, o estudo evidenciou o potencial da vinhaça como insumo energético, destacando a necessidade de melhorias na infraestrutura experimental, como a substituição de recipientes e balões por materiais mais resistentes e sistemas de medição mais precisos. Dessa forma, conclui-se que a digestão anaeróbia da vinhaça representa uma alternativa promissora para a produção de energia renovável, especialmente no setor sucroalcooleiro, contribuindo para a redução dos impactos ambientais e para a valorização de resíduos do processo produtivo de etanol.

Assim, este trabalho contribui para o avanço do conhecimento sobre a biodigestão de vinhaça em condições controladas e abre caminho para estudos futuros que busquem otimizar parâmetros operacionais, garantindo maior eficiência, confiabilidade e aplicabilidade em escala industrial.

## **5. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Substituir as garrafas de plástico por recipientes de vidro, tornando o sistema mais resistente à pressão e a possíveis rupturas.
- Para a coleta e monitoramento da produção de gases, substituir os balões por manômetros de pressão, garantindo medições mais precisas e reduzindo o risco de vazamentos.
- Ajustar a diluição do inóculo e da vinhaça, criando um meio de ação microbiana mais estável e resistente a variações de pH, favorecendo o desenvolvimento microbiano e a produção gasosa.

## REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério do Interior. Portaria n. 323, de 29 de novembro de 1978. Proíbe o lançamento de vinhaça em coleções hídricas. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, 30 nov. 1978.

CETESB. COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. P4.231: aplicação de vinhaça em solo agrícola. São Paulo, 2006.

CONAMA. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução n. 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, 18 mar. 2005.

BALAKRISHNAN, S. Vinasse management and utilization: recent trends and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 182, p. 113-145, 2024.

BALDACIN, M.; PINTO, L. F. R. *Biogás: fundamentos e aplicações*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2015.

BELHAMIDI, S. et al. Biogas production from agro-industrial residues: environmental and energy perspectives. *Journal of Cleaner Production*, v. 437, p. 140-155, 2024.

BELHAMIDI, S. et al. Biogás production from vinasse derived from ethanol manufacturing using a continuous stirred tank reactor pilot plant. *Desalination and Water Treatment*, v. 240, p. 216-224, 2021.

BRITTO, S. S. de. *Produção de biogás a partir da vinhaça*. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Produção Sucroalcooleira) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.

CAVALEIRO, Ana Júlia; ALVES, Marta Maria. Digestão anaeróbia. *Revista de Ciência Elementar*, v. 8, n. 4, 2020. Disponível em: <https://rce.casadasciencias.org/rceapp/art/2020/009/>. Acesso em: 19 set. 2025.

CHERNICHARO, C. A. de L. Reatores anaeróbios: princípios do tratamento biológico de águas residuárias. 2. ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2007.

CORTEZ, L. A. B. et al. Principais subprodutos da agroindústria canaveieira e sua valorização. Campinas: Editora Unicamp, 2010.

CRUZ, R. S. et al. Anaerobic co-digestion of dairy manure and crop residues: effects on methane yield and microbial community. *Renewable Energy*, v. 92, p. 307-314, 2016.

CRUZ-SALOMÓN, A. et al. Environmental impacts of vinasse disposal and treatment. *Environmental Technology*, v. 37, n. 4, p. 453-464, 2016.

DA SILVA, F. A. Biodigestores rurais: guia prático de implantação e manejo. Brasília: Embrapa, 2021.

EMBRAPA. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2. ed. Brasília: Embrapa, 2011.

EMBRAPA. Biogás: energia renovável para o campo. Brasília: Embrapa, 2021.

ENERGIA NA AGRICULTURA. O biogás e suas aplicações no meio rural. *Revista Energia na Agricultura*, v. 37, n. 2, p. 65-80, 2022.

ENERGIA NA AGRICULTURA. Co-digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos e dejetos de bovino leiteiro: obtenção e projeção dos resultados em um estudo de caso no município de Penápolis-SP. *Energia na Agricultura, Botucatu*, v. 37, n. 1, p. 23-38, 2022.

Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/energia/article/view/4087>

. Acesso em: 19 set. 2025.

FERRAZ JÚNIOR, A. D. N. et al. Potencial energético da vinhaça: desafios e oportunidades. *BioEnergy Research*, v. 15, p. 1190-1205, 2022.

FUESS, L. T.; GARCIA, M. L. Vinhaça: características, impactos ambientais e alternativas de uso. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 19, n. 2, p. 115-126, 2014.

GERARDI, M. H. *The microbiology of anaerobic digesters*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003.

