



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS A.C SIMÕES
CENTRO DE TECNOLOGIA - CTEC
ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

BÁRBARA MESSIAS DA SILVA LIMA

**PRODUÇÃO DE BIOGÁS ATRAVÉS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA
DE ÁGUA RESIDUAL DE AGROINDÚSTRIAS**

Maceió - AL
2024

BÁRBARA MESSIAS DA SILVA LIMA

**PRODUÇÃO DE BIOGÁS ATRAVÉS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA
DE ÁGUA RESIDUAL DE AGROINDÚSTRIAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Lucena Cavalcante de Amorim.

Maceió - AL
2024

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária Myrtes Vieira do Nascimento CRB4/1680

L732p Lima, Bárbara Messias da Silva
Produção de biogás através da digestão anaeróbica de água residual de agroindústrias. / Bárbara Messias da Silva Lima - 2024.
55 f.; il.

Monografia de Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária – Universidade Federal de Alagoas, Campus Sertão, 2024.

Orientação: Dr. Eduardo Lucena Cavalcante de Amorim

Inclui bibliografia

1. Resíduos agroindustriais. 2. Produção de metano. 3. Biodigestão anaeróbica. I. Título.

CDU: 628

Folha de Aprovação

BÁRBARA MESSIAS DA SILVA LIMA

PRODUÇÃO DE BIOGÁS ATRAVÉS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA DE ÁGUA RESIDUAL DE AGROINDUSTRIAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Documento assinado digitalmente
 **EDUARDO LUCENA CAVALCANTE DE AMORIM**
Data: 06/01/2025 16:45:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

(Orientador(a) -Prof. Dr. Eduardo Lucena Cavalcante de Amorim)

Banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **MANOEL MARIANO NETO DA SILVA**
Data: 06/01/2025 18:01:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

(Examinador(a) Externo(a) - Prof. Dr. Manoel Mariano Neto)

Documento assinado digitalmente
 **DAYANA DE GUSMAO COELHO**
Data: 07/01/2025 16:10:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

(Examinador(a) Interno(a) - Prof^ª. Dr^ª. Dayana de Gusmão Coêlho)

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho ao meu pai de criação, **in memoriam**, à minha avó, à minha mãe e a toda minha família, que são a razão da minha perseverança. A vocês, devo tudo o que sou.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pela força, sabedoria e pela oportunidade de chegar até aqui. Foi Ele que me deu forças nos momentos mais desafiadores e clareza para seguir em frente, mesmo diante das dificuldades.

À toda minha família, minha base e maior fonte de inspiração, sou eternamente grata. Aos meus pais, Flávia Messias da Silva e Márcio Augusto Araújo Lima, por todo o amor, apoio incondicional e por acreditarem sempre nos meus sonhos, mesmo quando eles pareciam distantes. Ao meu pai de criação, Adson Santos Correia (in memoriam), pelo exemplo de bondade e força, que levarei comigo para sempre. À minha avó, Vera Lúcia Messias da Silva, pelo carinho e ensinamentos que sempre me guiaram.

Ao meu orientador Eduardo Lucena, agradeço profundamente pela paciência, pelas orientações precisas e pelas valiosas contribuições que enriqueceram não só este trabalho, mas também meu desenvolvimento pessoal e profissional. Sua dedicação e comprometimento foram essenciais para que eu conseguisse chegar até aqui, e cada ensinamento deixará um impacto duradouro em minha trajetória.

Aos colegas e amigos do curso, em especial ao grupo "5ª série", agradeço profundamente pelo companheirismo e por todas as experiências compartilhadas, que trouxeram leveza e motivação a essa caminhada. Em especial, deixo minha gratidão à Júlia, Talison e Klessia, que foram grandes amigos e apoio nos momentos mais importantes.

Às amigas de vida, Polianny e Marta, agradeço pelo carinho e amizade inabalável, que sempre foram um refúgio e um apoio em cada etapa dessa jornada. Aos meus amigos de estágio, em especial à Laura e Mariana, agradeço por todo o apoio, pelas trocas de conhecimento e pela parceria ao longo de todo o processo. Vocês foram fundamentais para o meu crescimento e aprendizado.

Aos meus supervisores, minha gratidão por todo o suporte e por me proporcionarem oportunidades de aprendizado que fizeram toda a diferença na execução deste trabalho.

Este trabalho representa o esforço coletivo e a união de todas essas forças. A cada um de vocês, deixo meu mais sincero agradecimento por terem sido parte essencial dessa conquista.

RESUMO

Devido ao desenvolvimento de diversas atividades agroindustriais, é gerada uma quantidade significativa de resíduos orgânicos que impactam os recursos naturais. Nesse contexto, a crescente demanda por métodos de energia sustentáveis tornou o metano uma fonte de energia altamente promissora e versátil. Uma das abordagens mais notáveis para aproveitar essa fonte energética é a produção biológica a partir de resíduos industriais e domésticos com alta concentração de matéria orgânica. Essa prática não apenas aborda preocupações ambientais, mas também promove a sustentabilidade e contribui para a segurança energética. Dentro desse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de produção de metano de três efluentes agroindustriais — manipueira, soro de leite e vinhaça — em reatores anaeróbios operados em batelada, utilizando o processo de digestão anaeróbia. A pesquisa visou identificar a eficiência de cada substrato na geração de biogás, considerando as condições específicas de operação dos reatores, com foco na viabilidade do aproveitamento desses resíduos como fontes sustentáveis de energia. Dessa forma, o estudo será organizado em quatro etapas distintas: 1) obtenção dos substratos - coleta dos resíduos utilizados; 2) caracterização dos resíduos - para avaliar as variáveis características dos substratos; 3) montagem do reator em batelada; 4) Análises físico-químicas e Cromatográficas - relacionar o efeito das variáveis, através de uma análise de componentes principais (PCA). Os experimentos foram realizados no Laboratório de Saneamento Ambiental da Universidade Federal de Alagoas (UFAL) para assim investigar a viabilidade técnica e ambiental dessa abordagem, considerando a eficiência na conversão de resíduos em biogás e a redução do impacto ambiental associado ao tratamento de águas residuais. Os resultados mostraram que o sistema é eficaz na conversão de manipueira, vinhaça, soro de leite em biogás e biofertilizante, oferecendo uma solução sustentável para o tratamento de resíduos. A produção diária de metano foi de aproximadamente 93,07 mL de CH₄ no Reator 1 e 141,87 mL de CH₄ no Reator 2, ambos alimentados com manipueira, após 7 dias de operação. Para a vinhaça, o Reator 2 apresentou uma produção de 55,12 mL/dia, enquanto o Reator 1 gerou 16,98 mL/dia, também em 7 dias de operação. No caso do soro de leite, a produção foi mais equilibrada, com o Reator 1 gerando 34,89 mL/dia e o Reator 2 gerando 28,37 mL/dia, após os 7 dias de operação. Esses resultados demonstram a capacidade do sistema de gerar energia renovável a partir de diferentes efluentes agroindustriais, considerando todos os reatores operando durante o mesmo período de 7 dias.

Palavras-chaves: Resíduos Agroindustriais, Produção de Metano, Biodigestão Anaeróbia, Água Residuária.

ABSTRACT

Due to the development of various agro-industrial activities, a significant amount of organic waste is generated which impacts natural resources. In this context, the growing demand for sustainable energy methods has made methane a highly promising and versatile energy source. One of the most notable approaches to harnessing this energy source is biological production from industrial and domestic waste with a high concentration of organic matter. This practice not only addresses environmental concerns, but also promotes sustainability and contributes to energy security. Within this context, the aim of this study was to evaluate the methane production potential of three agro-industrial effluents - manipueira, whey and vinasse - in batch anaerobic reactors using the anaerobic digestion process. The research aimed to identify the efficiency of each substrate in generating biogas, considering the specific operating conditions of the reactors, with a focus on the feasibility of using this waste as a sustainable source of energy. In this way, the study was organized into four distinct stages: 1) obtaining the substrates - collecting the waste used; 2) characterizing the waste - to evaluate the characteristic variables of the substrates; 3) setting up the batch reactor; 4) physicochemical and chromatographic analyses - relating the effect of the variables through a principal component analysis (PCA). The experiments were carried out at the Environmental Sanitation Laboratory of the Federal University of Alagoas (UFAL) in order to investigate the technical, economic and environmental viability of this approach, considering the efficiency of converting waste into biogas and reducing the environmental impact associated with wastewater treatment. The results showed that the system is effective in converting manipueira, vinasse and whey into biogas and biofertilizer, offering a sustainable solution for waste treatment. Daily methane production was approximately 93.07 mL of CH₄ in Reactor 1 and 141.87 mL of CH₄ in Reactor 2, both fed with manure, after 7 days of operation. For vinasse, Reactor 2 produced 55.12 mL/day, while Reactor 1 generated 16.98 mL/day, also after 7 days of operation. In the case of whey, production was more balanced, with Reactor 1 generating 34.89 mL/day and Reactor 2 generating 28.37 mL/day, after 7 days of operation. These results demonstrate the system's ability to generate renewable energy from different agro-industrial effluents, considering all the reactors operating for the same 7-day period.

Keywords: Agro-industrial waste, Methane production, Anaerobic biodigestion, Wastewater.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas do processo de biodigestão anaeróbia.....	18
Figura 2 - Fluxograma do processamento da mandioca em casa de farinha.....	22
Figura 4 - Fluxograma da metodologia em etapas.....	27
Figura 5 - Obtenção da manipueira na fábrica de farinha.....	28
Figura 6 - Curva de calibração para determinação de DQO.....	31
Figura 7 - Espectrofotômetro calibrado para 490 nm.....	32
Figura 8 - Curva de calibração para determinação de carboidratos.....	33

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Evolução da produção de mandioca no Brasil.....	20
Gráfico 2 - Produção brasileira de mandioca por região fisiográfica em 2022.....	21
Gráfico 3 - Comparação da Produção Volumétrica de Metano nos diferentes substratos.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção brasileira de mandioca em 2022.....	21
Tabela 2 - Tipos de produtos derivados de leite em relação ao seu volume de efluentes líquidos produzidos.....	25
Tabela 3 – Parâmetros físico-químicos analisados com seus respectivos equipamentos, métodos, reagentes, vidrarias e referências.....	34
Tabela 4 - Caracterização físico-química da manipueira em estado bruto.....	35
Tabela 5 - Caracterização físico-química da vinhaça em estado bruto.....	36
Tabela 6 - Caracterização físico-química do Soro de Leite em estado bruto.....	37
Tabela 7 - Caracterização do inóculo em estado bruto.....	37
Tabela 8 - Resultados obtidos de pH e DQO da manipueira nas amostras de entrada e saída dos reatores.....	38
Tabela 9 - Resultados obtidos de pH, Carboidratos e DQO da vinhaça nas amostras de entrada e saída dos reatores.....	39
Tabela 10 - Resultados obtidos de pH, Carboidratos e DQO do Soro de Leite nas amostras de entrada e saída dos reatores.....	41
Tabela 11 - Resultados obtidos de produção de metano com Manipueira dos reatores 01 e 02..	42
Tabela 12 - Resultados obtidos de produção de metano com Vinhaça dos reatores 01 e 02... 43	
Tabela 13 - Resultados obtidos de produção de metano com Soro de Leite dos reatores 01 e 02.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGV - Ácidos Graxos Voláteis

CH₄ - Metano

CO₂ - Dióxido de carbono

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

CHT - Carboidratos Totais

DQO - Demanda Química de Oxigênio

ETE - Estação de Tratamento de Esgoto

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

GEEs - Gases de Efeito Estufa

H₂ - hidrogênio

H₂O - Vapor d'água

H₂S - Sulfeto de Hidrogênio

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

LSA - Laboratório de Saneamento Ambiental

N - Nitrogênio

NH₃ - Amônia

P - Fósforo

PH - Potencial hidrogeniônico

ST - Sólidos Totais

STF - Sólidos Totais Fixos

STV - Sólidos Totais Voláteis

UFAL - Universidade Federal de Alagoas

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVOS.....	15
2.1 OBJETIVO GERAL.....	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
3.1 CENÁRIO CLIMÁTICO.....	15
3.2 DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	16
3.2.1 FATORES QUE INFLUENCIAM NA DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	18
3.3 SUBSTRATOS PARA DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	19
3.3.1 MANIPUEIRA.....	20
3.3.2 VINHAÇA.....	23
3.3.3 SORO DE LEITE.....	24
3.4 BIOGÁS.....	25
3.4.1 MODO OPERACIONAL DO REATOR.....	26
4. METODOLOGIA.....	27
4.1 OBTENÇÃO DOS SUBSTRATOS.....	27
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS SUBSTRATOS E INÓCULO.....	28
4.2.1 Potencial Hidrogeniônico (pH).....	29
4.2.2 Série de Sólidos (ST, SF, SV).....	29
4.2.3 Alcalinidade.....	30
4.2.4 Ácidos Voláteis.....	30
4.2.5 Demanda Química de Oxigênio.....	31
4.3 MONTAGEM DO REATOR EM BATELADA.....	33
4.4 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS E CROMATOGRÁFICAS.....	34
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
5.1 PRODUÇÃO DE METANO.....	41
7. CONCLUSÃO.....	44
8. REFERÊNCIAS.....	47

1. INTRODUÇÃO

Diante do nível de desenvolvimento tecnológico as consequências das ações humanas sobre o meio ambiente têm se tornado cada vez mais evidentes. O aumento da tecnologia está associado a maiores impactos ambientais, como o incremento na produção de gases de efeito estufa, decorrente da exploração de combustíveis fósseis. Esses gases, ao serem liberados na atmosfera, contribuem para o aquecimento global e para a ocorrência de fenômenos como a chuva ácida (Khanal et al., 2004).

