



LUANA CRISTINA SOUSA DE OLIVEIRA

**DIMENSIONAMENTO DE BIODIGESTOR ANAERÓBIO PARA GERAÇÃO DE  
BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS ALIMENTARES PROVENIENTES  
DO RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO  
MARANHÃO – UFMA**

São Luís  
2024

LUANA CRISTINA SOUSA DE OLIVEIRA

**DIMENSIONAMENTO DE BIODIGESTOR ANAERÓBIO PARA GERAÇÃO DE  
BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS ALIMENTARES PROVENIENTES  
DO RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO  
MARANHÃO – UFMA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Colegiado de Curso da Engenharia Química  
do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da  
Universidade Federal do Maranhão, como parte  
dos requisitos para obtenção do diploma de  
Graduação em Engenharia Química.

Orientadora: Profa. Dr. Jaciene Jesus Freitas Cardoso

São Luís  
2024

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Sousa de Oliveira, Luana Cristina.

DIMENSIONAMENTO DE BIODIGESTOR ANAERÓBIO PARA GERAÇÃO  
DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS ALIMENTARES  
PROVENIENTES DO RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO MARANHÃO UFMA / Luana Cristina Sousa de  
Oliveira. - 2024.

56 f.

Orientador(a): Jaciene Jesus Freitas Cardoso.

Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do  
Maranhão, São Luís, 2024.

1. Biogás. 2. Biocombustível. 3. Biodigestor. I.  
Freitas Cardoso, Jaciene Jesus. II. Título.

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus queridos pais, cuja força e inspiração iluminam meus passos e sustentam minha jornada.*

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, por ser minha fortaleza e guia em todos os momentos dessa jornada, iluminando meu caminho e concedendo-me forças para chegar até aqui.

Aos meus pais, Boanerges Oliveira e Mardeny Oliveira, por todo amor, apoio e incentivo incondicional, que foram fundamentais durante toda a minha trajetória acadêmica. Obrigado por acreditarem nos meus sonhos, por serem meu porto seguro em todos os momentos e por ensinarem que com esforço e determinação tudo é possível. Este é um passo que só foi alcançado graças a vocês.

Ao meu marido, Yan Costa, pelo companheirismo, paciência e por compartilhar essa caminhada comigo, tornando cada etapa mais leve e significativa. Agradeço pelos sorrisos nos dias difíceis e por estar ao meu lado como meu porto seguro. Também agradeço à sua família, que me acolheu com tanto carinho, fazendo-me sentir parte dela.

À minha irmã, Patrícia Poliany, que sempre foi uma pessoa forte, disposta a ajudar e apoiar nos momentos mais desafiadores. Dedico também às minhas duas sobrinhas, Alicia e Analu, que enchem nossa família de alegria e tornam os dias mais leves e felizes.

À minha avó, Marlene Brito, por todo acolhimento e suporte no início da minha jornada acadêmica.

À minha orientadora, Prof. Dra. Jaciene Cardoso, pela dedicação, sabedoria e orientações valiosas que me conduziram neste trabalho. Obrigada pela paciência ao longo desses 2 anos.

Aos membros da banca examinadora (Prof Dr. Harvey Vélez e Prof Dr. Ulisses Nascimento) pela atenção e pelas contribuições neste trabalho de conclusão. Em especial ao Prof Harvey pelos conselhos e ensinamentos durante a jornada acadêmica.

Ao Programa de Formação de Recursos Humanos da ANP (PRH-54.1), pela bolsa de apoio financeiro e pelos conhecimentos proporcionados, que foram indispensáveis para a realização deste projeto.

Ao Laboratório de Química de Interfaces e Materiais (LIM), pela estrutura e suporte na realização das análises físico-químicas das amostras, contribuindo significativamente para os resultados deste trabalho.

Ao PROAES (Pró-Reitoria de Assistência Estudantil) da UFMA, pela disponibilização dos dados necessários para a realização deste trabalho, que foi fundamental para a concretização desta pesquisa.

OLIVEIRA, L. C. **Dimensionamento de biodigestor anaeróbio para geração de biogás a partir de resíduos sólidos alimentares provenientes do restaurante universitário da Universidade Federal do Maranhão – UFMA**. 2024. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2024.