GNPW. Biogas and biomethane represent a great energy potential for Brazilian agribusiness. [s. l.], 2024. Disponível em: <https://www.gnpw.com.br/en/biogas/biogas-and-biomethane-represent-a-great-energy-potential-for-brazilian-agribusiness/>. Acesso em: 19 set. 2025.

GODOI, L. A. et al. Seasonal variations in vinasse composition and its effects on anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, v. 289, p. 121-132, 2019.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *World Energy Outlook 2018*. Paris: IEA, 2018.

JORNAL UNICAMP. Vinasse and cattle waste produce biogas. Campinas, 29 jul. 2025. Disponível em: <https://jornal.unicamp.br/en/edicao/728/vinhaca-e-dejetos-de-gado-rendem-biogas/>. Acesso em: 19 set. 2025.

KIANI, M. et al. Environmental risks of vinasse disposal in sugarcane industries. *Journal of Environmental Management*, v. 312, p. 114-122, 2022.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. *Biodigestores: fundamentos e aplicações*. Concórdia: Embrapa, 2019.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. *Digestão anaeróbia de resíduos agropecuários: fundamentos e aplicações*. Concórdia: Embrapa, 2022.

KIEPPER, Leonardo Silveira. *Fatores de influência sobre o desempenho de biodigestor aplicado à pecuária bovina: eficiência energética como diretriz de projeto*. Vitória: Instituto Federal do Espírito Santo, 2023.

LAIME, E. M. O. et al. Impactos da fertirrigação com vinhaça em solos agrícolas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, n. 2, p. 208-214, 2011.

MICHAEL, A. et al. Composition and utilization of vinasse in sugarcane industries. *Sugar Tech*, v. 4, n. 2, p. 95-102, 1994.

MONGABAY. Biogas from animal manure improves life in Brazil's semi-arid Northeast. [s. l.], 18 jul. 2021. Disponível em: <https://news.mongabay.com/2021/07/biogas-from-animal-manure-improves-life-in-brazils-semi-arid-northeast/>. Acesso em: 19 set. 2025.

MONGABAY. Biogas as renewable energy: potentials and applications. *Mongabay Energy Reports*, 2021.

MORAES, Bruna Soares; ZAIAT, Marcelo; BONOMI, Antonio. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: challenges and perspectives. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

OLIVEIRA, C. A. et al. Phenolic compounds in vinasse and their environmental implications. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 30, p. 2467-2478, 2023.

ORRICO JUNIOR, M. A. P. et al. Influência da dieta animal na produção de biogás a partir de dejetos bovinos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 21, n. 8, p. 579-585, 2017.

PALOTINA (UFPR). Biogás. Palotina: UFPR, 2020. Disponível em: [https://palotina.ufpr.br/bioenergia/wp-content/uploads/sites/5/2018/05/Apresenta%C3%A7ao\\_Biogas\\_Palotina-C%C3%B3pia.pdf](https://palotina.ufpr.br/bioenergia/wp-content/uploads/sites/5/2018/05/Apresenta%C3%A7ao_Biogas_Palotina-C%C3%B3pia.pdf). Acesso em: 19 set. 2025.

PALOTINA. Biogás e cogeração: eficiência e sustentabilidade. *Revista Palotina de Energia*, v. 4, p. 35-47, 2020.

PLANO NACIONAL DE BIOMETANO E WASTE-TO-ENERGY. Biometano como combustível veicular: perspectivas para o Brasil. Brasília: PNBW, 2024.

RIBEIRO, T. S. et al. Caracterização e potencial energético do esterco bovino na digestão anaeróbia. *Revista de Energia Renovável*, v. 9, n. 1, p. 55-63, 2020.

SBPE. SOCIEDADE BRASILEIRA DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO. Potencial de produção de biogás no Brasil. São Paulo: SBPE, [s.d.].

SICA, D. et al. Vinasse concentration and anaerobic digestion performance. *Bioresource Technology*, v. 313, p. 123-137, 2020a.

SICA, D. et al. Valorization of vinasse through biogas production. *Renewable Energy*, v. 152, p. 1102-1113, 2020b.

SILVA, G. M. dos S. Simulação e avaliação do processo de tratamento e purificação do biogás de vinhaça por absorção química com aminas. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2025.

SILVA, J. P. Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos: parâmetros e aplicações. São Paulo: Edgard Blücher, 2025.

TABATABAEI, M.; GHANAVATI, H. *Bioenergy and biofuels: advances and applications*. Amsterdam: Elsevier, 2018.

VÖGELI, Y. et al. *Anaerobic digestion of biowaste in developing countries: practical guide*. Dübendorf: Eawag, 2014.

WELLINGER, A.; MURPHY, J.; BAXTER, D. *The biogas handbook: science, production and applications*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013.