Nesse contexto, a demanda crescente por fontes de energia sustentáveis e a necessidade de gerenciar os resíduos provenientes da agroindústria têm impulsionado a busca por soluções inovadoras e ecologicamente responsáveis. A interseção entre a crise energética e a conscientização ambiental reforça a urgência em desenvolver alternativas que não apenas atendam às demandas energéticas, mas também minimizem os impactos negativos no meio ambiente.

As práticas agropecuárias e agroindustriais têm assumido um papel proeminente no panorama econômico brasileiro. O progresso dessas atividades tem desempenhado um papel significativo no aumento da produção de resíduos (Baungratz et al., 2013). Conforme destacado por Kolling (2001), o setor agrícola está em constante expansão, impulsionado pelos avanços tecnológicos, os quais, por sua vez, demandam considerável consumo de energia.

Considerando o cenário atual, a questão dos resíduos industriais está diretamente relacionada ao desenvolvimento econômico, além da escassez de soluções sanitárias e ambientalmente responsáveis para a disposição final ou reutilização desses resíduos (Farage, et al., 2013). Diante dos resíduos gerados em grandes quantidades por indústrias de porte significativo e seu alto potencial poluente, o processo de produção de metano surge como uma forma de biorremediação para o estado de Alagoas. Destacam-se, nesse contexto, três principais setores industriais: a indústria da cana-de-açúcar, da mandioca e do leite.

A cana-de-açúcar, segundo os dados estatísticos da Sindaçúcar (2022), é responsável pela maior fatia do valor total da produção agrícola de Alagoas, chegando a produzir 18.227.493 toneladas na safra 2021-2022, assim, o Estado assume a posição de sexto maior produtor de cana-de-açúcar no país e o primeiro na região Nordeste.

Dentre os subprodutos e efluentes produzidos nos processos envolvendo a cana destaca-se a vinhaça para processos via fermentação. Sob essas circunstâncias, a vinhaça surge como o principal resíduo do processamento da cana-de-açúcar, resultante da produção de

álcool etílico por fermentação. Para cada litro de álcool etílico produzido, são gerados cerca de 10 a 15 litros de vinhaça (Cortez, 1992). Esse resíduo é caracterizado por elevado teor poluente e altíssimas concentrações de compostos orgânicos, o que o torna um substrato ideal para obtenção de metano por meio de digestão anaeróbia, gerando energia renovável.

Por outro lado, no contexto brasileiro, as regiões Norte e Nordeste destacam-se como as principais produtoras e consumidoras de mandioca, representando 35,6% e 21,4% da produção nacional, respectivamente. Essas regiões direcionam principalmente sua produção para o consumo alimentar, na forma de farinha ou tapioca. Por outro lado, nas demais regiões do país, as contribuições para a produção nacional são distribuídas de forma diferente: Sul (22,0%), Sudeste (13,0%) e Centro-Oeste (8,1%). Apesar disso, é nas regiões Sul e Sudeste que se verifica o maior rendimento por hectare na produção de mandioca, com 21,07 t/ha e 19,15 t/ha, respectivamente (Embrapa, 2022).

Com o intuito de reduzir a dependência de combustíveis fósseis não renováveis e atenuar os impactos decorrentes dessa prática, o substrato proveniente da produção de farinha apresenta-se como uma matéria-prima adequada para a geração de biogás por meio da digestão anaeróbia. Nesse processo, a manipueira é convertida em metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). O metano produzido por digestão anaeróbica pode ser uma importante fonte de energia renovável, podendo ser utilizado em diversas aplicações, incluindo geração de eletricidade e combustível veicular (Mata-Alvarez et al., 2014).

Dentre os diferentes resíduos que podem ser utilizados como matéria-prima para a produção de metano, o soro de leite possui uma potencialidade de aplicação elevada, pois possui uma alta capacidade de degradação anaeróbia e, mesmo sendo um subproduto da indústria de laticínios, existe um grande excedente de soro que não é utilizado, principalmente em unidades produtoras de pequeno e médio porte. Com uma produção de leite significativa em Alagoas, atingindo 603.808 mil litros, há uma oportunidade de explorar correlações entre essa atividade e a produção de metano (Embrapa, 2019).

Assim, este estudo teve como objetivo investigar o impacto da composição química de culturas energéticas, por meio da utilização de resíduos agroindustriais provenientes da região semiárida de Alagoas, como a vinhaça, a manipueira e o soro de leite, na produtividade de metano.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho avaliou o potencial de produção de metano a partir de três efluentes agroindustriais — manipueira, soro de leite e vinhaça — utilizando reatores anaeróbios em batelada. A pesquisa analisou a eficiência de cada substrato na geração de biogás, considerando as condições operacionais específicas do processo de digestão anaeróbia. O estudo destacou a viabilidade de aproveitamento desses resíduos como fontes sustentáveis de energia, contribuindo para o manejo adequado de efluentes e a geração de energia renovável.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar físico-quimicamente os substratos e o inóculo utilizado no processo;
- Analisar a composição do efluente gerado no reator anaeróbio em batelada para entender as transformações e a eficiência do processo anaeróbio;
- Avaliar o rendimento e a produção volumétrica de metano no reator anaeróbio.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 CENÁRIO CLIMÁTICO

As atividades humanas têm desempenhado um papel central no agravamento das mudanças climáticas, especialmente a partir da Revolução Industrial. Embora o efeito estufa seja um processo natural e vital para manter a temperatura da Terra em níveis adequados à vida, a concentração acelerada de gases de efeito estufa (GEEs) na atmosfera está provocando um aquecimento global ao qual os ecossistemas terrestres não conseguem se ajustar com rapidez suficiente (IPCC, 2021).

Adotar fontes de energia renováveis é fundamental para mitigar as emissões desses gases. Tecnologias mais limpas, como os biocombustíveis provenientes de recursos sustentáveis, representam uma solução viável para a redução da poluição atmosférica (Agência Internacional de Energia, 2022). O Brasil, com sua riqueza em recursos hídricos, amplas áreas agrícolas para a produção de biomassa e uma intensa irradiação solar em grande parte do território, possui grande capacidade para se destacar no cenário global como líder na transição para um modelo energético sustentável (Ministério de Minas e Energia, 2023).

No Brasil, conforme indicado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023), seu balanço energético nacional foi de 47,4% da oferta interna total de energia provinha de fontes renováveis. Dentre essas fontes, 15,4% foram provenientes de derivados da cana-de-açúcar, 12,5% da hidráulica, 9,0% de lenha e carvão vegetal, 7,0% de lixo e 3,5% de outras fontes renováveis, com maiores participações de biodiesel e outras biomassas. Esses números destacam o papel significativo das energias renováveis na matriz energética do país, demonstrando um passo positivo em direção à redução das emissões de gases de efeito estufa.

Neste contexto, Cortez (2008) ressalta a importância do aproveitamento energético da biomassa, que pode ser proveniente de uma variedade de fontes, como resíduos animais, vegetais, industriais e florestais. Além de gerar energia, a utilização da biomassa também pode impulsionar o desenvolvimento sustentável. O Brasil, nesse sentido, possui vantagens significativas no uso de energia limpa derivada da biomassa residual. No setor agropecuário, por exemplo, além da produção de bens comercializáveis, também são gerados subprodutos sem valor de mercado. A utilização desses resíduos não apenas reduz os impactos ambientais, mas também oferece uma nova fonte de atividade econômica, contribuindo para uma economia mais sustentável.

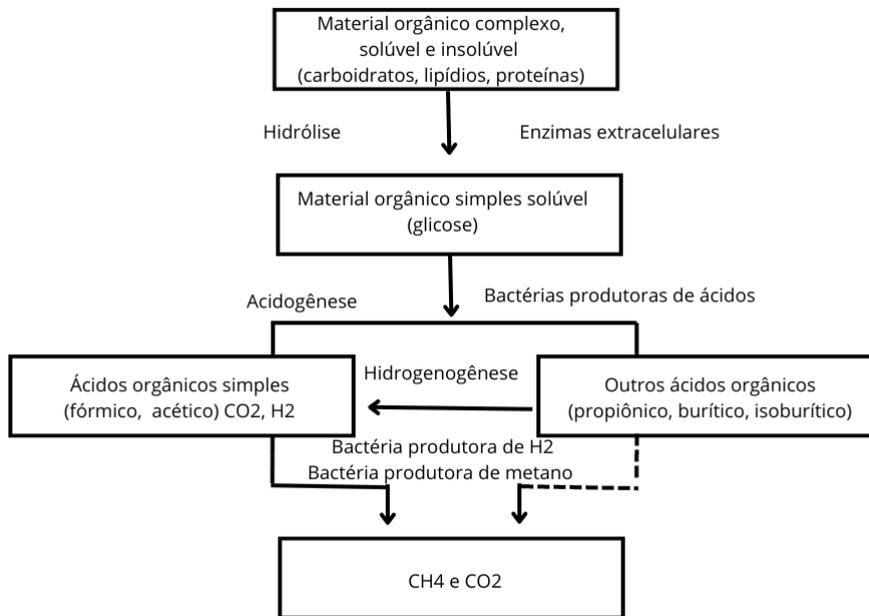
3.2 DIGESTÃO ANAERÓBIA

A digestão anaeróbia é um processo biológico de decomposição da matéria orgânica que ocorre na ausência de oxigênio, conduzido por uma comunidade diversificada de microrganismos, principalmente bactérias e arqueias. Um dos princípios básicos da digestão anaeróbia é a atividade de uma série de microrganismos que trabalham em conjunto para degradar a matéria orgânica (Chernicharo, 2007).

Angelidaki e Sanders (2004) ressaltam que "a digestão anaeróbica é conduzida por uma série complexa de processos microbiológicos em que vários grupos de microrganismos degradam a matéria orgânica em etapas sucessivas." Esse processo é dividido em várias etapas, tais como hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, cada uma executada por diferentes grupos de microrganismos. Os princípios básicos da digestão anaeróbica envolvem a decomposição da matéria orgânica através de quatro etapas principais:

1. *Hidrólise*: Nesta etapa inicial, as macromoléculas orgânicas complexas são quebradas em moléculas menores, como açúcares, aminoácidos e ácidos graxos, por meio da ação de enzimas extracelulares produzidas por microrganismos hidrolíticos. Esse processo torna os substratos orgânicos mais acessíveis aos microrganismos fermentativos.
2. *Acidogênese*: As moléculas orgânicas simples produzidas na etapa de hidrólise são então metabolizadas por microrganismos fermentativos, como bactérias acidogênicas, que convertem esses substratos em ácidos orgânicos de cadeia curta, como ácido acético, ácido propiônico e ácido butírico, além de outros compostos orgânicos como etanol e hidrogênio.
3. *Acetogênese*: Nesta fase, os ácidos orgânicos produzidos na etapa de fermentação são convertidos em ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono por bactérias acetogênicas. Esse processo é importante para a produção de metano na etapa seguinte.
4. *Metanogênese*: Na etapa final, microrganismos metanogênicos, como as arqueias metanogênicas, utilizam o ácido acético, o hidrogênio e o dióxido de carbono produzidos nas etapas anteriores para produzir metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), que constituem o biogás.