## RESUMO

Com o aumento considerável da demanda de energia e a geração de resíduos causados pelo crescente desenvolvimento dos países, gerou-se uma preocupação para mitigar o aumento das emissões de grandes quantidades de poluentes. Além disso, a contribuição do grande descarte incorreto dos resíduos orgânicos, ajuda a impactar negativamente ao meio ambiente, entre eles, a geração de gases de efeito estufa. Portanto, viu-se a necessidade de buscar fontes de energia renováveis e soluções ecologicamente corretas, por isso, este trabalho teve como objetivo dimensionar um biodigestor anaeróbico para geração de biogás a partir de resíduos sólidos alimentares provenientes do restaurante universitário da Universidade Federal do Maranhão – UFMA. A biomassa utilizada do projeto foi oriunda do restaurante universitário, a qual apresenta um alto fluxo de desperdício de comida, sendo descartado 450 quilos por dia, gerando 9000 kg de resíduos alimentar por mês. A partir das visitas feita ao restaurante, foi realizado um estudo de caso para coletar os dados necessários para o projeto. Os resultados obtidos demonstram viabilidade técnica e econômica. Com cerca de 450 kg de resíduos orgânicos processados diariamente, gerando 0,83 m<sup>3</sup> diários de substrato, o volume da câmara de biodigestão foi calculado em 18,26 m<sup>3</sup>. A produção mensal de 528 m<sup>3</sup> de biogás possibilita um aproveitamento energético de 2.185,62 kWh/mês, com alto poder calorífico. Economicamente, o projeto apresenta um fluxo de caixa anual de R\$ 53.793,72, com investimento inicial de R\$ 110.000,00, garantindo retorno em 2,84 anos, o que o torna rentável. Além disso, a comercialização de 48 créditos de carbono pode gerar R\$ 18.000,00 anuais, enquanto a venda de biofertilizantes pode acrescentar R\$ 2.191,20 por ano, ampliando a viabilidade financeira da iniciativa e gerando benefícios ambientais e econômicos.

**Palavras-chave:** Biogás; biocombustível; biodigestor; dimensionamento; resíduo alimentar.

OLIVEIRA, L. C. **Sizing of an Anaerobic Biodigester for Biogas Generation from Food Waste Produced by the University Restaurant of the Federal University of Maranhão – UFMA.** 2024. 54 f. Final Graduation Project (Graduate in Chemical Engineering) – Engineering Program of the Center for Exact Sciences and Technology at the Federal University of Maranhão, São Luís, 2024.

### **ABSTRACT**

With the considerable increase in energy demand and the generation of waste caused by the growing development of countries, there has been a concern to mitigate the rise in emissions of large amounts of pollutants. Additionally, the significant improper disposal of organic waste contributes to a negative impact on the environment, including the generation of greenhouse gases. Therefore, there was a need to seek renewable energy sources and environmentally friendly solutions. This study aimed to design an anaerobic biodigester for biogas generation from solid food waste from the university restaurant at the Federal University of Maranhão (UFMA). The biomass used in the project came from the university restaurant, which has a high food waste flow, discarding 450 kilograms per day, generating 9000 kg of food waste per month. Through visits to the restaurant, a case study was conducted to collect the necessary data for the project. The results obtained demonstrate technical and economic feasibility. Processing 450 kg of organic waste daily, generating 0.83 m<sup>3</sup> of substrate per day, the digestion chamber volume was calculated to be 18.26 m<sup>3</sup>. A monthly production of 528 m<sup>3</sup> of biogas enables an energy recovery potential of 2,185.62 kWh/month, with a high calorific value. Economically, the project presents an annual cash flow of R\$ 53,793.72 with an initial investment of R\$ 110,000.00, ensuring a payback period of 2.84 years, which makes it profitable. Additionally, the commercialization of 48 carbon credits can generate R\$ 18,000.00 annually, while the sale of biofertilizers can contribute R\$ 2,191.20 per year, further enhancing the financial viability of the initiative and generating environmental and economic benefits.