Figura 1 - Etapas do processo de biodigestão anaeróbia



Fonte: Adaptado de Mao et al. (2015)

Este processo é amplamente utilizado na produção de biogás a partir de diferentes fontes de matéria orgânica, como resíduos agrícolas, agroindustriais, urbanos e industriais, contribuindo para a geração de energia renovável e a redução dos impactos ambientais.

3.2.1 FATORES QUE INFLUENCIAM NA DIGESTÃO ANAERÓBIA

Os processos anaeróbios são sensíveis a variações ambientais, exigindo o controle dos fatores que impactam a atividade bacteriana no degradamento de resíduos orgânicos, o que é essencial para aprimorar a eficiência dos sistemas de tratamento. Conforme Bohrz (2010), a monitorização adequada desses fatores pode aprimorar a atividade bacteriana, resultando em uma maior produção de metano.

Dentre os fatores que influenciam a digestão anaeróbia, destacam-se o pH, a alcalinidade, os ácidos voláteis e a composição dos resíduos, incluindo a presença de nutrientes e a ausência de substâncias tóxicas. Angelidaki e Sanders (2004).

Durante o processo de digestão anaeróbia, diferentes grupos bacterianos atuam sequencialmente na degradação dos substratos, sendo crucial determinar o pH ideal para otimizar suas funções (Raposo, 2006). O pH do meio afeta a atividade enzimática e a disponibilidade de nutrientes para os microrganismos, sendo fundamental manter um pH

adequado, geralmente entre 6,5 e 7,5, para garantir a estabilidade do processo de digestão anaeróbia.

A alcalinidade do sistema desempenha um papel importante, já que níveis suficientemente elevados atuam como tampão de pH, prevenindo desequilíbrios causados pelo acúmulo de ácidos graxos voláteis (AGV), principal fator que influencia o pH nos processos anaeróbios (Bohrz, 2010). De acordo com Metcalf & Eddy (1991), a alcalinidade deve estar na faixa de 1000 a 5000 mg/L para o funcionamento adequado do processo, e a concentração de ácidos voláteis não deve exceder 250 mg/L.

Os ácidos voláteis são produtos intermediários da degradação da matéria orgânica durante a digestão anaeróbia. Esses ácidos, como o ácido acético, o ácido propiônico e o ácido butírico, podem se acumular no sistema se não forem consumidos pelos microrganismos. Um acúmulo excessivo de ácidos voláteis pode reduzir o pH do meio, inibir a atividade microbiana e comprometer a produção de biogás.

A composição dos resíduos orgânicos utilizados como substrato na digestão anaeróbia é um fator crucial que influencia a eficiência do processo. Resíduos com uma proporção equilibrada de carbono e nutrientes são mais propícios à degradação eficiente pelos microrganismos anaeróbios. Além disso, a presença de substâncias tóxicas, como metais pesados ou compostos químicos, pode inibir a atividade microbiana e comprometer o processo de digestão (MATA-ALVAREZ, 2003).

A temperatura é um dos parâmetros que mais influencia a estabilidade e o desempenho do processo da DA, uma vez que os microrganismos são bastantes sensíveis às variações de temperatura (Neshat et al., 2017). A DA é um processo que pode ocorrer em gamas de temperatura diferentes, tais como: gama termófila (45-65 °C), gama mesófila (25-45 °C) e gama psicrófila (10- 25 °C) (Mirzoyan et al., 2010).

3.3 SUBSTRATOS PARA DIGESTÃO ANAERÓBIA

O substrato do processo de digestão anaeróbia é, de forma geral, matéria orgânica, de origem vegetal ou animal, presente em resíduos da agricultura, pecuária, agroindústrias, indústrias alimentícias, indústrias de papel e celulose, cervejarias, resíduos urbanos orgânicos, entre outros (Feam, 2015).

Assim, vários materiais residuais podem e têm sido utilizados como substrato para as bactérias fermentativas na produção de metano, dentre esses, e que causam grandes impactos na região do semiárido alagoano, os resíduos de manipueira, vinhaça e soro do leite.

3.3.1 MANIPUEIRA

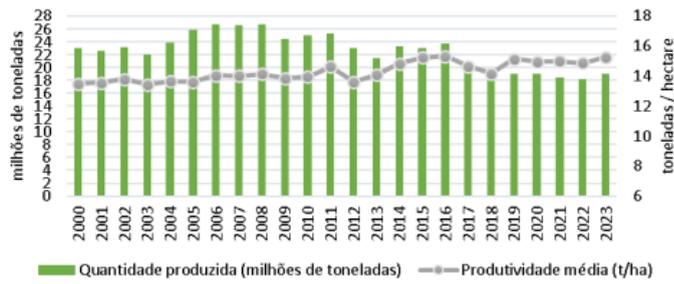
A mandioca (*Manihot esculenta*) é uma planta de grande importância econômica e cultural em muitas regiões tropicais e subtropicais do mundo, suas características como matéria-prima para a digestão anaeróbica são amplamente reconhecidas devido à sua abundância, composição química favorável e facilidade de cultivo.

A mandioca, amplamente reconhecida por seu elevado teor de amido, é uma excelente fonte de energia para os microrganismos no processo de biodigestão. Segundo Chakraborty e Newton (2011), essa cultura é uma das mais ricas em amido, apresentando concentrações que variam de 65% a 85% em peso seco, o que a torna um substrato altamente eficiente para a produção de biogás.

Além disso, a planta possui baixos teores de lignina e celulose, componentes da parede celular que são mais difíceis de degradar. Essa característica facilita a decomposição pelos microrganismos durante a digestão anaeróbia, resultando em maior geração de biogás quando comparada a materiais mais resistentes. Conforme observado por Inoue et al. (2008), a cultura oferece uma biomassa com baixo teor de fibra bruta, tornando-a mais suscetível à degradação microbiológica.

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) a produção estimada para o ano de 2023 é de 18,98 milhões de toneladas cultivadas numa área de 1,24 milhões de hectares.

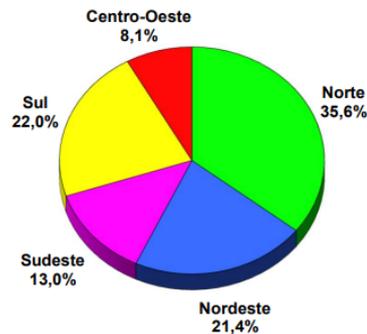
Gráfico 1 - Evolução da produção de mandioca no Brasil.



Fonte: CONAB (2023).

O Brasil é um dos maiores produtores dessa raiz, sendo as regiões Norte e Nordeste conhecidas por plantar a mandioca (Embrapa, 2022). Esse cultivo tem sua produção vegetativa feita por meio de ramas (manivas), podendo aproveitar tudo dessa planta, visto que a parte aérea é destinada a alimentação de animais, e a parte subterrânea, a raiz, que por sua vez é a parte mais importante, pois é rica em amido, tendo dessa forma um maior potencial econômico.

Gráfico 2 - Produção brasileira de mandioca por região fisiográfica em 2022.



Fonte: EMBRAPA (2022).

O Estado do Pará é o maior produtor de mandioca, correspondendo a 23,6% da produção agrícola, seguido pelo Estado do Paraná com 16,5%. Esses dados podem ser constatados na Tabela 1.

Tabela 1 - Produção brasileira de mandioca em 2022.

Estados	Área Colhida (ha)	Produção (t)	Rendimento (t/ha)
Pará	277.106	4.157.308	15,00
Paraná	122.923	2.906.873	23,65
São Paulo	61.156	1.427.939	23,35
Mato Grosso do Sul	43.070	957.446	22,23
Amazonas	74.114	767.634	10,36
Outros	603.113	7.431.364	12,32
Brasil	1.181.482	17.648.564	14,94

Fonte: EMBRAPA (2022).

A manipueira, subproduto do processamento da mandioca, pode ser eficaz e sustentável na produção de biogás. Gerada abundantemente em todas as regiões de cultivo e processamento da mandioca, é frequentemente associada a problemas de contaminação ambiental devido à falta de informação ou soluções para sua gestão (Souza; Cereda, 2003).

De acordo com Silva et al. (2019), a manipueira possui alto teor de matéria orgânica, o que a torna uma fonte rica para a produção de biogás por meio da digestão anaeróbia. Durante o processo de digestão anaeróbia, microrganismos degradam a matéria orgânica presente na manipueira em um ambiente sem oxigênio, produzindo biogás como subproduto. Além disso, de acordo com Santos et al. (2020), a utilização da manipueira na produção de biogás não apenas contribui para a geração de energia renovável, mas também oferece uma solução ambientalmente amigável para o tratamento de resíduos orgânicos.

As principais características da manipueira incluem pH baixo, açúcares, amidos, proteínas, linamarina, sais e cianeto, entre outros compostos (Duarte et al., 2012). Esses componentes podem ser responsáveis por toxinas que afetam células nervosas e o transporte de oxigênio no sangue (Santos, 2010). Considera-se que uma tonelada de mandioca pode gerar 300 litros de manipueira..

Nas casas de farinha, o processamento da mandioca (conforme ilustrado na Figura 2) envolve diversas etapas, que incluem: lavagem e descascamento, ralação, prensagem, esfarelamento, torrefação, empacotamento, e, por fim, pesagem e armazenagem. Durante esse processo, é gerado um resíduo líquido conhecido como manipueira, composto pela água utilizada na lavagem e na prensagem da mandioca.

Figura 2 - Fluxograma do processamento da mandioca em casa de farinha



Fonte: Autora (2024).

De acordo com Santos (2009), a forma mais comum de descarte da manipueira é o despejo direto nos corpos d'água e no ambiente circundante. Esse método de descarte inadequado frequentemente resulta na formação de enormes lagoas de resíduos, que não só representam um risco para a saúde pública devido às condições insalubres que criam, mas também afetam negativamente a economia local.

Essa prática não apenas representa um desperdício de recursos valiosos, mas também contribui para a degradação ambiental e para os problemas de saúde enfrentados pela população local (Campos et al., 2016). Trabalhos realizados, na cidade de Vitória da Conquista, região Sudeste da Bahia, revelam que o potencial poluidor e tóxico da manipueira “*in natura*” é cerca de 25 vezes o potencial poluidor do esgoto, quando lançado nas águas (rios, riachos e açudes) (Santos, 2009). O descontrole do potencial poluidor da manipueira provoca a poluição dos solos e das águas, causando grandes prejuízos ao meio ambiente e ao homem. Tais problemas podem ser solucionados, ou pelo menos minimizados, através da utilização de técnicas corretas de manejo e descarte deste resíduo.

Desta maneira, atualmente, a manipueira vem sendo vista como um subproduto passível de ser aproveitado em outras atividades, não só pela agressão ambiental que causa, mas também pelo fato de que os despejos indevidos dos subprodutos da mandioca constituem uma perda de rendimento para o produtor, quando se consideram as quantidades e composição das águas geradas na produção.

3.3.2 VINHAÇA

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com mais de 9,75 milhões de hectares como área cultivada e uma área colhida 8,34 milhões de hectares, produzindo mais de 578 milhões de toneladas de cana, o que coloca o País na liderança mundial em tecnologia de produção de etanol (Conab, 2023). Entre as safras 1993/1994 e 2003/2004 houve crescimento de aproximadamente 130% (Embrapa, 2022) está intimamente ligada à indústria sucroalcooleira, que é uma das mais importantes do país.

Na produção de álcool etílico a partir da cana-de-açúcar, a vinhaça é um subproduto importante e abundante. Ela é gerada durante a etapa de fermentação do caldo de cana para a produção de etanol. A vinhaça é um líquido de cor escura e possui uma composição rica em matéria orgânica e nutrientes, como potássio, fósforo e nitrogênio. São gerados nesse processamento cerca de 10 a 15 litros de vinhaça para cada litro de álcool etílico. Dentre os

principais resíduos da agroindústria da cana, a vinhaça é um efluente gerado em grande volume e detém alto potencial poluente (Cortez, 2010).

De acordo com dados do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA,2022), o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com mais de 9,75 milhões de hectares cultivados. A área colhida é de aproximadamente 8,34 milhões de hectares, resultando em uma produção anual de mais de 578 milhões de toneladas de cana.

A vinhaça ou vinhoto pode ser aproveitada como fertilizante e na produção de biogás, ou utilizada na pecuária como complemento protéico na ração animal. O tratamento adequado desse subproduto do caldo de cana-de-açúcar pode transformá-lo em um recurso valioso, permitindo seu uso como substrato para criação de gado, adubo para a terra e irrigação de pastos e plantações de cana.

A biodigestão anaeróbia da vinhaça surge como uma alternativa para a produção de biogás como fonte energética. Embora o processo de biodigestão não resolva o problema do alto teor de potássio na vinhaça obtida pelo processo convencional, ele reduz a carga orgânica, associada ao grande potencial poluente das águas superficiais, e diminui o odor, além de produzir um gás combustível (Santos et al., 2011).

Os impactos da aplicação da vinhaça variam de acordo com a composição química da vinhaça, volume e da periodicidade de aplicação. Para Piacente (2005), a alta concentração de vinhaça no solo e no lençol freático pode acarretar alta concentração de metais como magnésio, alumínio, ferro, cloreto, como também de matéria orgânica. Além disso, muitas usinas aplicam a vinhaça diretamente nas lavouras de cana-de açúcar, por meio da fertirrigação, e quando aplicada em altas dosagens pode introduzir no solo elementos e compostos solúveis em água, potencialmente poluentes, como K e NO₂ (Silva, 2007).

Outra questão a ser considerada é o odor desagradável associado à decomposição da matéria orgânica presente na vinhaça. Isso pode afetar a qualidade do ar e a qualidade de vida das comunidades próximas às usinas de produção de etanol, destacando a necessidade de soluções eficazes de tratamento e manejo (Melo et al., 2018).

3.3.3 SORO DE LEITE

O soro do leite consiste em um subproduto lácteo das indústrias de laticínios que é extraído da coagulação do leite no processo fabril de queijos. Via de regra, para cada quilo de queijo, são necessários 10 litros de leite, sendo que deste processo produtivo saem 9 litros de soro de leite (Moreira et al., 2010). De acordo com Ministério da Agricultura e Pecuária (2022), o Brasil é um dos maiores produtores de leite do mundo, com uma produção anual

que ultrapassa os 30 bilhões de litros. Com o crescimento da indústria láctea, a produção de soro de leite também tem aumentado significativamente.

De acordo com IBGE (2019), Alagoas se destaca como o principal produtor de leite no Nordeste, registrando uma produtividade anual de 2.410 litros por animal. Esse índice é o mais elevado da Região Nordeste e ultrapassa a média nacional, que é de 2.141 litros por animal.

A composição das águas residuais das indústrias de laticínios varia de acordo com o tipo de produto fabricado e o processo de fabricação. Geralmente, essas águas possuem um alto teor de matéria orgânica, óleos e graxas, sólidos suspensos, gorduras e nutrientes. Devido às elevadas cargas orgânicas, são consideradas significativos poluidores (Nunes et al., 2015). A tabela a seguir ilustra os volumes de efluentes líquidos produzidos por diferentes tipos de produtos derivados do leite:

Tabela 2 - Tipos de produtos derivados de leite em relação ao seu volume de efluentes líquidos produzidos.

Tipo de produto	Volume de efluentes líquidos (L/kg de leite processado)
Produtos “brancos” (Leite, Cremes e Iogurtes)	3
Produtos “amarelo” (Manteiga e Queijo)	4
Produtos “Especiais” (Concentrados de leite ou soro e produtos lácteos desidratados)	5

Fonte: Adaptado de Marques (2019).

Estudos apontam que cerca de 40% do soro do leite produzido no Brasil é descartado de forma inadequada, principalmente pelas pequenas e médias empresas (Marquardt et al., 2012) transformando-se em um rejeito industrial nocivo à natureza e causando alto impacto ambiental, pelos prejuízos à fauna e flora, isso porque sua Decomposição Bioquímica de Oxigênio (DBO) é de dez a 100 vezes maior que a do esgoto doméstico (Moreira et al., 2010; Paula et al., 2011).

Para as agroindústrias de laticínios esse tratamento está relacionado às suas águas residuais, que são todas as águas descartadas provenientes do processo de fabricação dos produtos, da lavagem de equipamentos e de outras atividades desenvolvidas, que não podem ser descartadas na rede pública de esgoto, nem em sistemas receptores sem o devido tratamento.

3.4 BIOGÁS

O uso de biocombustíveis, como o biogás, representa uma importante alternativa na busca por fontes de energia renovável e sustentável. O biogás é produzido a partir da decomposição de materiais orgânicos, como resíduos agrícolas, de alimentos e dejetos animais, em condições anaeróbias. Essa decomposição é realizada por microrganismos, que quebram a matéria orgânica em gases, principalmente metano e dióxido de carbono.

Para Lora e Venturini et al. (2012) o biogás é uma fonte de energia limpa, renovável e de baixo custo, sendo usado no mundo como uma fonte alternativa de energia com o intuito de reduzir o volume de lixo nos aterros sanitários, além de contribuir na redução de resíduos orgânicos descartados na natureza.

A produção biológica de metano é um processo complexo que ocorre naturalmente em diversos ambientes, como pântanos, aterros sanitários e tratamentos digestivos de animais. Esse processo envolve a ação de microrganismos anaeróbios, principalmente arqueias metanogênicas, que degradam matéria orgânica sob condições anaeróbias, produzindo metano como subproduto (Conrad, 2007).

Além disso, a produção de metano por meio de processos biológicos tem despertado interesse como uma fonte potencial de energia renovável. Segundo Chen et al. (2008), a biodigestão anaeróbia, um processo que envolve a decomposição de resíduos orgânicos por microrganismos anaeróbios para produzir biogás rico em metano, tem sido explorada como uma forma de aproveitar o metano gerado naturalmente a partir de resíduos agrícolas, industriais e domésticos.

A produção biológica de metano não apenas desempenha um papel importante no ciclo global do carbono, mas também oferece oportunidades para a geração de energia renovável a partir de fontes de resíduos orgânicos. Conforme ressaltado por Mata-Alvarez et al. (2014), o metano produzido por meio de processos biológicos pode ser uma importante fonte de energia renovável, contribuindo para diversificar a matriz energética e reduzir a dependência de combustíveis fósseis não renováveis.

3.4.1 MODO OPERACIONAL DO REATOR

O reator desempenha um papel crucial na produção biológica de metano, e sua configuração influencia diretamente as condições do microambiente interno. Os reatores operados em batelada têm sido considerados mais adequados em escala laboratorial devido às suas vantagens. Segundo Silva et al. (2018), esses reatores são preferíveis devido à sua simplicidade, flexibilidade e facilidade de uso.

O modo operacional do reator é um fator determinante na eficiência do processo de produção de metano. De acordo com pesquisa realizada por Wang et al. (2019), os reatores operados em batelada são caracterizados pelo carregamento inicial de substrato orgânico, seguido pela fermentação pelos microrganismos presentes no meio de cultura. Após a completa digestão do substrato, o processo é interrompido, e o biogás produzido é coletado.

A simplicidade dos reatores em batelada facilita sua implantação e operação em pequena escala, como em laboratórios de pesquisa. Para fins de investigação laboratorial, se utilizam frascos de pequenos volumes, entre 100 mL a 500 mL, e fermentadores entre 2 mL a 10 mL com agitação. (De gioannis et al., 2013). Essas dimensões reduzidas dos reatores permitem realizar experimentos em escala reduzida, facilitando o controle das variáveis e a replicação dos resultados.

4. METODOLOGIA

A pesquisa foi constituída de um trabalho no campo experimental que visou determinar as características físico-químicas dos resíduos (manipueira, vinhaça e soro de leite).

Para garantir que todos os objetivos fossem alcançados, o estudo será dividido em 4 (quatro) etapas, visualizados na figura abaixo:

Figura 4 - Fluxograma da metodologia em etapas



Fonte: Autora (2024).

4.1 OBTENÇÃO DOS SUBSTRATOS

- **Manipueira**

Os resíduos de manipueira utilizados como substrato nas fermentações foram obtidos de uma fábrica de farinha localizada no município de Coité do Nóia - AL.

Figura 5 - Obtenção da manipueira na fábrica de farinha



Fonte: Autoria própria, 2023.

Após a coleta, este material foi transportado em recipiente plástico limpo e devidamente vedado, até sua chegada em laboratório. No laboratório, o material ficou armazenado em um freezer e sem fluxo de pessoas para que os gases tóxicos presentes, o ácido cianídrico em particular, fossem eliminados.

- **Vinhaça**

A vinhaça foi cuidadosamente coletada na Usina Caeté, unidade Matriz, localizada em São Miguel dos Campos. Após a coleta, o líquido foi armazenado em barris de 5 litros e 50 litros, e mantido sob refrigeração no freezer do Laboratório de Ciências Ambientais (LCA).

- **Soro de Leite**

A coleta do soro de leite foi realizada como parte de atividades de pesquisa e desenvolvimento que visam explorar o potencial desse subproduto. O soro de leite foi obtido durante o processo de produção de queijo no IFAL Campus Satuba. Após a coleta, o soro foi acondicionado e mantido a uma temperatura constante de 4°C para preservar suas propriedades e garantir sua qualidade até o momento do uso.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS SUBSTRATOS E INÓCULO

Nessa etapa foram realizados ensaios para caracterização físico-química iniciando com a manipueira e com o inóculo (lodo de ETE), Em seguida, prosseguiram-se as análises com a vinhaça e o soro de leite, permitindo uma compreensão detalhada das propriedades físico-químicas de cada amostra ao longo do processo. Os ensaios laboratoriais foram realizados em triplicata para o cálculo da média aritmética amostral \bar{x} . Esta média foi obtida dividindo-se a soma das observações pelo número delas.

Nestes ensaios foram determinados para manipueira: potencial hidrogeniônico (pH), sólidos totais (ST), Carboidratos, Alcalinidade, Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Ácidos voláteis. É importante salientar que para a realização de todas as análises acima, tanto as amostras de manipueira quanto as de lodo de ETE, foram devidamente homogeneizadas, devido ao fato de possuírem em sua composição muitos sólidos sedimentáveis.

4.2.1 Potencial Hidrogeniônico (pH)

Para a determinação do pH, utilizou-se um potenciômetro portátil multiprocessador, modelo Q400HM, da marca QUIMIS. A medição do pH foi realizada com o uso de um pHmetro de bancada, disponível no Laboratório de Saneamento Ambiental da UFAL. Antes da realização da leitura das amostras, o equipamento foi calibrado com soluções tampão padrão de pH 4,0; pH 7,0 fornecidos pelo fabricante.

4.2.2 Série de Sólidos (ST, SF, SV)

Para caracterizar os sólidos totais (ST) em uma amostra, inicia-se com a preparação dos cadinhos de porcelana, que devem ser calcinados em mufla a 550°C por 1 hora para garantir a remoção de resíduos. Após o aquecimento, os cadinhos são resfriados em um dessecador e pesados para determinar o peso inicial (P0). Em seguida, um volume conhecido da amostra homogeneizada, contendo entre 2,5 e 200 mg de resíduo seco, é transferido para os cadinhos. Os cadinhos com a amostra são então colocados em uma estufa a 103-105°C por um período mínimo de 24 horas para secar completamente o material. Durante esse tempo, a água é removida da amostra, deixando apenas os sólidos. Após a secagem, os cadinhos são resfriados novamente em dessecador e pesados para determinar o peso final (P1), incluindo o resíduo seco. A quantidade de sólidos totais é calculada pela diferença entre o peso final com o resíduo seco e o peso inicial do cadinho vazio. Se for necessário distinguir entre sólidos fixos e voláteis, o material seco pode ser submetido a uma nova etapa de calcinação a 550°C. Esse procedimento é baseado em metodologias padronizadas e permite uma avaliação precisa da concentração de sólidos na amostra líquida.

Para calcular a concentração (mg/L) dos sólidos totais, é necessário usar a equação abaixo:

- Equação dos sólidos totais (ST):

$$\text{Sólidos Totais (ST)} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{(P1-P0) * 10^6}{V \text{ amostra}} \quad (1)$$

Onde: ST = sólidos totais a 105°C (mg.L-1);

P1 = massa da cápsula mais a massa dos sólidos totais secos a 105°C (g);

P0 = massa da cápsula vazia e submetida a aquecimento em mufla (g);

Va = volume da amostra utilizado na análise (mL).

- Equação dos sólidos fixos (SF):

$$\text{Sólidos Suspensos Fixos (SSF)} = \frac{(P2-P0) * 10^6}{V \text{ amostra}} \quad (2)$$

Onde: SF = sólidos fixos a 550°C (mg.L-1);

P2 = massa da cápsula mais a massa dos sólidos calcinados a 550°C (g);

P0 = massa da cápsula vazia e submetida a aquecimento em mufla (g);

Va = volume da amostra utilizado na análise (mL).

- Equação dos sólidos voláteis (SV):

$$SV = ST - SF \quad (3)$$

Onde:

SV = sólidos voláteis (mg.L-1);

ST = sólidos totais a 105°C (mg.L-1);

SF = sólidos fixos calcinados a 550°C (mg.L-1).

4.2.3 Alcalinidade

A análise de alcalinidade foi conduzida utilizando métodos titulométricos e potenciométricos, empregando uma solução padronizada de ácido sulfúrico com uma normalidade de 0,9787 N, fornecida pelo Laboratório de Saneamento Ambiental da UFAL. A determinação da alcalinidade foi realizada através da titulação da amostra com a solução ácida, e os resultados foram calculados utilizando a seguinte equação:

$$CaCO_3 \text{ (mg/L)} = \frac{V_{H_2SO_4} * N_{H_2SO_4} * 50.000}{V_a} \quad (4)$$

Nesta fórmula, $V_{H_2SO_4}$ representa o volume de ácido sulfúrico utilizado na titulação, que foi de 0,75 mL. A $N_{H_2SO_4}$ é a normalidade da solução de ácido sulfúrico, que é 0,9787 N, e V_a é o volume da amostra que foi analisado, igual a 50 mL. Essa fórmula permite calcular a concentração de carbonato de cálcio ($CaCO_3$) em miligramas por litro, refletindo a alcalinidade da amostra.

4.2.4 Ácidos Voláteis

A determinação dos ácidos voláteis foi realizada no Laboratório de Saneamento Ambiental da UFAL, utilizando técnicas de titulometria e potencimetria com a ajuda de uma

bureta automática. O processo envolveu a titulação da amostra com uma solução padrão de hidróxido de sódio (NaOH). Para quantificar a concentração de ácidos voláteis na amostra, foi utilizada a seguinte fórmula:

$$mg/L HAc = \frac{V*N*50.000}{V_a} \quad (5)$$

onde V equivale ao volume de NaOH gasto na titulação (140,6 mL), N a normalidade do NaOH (0,0213 N), e Va o volume da amostra (50mL).

4.2.5 Demanda Química de Oxigênio

Os três substratos foram previamente diluídos na proporção de 1:25 para reduzir a DQO inicial para aproximadamente 10 g/L antes do processo de filtragem. Após a filtragem, foram adicionados 1,5 mL de solução de dicromato de potássio e 3,5 mL de ácido sulfúrico concentrado com catalisador de sulfato de prata a cada tubo de ensaio. Em seguida, 2 mL de cada amostra diluída e filtrada foram transferidos para os tubos, com análises realizadas em triplicata para garantir a precisão. Para calibrar o espectrofotômetro, foi preparada uma amostra "branca" substituindo os 2 mL de amostra por água destilada. Os tubos foram então aquecidos em um digestor a 150°C por duas horas. Após a digestão, as amostras foram resfriadas à temperatura ambiente, protegidas da luz, e posteriormente analisadas no espectrofotômetro. Esse procedimento também foi aplicado na caracterização do inóculo.

Os valores encontrados de absorvância são substituídos na equação obtida com a curva de calibração de DQO abaixo:

$$Y = 2518,8x + 32,412 \quad (6)$$

$$R^2 = 0,9971 \quad (7)$$

4.2.6 Carboidratos

A análise de carboidratos foi conduzida pela desidratação dos açúcares presentes na amostra com ácido sulfúrico concentrado, seguida pela formação de complexos com fenol. Esse processo gera um composto alaranjado cuja absorvância atinge o máximo próximo a 490 nm.

Para realizar o experimento, os substratos foram diluídos na proporção de 1:500. Foram utilizados 0,5 mL da amostra bruta, 0,5 mL de solução de fenol a 5% (50 g/L) e 2,5 mL de ácido sulfúrico concentrado (H₂SO₄). Após a preparação, a leitura da absorvância foi feita em um espectrofotômetro calibrado para 490 nm mostrado na figura abaixo:

Figura 7 - espectrofotômetro calibrado para 490 nm



Fonte: Autora, 2024

Os resultados foram analisados com base na curva de calibração correspondente a esse comprimento de onda disponibilizado no Laboratório de Saneamento Ambiental (LSA). Os cálculos foram feitos a partir da seguinte equação:

$$C(\text{Glucose}) = 137,85x + 2,5043 \quad (8)$$

$$R^2 = 0,9974 \quad (9)$$

4.3 MONTAGEM DO REATOR EM BATELADA

O projeto foi elaborado para utilizar dois reatores de bancada de vidro, cada um com capacidade de 1 litro. Para a alimentação, foi definido que os reatores seriam preenchidos com 50% da sua capacidade total, ou seja, 0,5 litro. Dessa fração, 10% (50 mL) corresponde ao lodo, que atua como inóculo, e os outros 90% (450mL) são compostos pelo substrato diluído na proporção de 1:4, devido à alta DQO dos substratos em estado bruto. A diluição foi ajustada para que o estado inicial de DQO nos reatores fosse de 10 g/L.

Os dois reatores foram alimentados com as mesmas quantidades descritas: 50 mL de inóculo e 450 mL de substrato diluído. Após a alimentação, foi realizado o processo de criação de anaerobiose, que consistiu em remover o oxigênio do espaço vazio dos reatores. Esse procedimento durou cerca de 1 minuto em cada reator, garantindo condições ideais para a digestão anaeróbia. Esse controle da atmosfera é fundamental para a eficiência do processo de biodigestão.

A correção do pH é de fato uma etapa crucial para otimizar a produção de metano, pois as arqueas metanogênicas, que atuam na fase final do processo de digestão anaeróbia, apresentam sua maior atividade em um pH próximo da neutralidade, geralmente entre 6,8 e

7,5 (Bharathiraja et al., 2018). Manter o pH adequado é essencial para evitar o acúmulo de ácidos voláteis, que pode inibir a atividade das arqueas e, com isso, prejudicar a eficiência na geração de metano (Lee et al., 2019).

Estudos mais recentes, como o de Zhai et al. (2020), reforçam que o ajuste e a manutenção de um pH adequado promovem um ambiente otimizado para a atividade microbiana, o que resulta em uma digestão anaeróbia mais eficiente e uma maior produção de biogás. Além disso, o controle do pH contribui para a estabilidade do processo, evitando oscilações metabólicas que poderiam comprometer o rendimento e a qualidade do biogás produzido (Nguyen et al., 2021).

Durante a montagem dos reatores de bancada, ambos foram equipados com válvulas para coleta de gás e líquido, conectadas a um medidor de volume. Os reatores foram posicionados dentro de uma incubadora para manter a temperatura constante em 35°C, dentro da faixa mesofílica, considerada ideal para a produção de metano, segundo Amorim (2018). Além disso, os reatores foram mantidos em agitação contínua para acelerar o processo de digestão anaeróbia.

Como inóculo para o processo de biodigestão foi utilizado lodo proveniente da Estação de Tratamento de Esgotos em Maceió. Este lodo é resultado do tratamento do tipo secundário com utilização do processo de filtração biológica em águas residuárias.

Após a realização das análises físico-químicas dos substratos, o experimento foi executado. Foram escolhidos reatores em batelada devido à sua praticidade operacional e controle mais eficiente, conforme destacado por Wang e Wan (2009).

4.4 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS E CROMATOGRÁFICAS

Os parâmetros físico-químicos a serem analisados serão: demanda química de oxigênio (DQO), potencial hidrogeniônico (pH), série de sólidos (ST, STF, STV) e carboidratos totais (CHT).

Tabela 3 – Parâmetros físico-químicos analisados com seus respectivos equipamentos, métodos, reagentes, vidrarias e referências.

Análise	Unidade	Equipamentos	Método	Referência
DQO	mg·L ⁻¹	(1), (3), (4) e (5)	Espectrométrico	
pH		(2) e (9)	Potenciométrico	
Série de sólidos	mg·L ⁻¹	(3), (5), (7) e (8)	Gravimétrico	APHA, AWWA e

Análise	Unidade	Equipamentos	Método	Referência
				WEF (2012)
CHT	mg·L ⁻¹	(1) e (3)	Espectrométrico	Dubois et al. (1956)

Fonte – Adaptado de Lima (2020).

O metano é detectado e quantificado em fase gás-líquido por meio de um cromatógrafo gasoso Shimadzu® modelo GC-2010, equipado com um detector de condutividade térmica (TCD) e uma coluna Carboxen™ 1010 PLOT com capilar de sílica fundida (30,00m x 0,53mm x 0,00µm), tendo o Ar como gás de arraste localizado no Laboratório de Controle Ambiental (LCA) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL).

Inicialmente, o equipamento passou por um processo de condicionamento, o que inclui a calibração adequada para garantir a precisão das medições. Após esse passo, foi aberto o método específico para a análise de metano, já configurado previamente no sistema do laboratório.

Para a análise, 3 mL de amostra de gás foram coletados e injetados no cromatógrafo utilizando uma seringa. Durante a execução da análise, o pico correspondente ao metano foi identificado entre aproximadamente 3,45 e 3,7 segundos após o início da leitura. A cromatografia foi realizada um dia após o início dos biorreatores, e foi continuada até que se atingisse um estado de produção estável de gás.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Tabelas 4, 5, 6 e 7 apresentam a caracterização físico-química da manipueira, da vinhaça, soro de leite em seu estado bruto e do inóculo utilizado, respectivamente. Esses dados são fundamentais para entender as características dos materiais antes de serem submetidos a processos biológicos, como digestão anaeróbia para produção de biogás.

Tabela 4 - Caracterização físico-química da manipueira em estado bruto.

ANÁLISES	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
pH	4,65	0
Carboidratos (mg/L)	5.192,36	0,015
DQO (g/L)	43,19	0,023
Alcalinidade (g/L)	0,734	0
Ácidos Voláteis (mg/L)	2.994,78	0

Fonte: Autora, 2024.

A manipueira se destacou por seu alto potencial energético, evidenciado pela elevada concentração de carboidratos (5.192,36 mg/L) e DQO (43,19 g/L), o que indica uma alta disponibilidade de matéria orgânica para conversão em biogás. No entanto, o baixo pH (4,65) e a baixa alcalinidade (0,734 g/L) sugerem um ambiente ácido que pode dificultar o processo de digestão anaeróbia, pois a acidez excessiva pode inibir as arqueias metanogênicas. Dessa forma, o uso de um inóculo com pH mais neutro e uma quantidade significativa de sólidos voláteis pode ajudar a estabilizar o processo, desde que o pH seja controlado adequadamente para evitar a inibição do metano.

Tabela 5 - Caracterização físico-química da vinhaça em estado bruto.

ANÁLISES	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
pH	3,98	0,02
Carboidratos (g/L)	10,23	0,34
DQO (g/L)	39,93	0,89
Sólidos Totais (g/L)	33,35	0,5
Sólidos Voláteis Totais(g/L)	23,9	1,6
Sólidos Suspensos Totais (g/L)	2,07	0,13
Sólidos Suspensos Voláteis (g/L)	1,19	0,19

Fonte: Autora, 2024.

Similarmente, a vinhaça apresenta alto potencial para produção de biogás, com DQO de 39,93 g/L e uma concentração significativa de carboidratos (10,23 g/L), além de sólidos voláteis (23,9 g/L), que favorecem a sua biodegradabilidade. No entanto, o pH baixo (3,98) representa um desafio, pois a acidez elevada pode inibir o processo de digestão. Para otimizar a produção de metano, é necessário um rigoroso controle de pH e a utilização de inóculos adequados, o que poderá ajudar na estabilização do processo e no desenvolvimento eficiente das arqueias metanogênicas.

O soro de leite também possui elevado potencial energético, com uma alta concentração de matéria orgânica (DQO de 72,52 g/L) e sólidos voláteis (52,90 g/L). Seu pH moderadamente ácido (5,34) pode afetar levemente os processos biológicos, mas ainda oferece boas condições para a digestão anaeróbia. Para maximizar a produção de biogás, é necessário um ajuste cuidadoso do pH, visando garantir um ambiente propício para a atividade metanogênica. O gerenciamento adequado do biodigestor será essencial para explorar o potencial do soro de leite na geração de metano.

Tabela 6 - Caracterização físico-química do Soro de Leite em estado bruto.

ANÁLISES	MÉDIA
pH	5,34
DQO (g/L)	72,52
Sólidos Totais (g/L)	59,21
Sólidos Voláteis Totais(g/L)	52,90
Sólidos Totais Fixos (g/L)	6,31

Fonte: Autora, 2024.

A caracterização do inóculo na Tabela 7 abaixo revela um pH próximo ao neutro (6,38), o que é ideal para estabilizar processos anaeróbios. Com uma DQO de 23,76 g/L e altos valores de sólidos voláteis (24 g/L), o inóculo possui uma quantidade significativa de material orgânico e pode atuar como uma boa fonte de arqueias e bactérias anaeróbias, promovendo a conversão de matéria orgânica em metano e facilitando o processo de digestão nos reatores.

Tabela 7 - Caracterização do inóculo em estado bruto.

ANÁLISES	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
pH	6,38	0,08
Carboidratos (mg/L)	-	-
DQO (g/L)	23,76	1,07
Sólidos Totais (g/L)	30,00	0,00
Sólidos Totais Voláteis (g/L)	24,00	0,00
Sólidos Suspensos Totais (g/L)	20,70	1,10
Sólidos Suspensos Voláteis (g/L)	16,75	0,75

Fonte: Autora, 2024.

Essas informações fornecem subsídios essenciais para ajustar os parâmetros operacionais de cada substrato nos biodigestores. Controlar fatores como pH, alcalinidade e sólidos voláteis permitirá otimizar a geração de biogás e maximizar a eficiência do processo anaeróbio para cada tipo de efluente.

A Tabela 8 abaixo apresenta os resultados de Carboidratos, pH e DQO para as amostras de entrada e saída dos dois reatores, utilizando uma mistura de manipueira com inóculo. Esses dados fornecem uma visão sobre a eficiência do processo de tratamento anaeróbio nos reatores, permitindo avaliar as condições de degradação e produção de biogás.

Tabela 8 - Resultados obtidos de pH e DQO da manipueira nas amostras de entrada e saída dos reatores.

Parâmetro	INÍCIO DO EXPERIMENTO		FINAL DO EXPERIMENTO	
CHT (g/L)	36,19	37,23	19,17	19,58
pH	5,56 (ajustado para 6,98)	5,72 (ajustado para 7,0)	5,07	5,0
DQO (g/L)	14,42	14,60	10,41	8,55

Fonte: Autora, 2024.

Observa-se na Tabela 8 que as amostras de entrada nos reatores apresentaram inicialmente um pH ácido, com valores de 5,56 para o Reator 1 e 5,72 para o Reator 2. Esses valores foram ajustados para 6,98 e 7,0, respectivamente, pela adição de 16 gotas de NaOH 5M no Reator 1 e 15 gotas no Reator 2, antes de serem introduzidos nos reatores. Esse ajuste é fundamental para otimizar o processo de digestão anaeróbia, uma vez que as arqueias metanogênicas apresentam melhor desempenho em condições de pH neutro (Apha, 2017).

Entretanto, os valores de pH das amostras de saída dos reatores reduziram novamente para níveis ácidos, com 5,07 no Reator 1 e 5,0 no Reator 2. Essa acidificação pode indicar que, durante o processo, houve a formação de ácidos voláteis que não foram totalmente convertidos em metano, o que pode comprometer a eficiência da produção de biogás, já que o pH ácido pode inibir a atividade das arqueias metanogênicas (Silva, 2020).

No que se refere à DQO da manipueira, diversos trabalhos na literatura relatam que esse substrato apresenta muitas variações em sua composição. De acordo com Souza et al. (2021), no desenvolvimento de um estudo sobre a caracterização de diferentes lotes de

manipueira, os resultados de DQO obtidos variaram de 45,0 a 120,0 g de O₂/L, evidenciando a heterogeneidade desse substrato.

Em relação à DQO, que mede a carga orgânica presente no efluente, as amostras de entrada mostraram valores elevados de 14,42 g/L no Reator 1 e 14,60 g/L no Reator 2, sugerindo um potencial para a produção de biogás. Após o tratamento, a DQO foi reduzida para 10,41 g/L no Reator 1 e 8,55 g/L no Reator 2, indicando que houve degradação da matéria orgânica. No entanto, a redução foi menos significativa no Reator 1, mesmo com uma carga orgânica inicial próxima, sugerindo uma possível ineficiência no processo de tratamento nesse reator (Campos; Araújo, 2019).

A eficiência dos sistemas de tratamento de resíduos na redução da carga poluidora é comprovada pela remoção eficaz de poluentes orgânicos, como DBO e DQO (Mendes et al., 2020). No Reator 1, a DQO da amostra de entrada foi de 14,42 g/L, enquanto no Reator 2 foi de 14,60 g/L. Após o tratamento, os valores de DQO nas amostras de saída foram de 10,41 g/L no Reator 1 e 8,55 g/L no Reator 2. Assim, a eficiência de remoção da DQO foi de 27,82% para o Reator 1 e 41,44% para o Reator 2.

Esses resultados indicam a importância de um controle rigoroso do pH e da carga orgânica durante o processo de digestão anaeróbia para garantir a eficiência na produção de biogás e evitar a acidificação excessiva, que pode comprometer o desempenho dos reatores (Santos, 2023).

A Tabela 9 abaixo apresenta os resultados de pH e DQO para as amostras de entrada e saída dos dois reatores, utilizando uma mistura de vinhaça com inóculo.

Tabela 9 - Resultados obtidos de pH, Carboidratos e DQO da vinhaça nas amostras de entrada e saída dos reatores.

Parâmetro	INÍCIO DO EXPERIMENTO		FINAL DO EXPERIMENTO	
CHT (g/L)	22,06	23,45	11,52	16,64
pH	6,72 (ajustado para 7,0)	6,80 (ajustado para 7,10)	6,57	6,55
DQO (g/L)	9,66	9,79	8,93	7,42

Fonte: Autora, 2024.

Na Tabela 9, observa-se que as amostras de entrada dos reatores com vinhaça foram inicialmente ajustadas de um pH levemente ácido para valores próximos à neutralidade, com o objetivo de criar um ambiente ideal para a digestão anaeróbia. Esse ajuste de pH foi fundamental, uma vez que as arqueias metanogênicas, que desempenham um papel crucial na produção de metano, são mais ativas em condições de pH neutro (Apha, 2017). No início do experimento, os valores de pH foram ajustados para 7,0 e 7,10, indicando uma tentativa de manter a estabilidade ideal para o processo.

Apesar desse ajuste inicial, as amostras de saída dos reatores apresentaram uma leve redução no pH para valores em torno de 6,55, sugerindo que, ao longo do processo, houve a formação de ácidos voláteis. Essa acidificação moderada pode ser indicativa de uma produção de ácidos graxos voláteis, que, embora comum na fase inicial da digestão, se não convertidos eficientemente em metano, podem comprometer a estabilidade do sistema e reduzir a eficiência da produção de biogás (Silva, 2020).

Em relação à Demanda Química de Oxigênio (DQO), os valores iniciais eram elevados (9,66 g/L e 9,79 g/L), refletindo uma alta carga orgânica e, portanto, um bom potencial para a produção de biogás. Após o tratamento, a DQO reduziu para 8,93 g/L e 7,42 g/L, o que indica uma degradação significativa da matéria orgânica. A porcentagem de remoção de DQO foi de aproximadamente 7,56% no Reator 1 e 24,11% no Reator 2, evidenciando uma eficiência de tratamento superior no Reator 2. Essa diferença sugere que o Reator 2 possui condições mais favoráveis para a digestão da vinhaça, resultando em uma maior redução de carga orgânica (Campos e Araújo, 2019).

Tabela 10 - Resultados obtidos de pH, Carboidratos e DQO do Soro de Leite nas amostras de entrada e saída dos reatores.

Parâmetro	INÍCIO DO EXPERIMENTO		FINAL DO EXPERIMENTO	
CHT (g/L)	40,95	43,92	27,72	27,44
pH	7,30	7,31	5,39	5,36
DQO (g/L)	16,2	14,94	14,7	13,72

Fonte: Autora, 2024.

Na Tabela 10 acima, os dados do soro de leite mostram que, ao contrário dos experimentos com manipueira e vinhaça, não foi realizado ajuste de pH com solução de NaOH nas amostras de entrada dos reatores. Inicialmente, o pH foi mantido em torno de 7,30, próximo à neutralidade, o que parecia adequado para o início do processo de digestão anaeróbia. No entanto, nas amostras de saída, o pH caiu acentuadamente para níveis ácidos, com valores de 5,39 e 5,36.

Essa acidificação indica uma possível formação excessiva de ácidos graxos voláteis ao longo do processo, que não foram convertidos completamente em metano. Esse acúmulo de ácidos, associado à ausência de controle de pH com NaOH, pode ter comprometido a atividade das arqueias metanogênicas, limitando a produção de biogás (Silva, 2020).

A Demanda Química de Oxigênio (DQO) inicial dos substratos apresentava valores de 16,2 g/L no Reator 1 e 14,94 g/L no Reator 2, indicando uma alta carga orgânica com potencial para produção de biogás. Após o tratamento, os valores de DQO foram reduzidos para 14,7 g/L no Reator 1 e 13,72 g/L no Reator 2, refletindo uma degradação da matéria orgânica, embora com uma eficiência inferior ao esperado. A porcentagem de remoção de DQO foi de aproximadamente 9,26% no Reator 1 e 8,17% no Reator 2. Essa baixa eficiência de remoção pode estar relacionada à acidificação do meio e à falta de controle de pH, fatores que podem ter limitado a atividade metanogênica e a conversão da matéria orgânica em biogás.

5.1 PRODUÇÃO DE METANO

A produção de metano em processos de digestão anaeróbia depende diretamente da quantidade de matéria orgânica disponível e da eficiência de conversão dessa matéria em biogás. A DQO inicial do substrato, que reflete o potencial energético do material utilizado, indica que, em condições ideais de pH e temperatura, cerca de 60% da DQO convertida pode resultar em metano (Ribeiro et al., 2019).

Nos experimentos realizados, no entanto, não foi possível obter medições diretas do biogás nos reatores acoplados ao medidor de volume. Isso pode ter ocorrido devido a vários fatores, como a adaptação inadequada do inóculo às condições do reator, controle insuficiente do pH ou uma taxa de alimentação inadequada, que podem ter comprometido o desenvolvimento das arqueias metanogênicas (Lima et al., 2020). Além disso, problemas técnicos no sistema de medição, como vazamentos ou obstruções nas válvulas de coleta, poderiam ter dificultado a correta quantificação do biogás (Silva et al., 2018). Vale também

considerar que o medidor de volume utilizado possivelmente não era adequado para detectar pequenos volumes, já que era necessário um volume maior para ativar a medição, embora o gás estivesse presente, conforme indicado pelo som percebido durante a coleta.

Essas observações reforçam a importância de realizar ajustes nos parâmetros operacionais e na manutenção dos equipamentos para assegurar precisão e confiabilidade nas medições de biogás em futuros experimentos.

Para estimar a produção de metano, foi realizada uma análise baseada na DQO consumida, utilizando-a como parâmetro para calcular a quantidade de matéria orgânica convertida em biogás. O cálculo do volume de biogás seguiu as seguintes equações:

Estimativa de Volume de Biogás (V):

$$V=DQO \cdot k(t) \quad (10)$$

Cálculo do Fator $k(t)$:

$$k(t) = \frac{P \cdot k}{R \cdot (273 + t)} \quad (11)$$

onde

P é a pressão atmosférica (1 atm), R é a constante dos gases (0,08206 atm·L/mol·K), e t é a temperatura do reator (35°C).

Essas fórmulas permitiram calcular uma estimativa do volume de metano produzido, mesmo sem medições diretas, auxiliando na avaliação do desempenho dos reatores e da eficiência do sistema na produção de biogás.

A Tabela 11 a seguir ilustra a produção de metano com Manipueira nos reatores, destacando a eficácia do tratamento dos efluentes na geração de biogás.

Tabela 11 - Resultados obtidos de produção de metano com Manipueira dos reatores 01 e 02.

Parâmetro	Reator 01	Reator 02
Produção Diária de Metano (mL/dia)	93,07	141,87

Fonte: Autora, 2024.

Os resultados apresentados na Tabela 11 mostram a produção diária de metano dos reatores 01 e 02 alimentados com manipueira, evidenciando uma diferença significativa na eficiência de produção entre os dois reatores. O Reator 01 obteve uma produção diária de 93,07 mL/dia, enquanto o Reator 02 alcançou 141,87 mL/dia.

Embora o Reator 02 tenha mostrado uma produção de metano superior, é importante analisar as possíveis causas dessa diferença. O Reator 02, com uma maior produção de metano, pode ter se beneficiado de condições operacionais mais favoráveis, como uma melhor adaptação do inóculo às condições do reator, uma taxa de alimentação mais adequada, ou até um controle mais eficiente dos parâmetros operacionais, como pH e temperatura.

Por outro lado, a produção de metano no Reator 01, embora mais baixa que no Reator 02, pode indicar uma digestão anaeróbia mais eficiente em termos de conversão de matéria orgânica em biogás, considerando também outros fatores como o tempo de retenção do efluente e a adequação das condições microbiológicas.

Esses resultados destacam a importância de ajustes específicos nos reatores para otimizar a produção de biogás, bem como a necessidade de monitoramento constante para identificar e corrigir possíveis variações operacionais. Isso assegura a máxima eficiência na conversão de substrato em metano.

Tabela 12 - Resultados obtidos de produção de metano com Vinhaça dos reatores 01 e 02.

Parâmetro	Reator 01	Reator 02
Produção Diária de Metano (mL/dia)	16,98	55,12

Fonte: Autora, 2024.

A Tabela 12 acima apresenta os resultados de produção diária de metano nos reatores 01 e 02 alimentados com vinhaça, demonstrando uma diferença notável na eficiência de produção entre eles. Neste caso, o Reator 02 obteve uma produção diária de metano consideravelmente maior, com 55,12 mL/dia, em contraste com os 16,98 mL/dia obtidos no Reator 01.

A maior produção de metano no Reator 02 sugere que esse reator conseguiu melhores condições para o desenvolvimento das arqueias metanogênicas, resultando em uma conversão mais eficiente da matéria orgânica presente na vinhaça em biogás. Esse desempenho pode estar associado a um ajuste mais adequado de parâmetros operacionais, como pH, temperatura e taxa de alimentação, que podem ter favorecido o processo de digestão anaeróbia.

Por outro lado, o baixo rendimento do Reator 01 indica possíveis limitações no processo, que podem incluir uma adaptação insuficiente do inóculo, condições subótimas

para o desenvolvimento das arqueias ou até mesmo variáveis operacionais, como menor estabilidade do pH ou diferenças na composição inicial da vinhaça introduzida.

Esses resultados sugerem a necessidade de uma análise detalhada das condições operacionais e do controle de parâmetros em ambos os reatores para otimizar a produção de biogás e maximizar a eficiência da conversão de vinhaça em metano. Essa análise comparativa destaca a importância do monitoramento contínuo e dos ajustes finos nos processos de digestão anaeróbia para alcançar uma produção de metano mais consistente e eficiente.

Tabela 13 - Resultados obtidos de produção de metano com Soro de Leite dos reatores 01 e 02.

Parâmetro	Reator 01	Reator 02
Produção Diária de Metano (mL/dia)	34,89	28,37

Fonte: Autora, 2024.

A Tabela 13 apresenta os resultados de produção diária de metano dos reatores 01 e 02 alimentados com soro de leite, mostrando uma produção relativamente próxima entre ambos os reatores. O Reator 01 obteve uma produção diária de 34,89 mL de metano, enquanto o Reator 02 alcançou 28,37 mL/dia. Essa proximidade nos valores sugere uma eficiência semelhante na conversão do soro de leite em metano nos dois reatores.

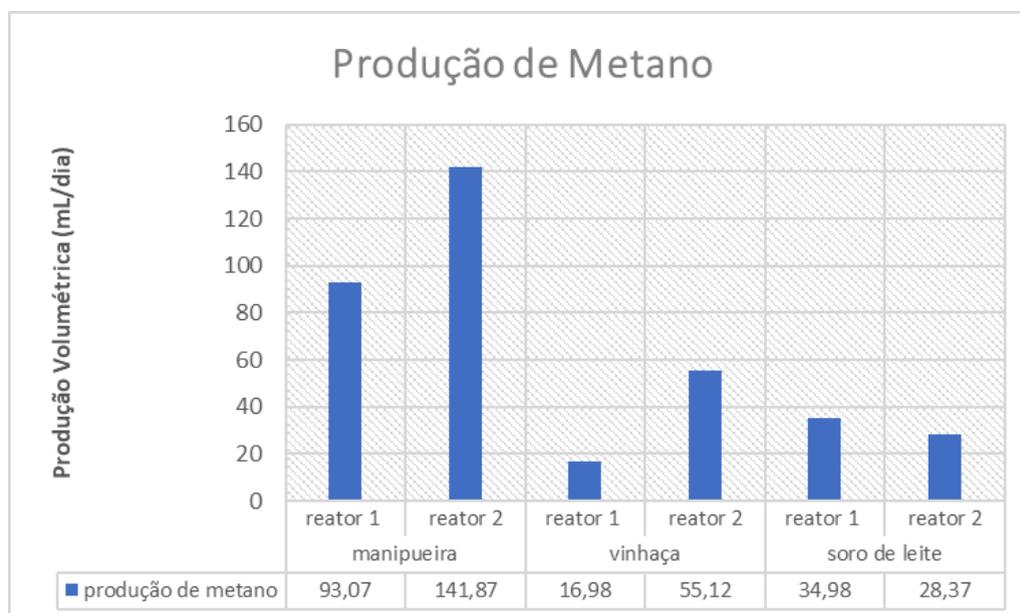
No entanto, a ligeira vantagem do Reator 01 pode indicar que ele proporcionou condições um pouco mais favoráveis para a atividade das arqueias metanogênicas, seja por uma leve diferença no controle de parâmetros como pH, temperatura, ou até na mistura dos efluentes, fatores que são críticos para o desempenho ideal na digestão anaeróbia.

Apesar da diferença modesta, os resultados sugerem que ambos os reatores conseguiram realizar a conversão da matéria orgânica do soro de leite em biogás de forma eficaz. Esse perfil de produção equilibrada é um indicativo positivo da adequação do soro de leite como substrato para a produção de metano, desde que se mantenha um monitoramento constante para assegurar estabilidade e eficiência na operação.

Esses achados reforçam a importância de manter parâmetros operacionais dentro de faixas ideais e mostram que o soro de leite pode ser convertido em metano de maneira consistente em condições adequadas, fornecendo uma base para otimizações adicionais caso se deseje maximizar a produção de biogás em ambos os reatores.

O gráfico 3 abaixo apresenta a comparação da Produção Volumétrica da Manipueira, Vinhaça e Soro de Leite.

Gráfico 3 - Comparação da Produção Volumétrica de Metano nos diferentes substratos.



Fonte: Autora, 2024.

A análise do gráfico de produção de metano dos reatores complementa as informações obtidas nas tabelas, permitindo uma visualização mais clara das variações na eficiência de conversão dos diferentes efluentes agroindustriais. A partir do gráfico, é possível identificar os padrões de produção de metano ao longo do período de monitoramento e corroborar as conclusões derivadas das tabelas.

No caso da **manipueira**, o gráfico revela uma produção de metano significativamente mais alta no Reator 2 (141,87 mL/dia) em comparação com o Reator 1 (93,07 mL/dia). Essa diferença acentuada sugere que as condições de operação no Reator 2 foram mais adequadas para o desenvolvimento das arqueias metanogênicas, resultando em uma produção otimizada de metano. O Reator 1, por outro lado, apresentou uma produção mais moderada, indicando uma menor eficiência nas condições operacionais para a vinhaça.

Para a **vinhaça**, o gráfico mostra uma produção de metano consistentemente mais alta no Reator 1 (16,98 mL/dia) em comparação com o Reator 2 (55,12 mL/dia). A linha de produção do Reator 2 se mantém mais elevada, o que reforça a hipótese de uma melhor adaptação do inóculo e condições operacionais mais favoráveis. O Reator 1 apresenta valores inferiores, confirmando uma menor eficiência no processo de digestão anaeróbia, possivelmente devido a parâmetros menos otimizados.

Em relação ao **soro de leite**, o gráfico indica que a produção de metano nos dois reatores é relativamente semelhante, com uma leve vantagem para o Reator 1 (34,98 mL/dia) em comparação com o Reator 2 (28,37 mL/dia). Embora a diferença seja pequena, essa ligeira superioridade do Reator 1 sugere condições operacionais ou uma adaptação do inóculo um pouco mais eficaz. No entanto, ambos os reatores apresentam desempenhos próximos, sugerindo que o soro de leite, como substrato, oferece um potencial de produção de metano equilibrado entre os dois reatores.

Em resumo, o gráfico de produção de metano reforça as observações das tabelas, mostrando como as variações nos parâmetros operacionais podem impactar a eficiência da conversão de matéria orgânica em biogás. Ele também destaca a importância de um controle rigoroso e da adaptação do inóculo para garantir o sucesso do processo de digestão anaeróbia e maximizar a produção de metano.

7. CONCLUSÃO

A análise do potencial de produção de metano a partir de manipueira, vinhaça e soro de leite em reatores anaeróbios operados em batelada evidenciou a viabilidade desses resíduos agroindustriais como fontes sustentáveis de energia. A caracterização físico-química dos substratos e do inóculo foi essencial para entender suas propriedades e como influenciam a eficiência do processo de digestão anaeróbia. A composição do efluente gerado nos reatores revelou as transformações ocorridas e permitiu avaliar o impacto de variáveis operacionais no rendimento do processo.

Os resultados demonstraram que a manipueira, a vinhaça e o soro de leite apresentaram eficiências distintas na produção de metano, com destaque para a manipueira, que obteve a maior produção de metano no Reator 2 (141,87 mL/dia). A vinhaça, por sua vez, teve maior eficiência no Reator 2, com uma produção de 55,12 mL/dia, enquanto o soro de leite apresentou um rendimento equilibrado entre os dois reatores, com uma ligeira vantagem para o Reator 1 (34,89 mL/dia).

Esses resultados reforçam a importância de otimizar as condições operacionais de cada reator, como pH, temperatura e taxa de alimentação, para maximizar a produção de biogás e assegurar a eficiência do processo. Além disso, o estudo comprovou que esses resíduos agroindustriais têm grande potencial para a produção de biogás, oferecendo uma solução sustentável tanto para o tratamento de resíduos quanto para a geração de energia renovável.

Portanto, o trabalho evidenciou que a digestão anaeróbia é uma tecnologia promissora para o aproveitamento de resíduos agroindustriais, contribuindo para a geração de biogás e biofertilizantes, e apresentando um caminho viável para a sustentabilidade no setor agroindustrial.

8. REFERÊNCIAS

ANGELIDAKI, I.; SANDERS, W. Avaliação da biodegradabilidade anaeróbia de macropoluentes. *Revisões em Ciência Ambiental e Biotecnologia*, v. 3, n. 2, p. 117-129, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11157-004-2502-3>.

ARAÚJO, W. O.; COELHO, J. Análise de Componentes Principais (PCA). 2009. *Technical Report - RT-MSTMA_003-09 - Relatório Técnico*. Mestrado Sociedade, Tecnologia e Meio Ambiente Centro Universitário de Anápolis.

BAUNGRATZ, K. L.; OLIVEIRA, J. B.; SLONGO, N.; FRIGO, E. P.; ZANON, E. Produção de biogás a partir de biomassa residual. *Acta Iguazu*, Cascavel, v. 2, n. 3, p. 30-39, 2013.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Classificação de águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional. Publicado no D.O.U., 2005.

BRASIL. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Centro Nacional de Pesquisa de Mandioca e Fruticultura Tropical. *Produção brasileira de mandioca por região*. Brasília: EMBRAPA, 2022. Disponível em: https://www.cnpmf.embrapa.br/Base_de_Dados/index_pdf/dados/brasil/mandioca/b1_mandioca.pdf. Acesso em: 02 fev. 2024.

BHARATHIRAJA, B.; SUDHARSANAA, T.; JAYAMUTHUNAGAI, J.; PRAVEENKUMAR, R. Biogas production – A review on composition, fuel properties, feedstock and principles of anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 90, p. 570-582, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.093>.

BOHRZ, G. I. Geração de metano em lagoa anaeróbia: um estudo de caso em abatedouro de bovinos. 2010. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

CANAL DO LEITE. IBGE: Alagoas é o estado do Nordeste que mais produz leite. Disponível em: <https://canaldoleite.com/destaques/ibge-alagoas-e-o-estado-do-nordeste-que-mais-produz-leite>. Acesso em: 07 mar. 2024.

CENBIO - Centro Nacional de Referência em Biomassa (Brasil). *Relatório Projeto GASEIFAMAZ*. São Paulo, 2001.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. *Normas Brasil*. Disponível em: <https://www.normasbrasil.com.br/norma/?id=114160>. Acesso em: 07 mar. 2024.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. *Análise Mensal da mandioca*. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/>. Acesso em: 9 fev. 2024.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. *Biomassa para energia*. 1. ed. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2008. 736 p.

CONRAD, R. Contribution of hydrogen to methane production and control of hydrogen concentrations in methanogenic soils and sediments. *FEMS Microbiology Ecology*, v. 28, p. 193-202, 1999. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1574-6941.1999.tb00575.x>.

CHAKRABORTY, S.; NEWTON, A. C. Climate change, plant diseases and food security: an overview. *Plant Pathology*, v. 60, n. 1, p. 2-14, 2011.

CHEN, Y.; CHENG, J. J.; CREAMER, K. S. Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology*, v. 99, n. 10, p. 4044-4064, 2008.

DAVID B LEVIN; LAWRENCE PITT; MURRAY LOVE. Biohydrogen production: prospects and limitations to practical application. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 29, n. 2, p. 173-185, 2004. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(03\)00094-6](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(03)00094-6).

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. *Biogas from Waste and Renewable Resources - An Introduction*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008.

DE GIOANNIS, G.; MUNTONI, A.; POLETTINI, A.; POMI, R. A review of dark fermentative hydrogen production from biodegradable municipal waste fractions. *Waste Management*, v. 33, n. 6, p. 1345-1361, 2013.

DUARTE, A. M. de S.; SILVA, Ê. F. de F.; ROLIM, M. M.; FERREIRA, R. F. de A. e L.; MALHEIROS, S. M. M.; ALBUQUERQUE, F. S. Uso de diferentes doses de manipueira na cultura da alface em substituição à adubação mineral. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, n. 3, p. 262-267, 2012.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *BEN - Balanço Energético Nacional: Ano base: 2022*. Relatório Síntese. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-681/BEN_S%C3%ADntese_2023_PT.pdf. Acesso em: 17 fev. 2024.

EMBRAPA. *Distribuição e produção de leite no Brasil*. Brasília: Embrapa, 2022. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1134836/1/Distribuicao-producao-leite.pdf>. Acesso em: 06 mar. 2024.

FARAGE, F. et al. Avaliação do potencial de aproveitamento energético dos resíduos de madeira e derivados gerados em fábricas do polo moveleiro de Ubá – MG. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 23, n. 1, p. 203-205, jan./mar. 2013.

FORESTI, E. *Processos e operações em tratamento de resíduos*. SHS-705. Pós-Graduação em Hidráulica e Saneamento na Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1998.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (FEAM). *Guia técnico ambiental de biogás na agroindústria*. Belo Horizonte: FEAM, Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais, Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável (GIZ), 2015.

INOUE, K. R. A. *Produção de biogás, caracterização e aproveitamento agrícola do biofertilizante obtido na digestão da manipueira*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008. 75 p.

KOLLING, E. M. *Viabilidade da Geração de Energia Elétrica Através de um Motor Gerador Utilizando Biogás da Suinocultura*. Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2001. 45 p.

KHALID, A. et al. The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste Management*, v. 31, n. 8, p. 1737-1744, 2011.

KHANAL, S. K.; CHEN, W. H.; LI, L.; SUNG, S. Biological hydrogen production: effects of pH and intermediate products. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 29, p. 1123-1131, 2004.

LAMAISON, F. C. *Aplicação da água residuária do processamento da mandioca como substrato para a produção de hidrogênio por processo fermentativo*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

LEE, D.-H.; CHO, K.-S.; PARK, J.-M. Evaluation of environmental factors influencing biogas production in anaerobic digestion of organic waste. *Environmental Engineering Research*, v. 24, n. 4, p. 510-517, 2019. <https://doi.org/10.4491/eer.2018.382>.

LIMA, G. P. *Produção de bio-hidrogênio a partir de frutas e vegetais residuais em reatores anaeróbios em batelada*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2020.

LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J. *Biocombustíveis*. Rio de Janeiro: Interciência, 2012. 1200 p.

LUTPI, N. A.; MD JAHIM, J.; MUMTAZ, T.; HARUN, S.; ABDUL, P. M. Batch and continuous thermophilic hydrogen fermentation of sucrose using anaerobic sludge from palm

oil mill effluent via immobilisation technique. *Process Biochemistry*, v. 51, n. 2, p. 297–307, 2016.

MATA-ALVAREZ, J.; MACÉ, S.; LLABRÉS, P. Digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos: uma visão geral das realizações e perspectivas da pesquisa. *Tecnologia de Biorecursos*, v. 74, p. 3-16, 2000.

MARQUARDT, L. et al. Indústrias lácteas: alternativas de aproveitamento do soro de leite como forma de gestão ambiental. *Tecno-Lógica*, v. 15, n. 2, p. 79-83, 2012.

MAO, C.; FENG, Y.; WANG, X.; REN, G. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 45, p. 540–555, 2015.

METCALF & EDDY. *Water Resources and Environmental Engineering*. McGraw-Hill, 1991.
MIRZOYAN, N.; TAL, Y.; GROSS, A. Anaerobic digestion of sludge from intensive recirculating aquaculture systems. *Aquaculture*, v. 306, p. 1-6, 2010.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Mapa do Leite. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/producao-animal/mapa-do-leite>. Acesso em: 07 mar. 2024.

MOREIRA, R. W. M.; MADRONA, G. S.; BRANCO, I. G.; BERGAMASCO, R.; PEREIRA, N. C. Avaliação sensorial e reológica de uma bebida achocolatada elaborada a partir de extrato hidrossolúvel de soja e soro de queijo. *Acta Scientiarum Technology*, v. 32, n. 4, p. 435-438, 2010.

NASCIMENTO, R. F. et al. *Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais*. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2018. 256 p.

NESHAT, A. S.; MOHAMMADI, M.; NAJAFPOUR, G. D.; LAHIJANI, P. Anaerobic co-digestion of animal manures and lignocellulosic residues as a potent approach for sustainable biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 79, p. 308-322, 2017.

NGUYEN, L.; CHIEMCHAI SRI, C.; CHIEMCHAI SRI, W. Enhancing biogas production through pH adjustment and microbial community control in anaerobic digestion of food waste. *Bioresource Technology Reports*, v. 15, p. 100719, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100719>.

PIACENTE, F. J. *Agroindústria canavieira e o sistema de gestão ambiental: o caso das usinas localizadas nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiáí*. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Econômico) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005. Disponível em:

<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/zeus/auth.php?back=http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000386200&go=x&code=x&unit=x>.

PAULA, L. de; ROLIM, M. M.; BEZERRA NETO, E.; SOARES, T. M.; PEDROSA, E. M. R.; SILVA, E. F. F. Crescimento e nutrição mineral de milho forrageiro em cultivo hidropônico com soro de leite bovino. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, p. 931-939, 2011.

RAPOSO, F. et al. Influence of inoculum to substrate ratio on the biochemical methane potential of maize in batch tests. *Process Biochemistry*, v. 41, p. 1444-1450, 2006.

SANTOS, A. Usos e impactos ambientais causados pela manipueira na microrregião sudoeste da Bahia - Brasil. Barcelona, 2009. Disponível em: . Acesso em: 09 fev. 2024.

SANTOS, M. H. V. et al. Uso da manipueira como fonte de potássio na cultura da alface (*Lactuca sativa* L.) cultivada em casa-de-vegetação. *Acta Scientiarum Agronomy*, v. 32, p. 729-733, 2010.

SILVA, D. B. *Tratamento de água residuária do processamento de mandioca com obtenção de butanol*. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, 2019.

SILVA, M. A. S. da; GRIEBELER, N. P.; BORGES, L. C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 11, n. 1, p. 108-114, 2007.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DO AÇÚCAR E DO ÁLCOOL NO ESTADO DE ALAGOAS. Produção de cana-de-açúcar no Brasil - safra 2021/2022. Disponível em: <https://www.sindicucar-al.com.br/app/uploads/2022/10/Producao-Cana-Brasil-21-22.pdf>. Acesso em: 05 mar. 2024.

SOUZA, C. D.; SILVA, J. R.; ALMEIDA, F. M. Characterization and potential applications of cassava wastewater. *Waste Management*, v. 127, p. 123-132, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.03.009>.

VON SPERLING, M.; GONÇALVES, R. F.; LUDUVICE, M. Remoção da umidade de lodos de esgotos. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Org.). *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG; Curitiba: SANEPAR, 2001. p. 159-259.

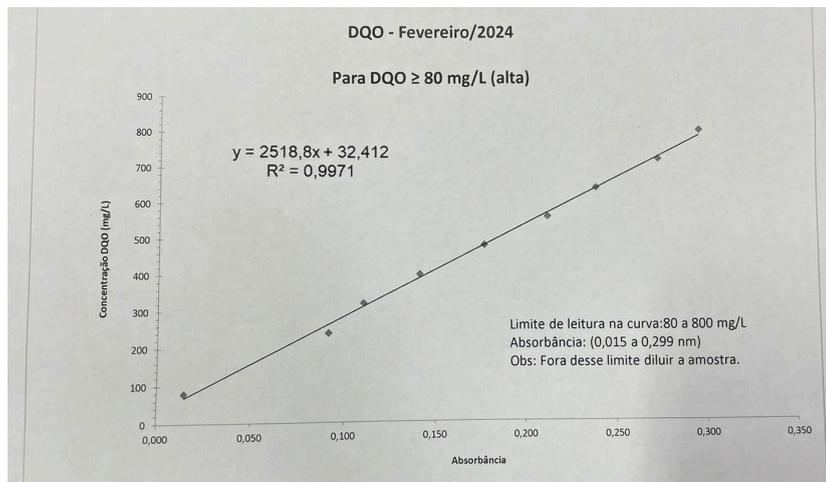
WANG, J. L.; LIU, Y.; ZHANG, Y. *Production of biofuels from lignocellulosic biomass via thermochemical processes: new biotechnological solutions*. Springer, 2018.

ZANON, J. R. *E-book Boletim de Safras de Cana* [PDF]. 2023. Disponível em: file:///C:/Users/win/Downloads/E-book_BoletimZdeZSafrasZcana_3ZlevZ2023.pdf. Acesso em: 07 mar. 2024.

ZHAI, Q.; ZHANG, J.; LI, J.; FANG, H. Optimization of pH and temperature for biogas production from co-digestion of organic wastes. *Waste Management*, v. 105, p. 385-393, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.02.033>.

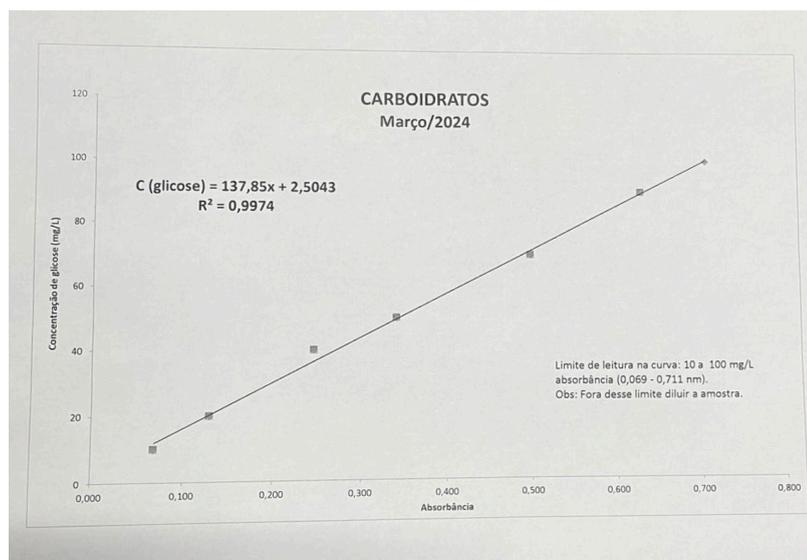
APÊNDICE

Figura 6 - Curva de calibração para determinação de DQO



Fonte: Laboratório de Saneamento Ambiental da Ufal, 2024.

Figura 8 - Curva de calibração para determinação de carboidratos.



Fonte: Laboratório de Saneamento Ambiental UFAL, 2024.