**Keywords:** Biogas; biofuel; biodigester; sizing; food waste.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Processo simplificado da digestão anaeróbia .....                                                                                                           | 27 |
| Figura 2 – Modelo de biodigestor Tubular .....                                                                                                                         | 32 |
| Figura 3 - Localização do Restaurante Universitário .....                                                                                                              | 34 |
| Figura 4 – Modelo da Caixa de Biodigestão (a) Vista frontal; (b) Vista de topo.....                                                                                    | 36 |
| Figura 5 – Geometria da caixa de entrada e saída .....                                                                                                                 | 37 |
| Figura 6 – Modelo do Gasômetro.....                                                                                                                                    | 39 |
| Figura 7 – Biodigestores de bancada (a) de 1 litro e (b) de 5 litros.....                                                                                              | 44 |
| Figura 8 - Restaurante universitário da UFMA / São Luís.....                                                                                                           | 46 |
| Figura 9 – Fluxograma da Planta de Biogás instalada no Campus. ....                                                                                                    | 54 |
| Figura 10 – Amostra o resíduo alimentar bruto para a caracterização físico-química (a) resíduo alimentar bruto (b) amostra no laboratório e (c) amostra triturada..... | 54 |
| Figura 11 – Caracterização do resíduo recolhido do restaurante universitário (a) Determinação do pH; (b) determinação de sólidos totais e sólidos voláteis.....        | 55 |
| Figura 12 – Resíduo alimentar para produção de biogás no Biodigestor de bancada B1 .....                                                                               | 56 |
| Figura 13 – Biodigestor de bancada (B4).....                                                                                                                           | 57 |
| Figura 14 – Biodigestor de bancada B4 no período de teste de biodigestão .....                                                                                         | 59 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Altura ideal para cada faixa de volume do biodigestor fluxo tubular .....                                           | 36 |
| Tabela 2: Composição de SV dos resíduos alimentares. ....                                                                     | 39 |
| Tabela 3 – Métodos de cálculos para a viabilidade econômica do projeto .....                                                  | 43 |
| Tabela 4 – Custos de ferramentas e mão de obra .....                                                                          | 50 |
| Tabela 5 – Taxas e impostos aplicados .....                                                                                   | 51 |
| Tabela 6 – Resultados da matemática financeira: Valor presente líquido (VPL), Taxa interna de retorno (TIR) e o Payback ..... | 53 |
| Tabela 7: Resultados das análises.....                                                                                        | 56 |

## SUMÁRIO

|        |                                                                                                                                          |    |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.     | INTRODUÇÃO .....                                                                                                                         | 23 |
| 2.     | OBJETIVOS .....                                                                                                                          | 25 |
| 3.     | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....                                                                                                              | 26 |
| 3.1    | RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS NO BRASIL .....                                                                                               | 26 |
| 3.2    | BIOMASSA .....                                                                                                                           | 26 |
| 3.3    | FUNDAMENTOS DO BIOGÁS .....                                                                                                              | 27 |
| 3.3.1  | Biodigestão Anaeróbica.....                                                                                                              | 27 |
| 3.3.2  | Biogás .....                                                                                                                             | 29 |
| 3.3    | BIODIGESTOR .....                                                                                                                        | 30 |
| 3.4    | DIMENSIONAMENTO BIODIGESTOR FLUXO TUBULAR.....                                                                                           | 32 |
| 4      | MATERIAL E MÉTODOS.....                                                                                                                  | 34 |
| 4.1    | CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA OBJETO DO ESTUDO.....                                                                                             | 34 |
| 4.2    | DIMENSIONAMENTO DO BIODIGESTOR .....                                                                                                     | 34 |
| 4.2.1  | Escolha do Tipo de Unidade de Biodigestor: .....                                                                                         | 34 |
| 4.2.2  | Volume da carga diária de matéria orgânica .....                                                                                         | 35 |
| 4.2.3  | Volume da câmara de biodigestão.....                                                                                                     | 35 |
| 4.2.4  | Determinação das dimensões da câmara .....                                                                                               | 35 |
| 4.2.5  | Caixa de entrada e saída .....                                                                                                           | 37 |
| 4.2.6  | Estimativa das dimensões do gasômetro .....                                                                                              | 38 |
| 4.3    | - PRODUÇÃO ESTIMADA TEÓRICA DE BIOGÁS.....                                                                                               | 39 |
| 4.4    | - ESTIMAR A QUANTIDADE DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS A SER PRODUZIDA;                                                                            | 40 |
| 4.5    | - ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO GÁS METANO PRODUZIDO.....                                                                        | 41 |
| 4.6    | - METODOLOGIA DE CÁLCULO DE CRÉDITOS DE CARBONO .....                                                                                    | 41 |
| 4.7    | - ECONOMIA, LUCROS E CUSTOS DE UM BIODIGESTOR.....                                                                                       | 42 |
| 4.7.1  | Estimativa da redução no consumo da matriz energética (energia elétrica e gás de cozinha) com o aproveitamento do biogás produzido:..... | 42 |
| 4.7.2  | Metodologia do Lucro das vendas de crédito de carbono e biofertilizante: .....                                                           | 42 |
| 4.7.2. | Estimativa de custo de um biodigestor (Modelo):.....                                                                                     | 43 |
| 4.7.3. | Estudo de viabilidade econômica da implantação do biodigestor .....                                                                      | 43 |
| 4.8.   | SIMULAÇÃO NO “ <i>DWSIM</i> SIMULATOR” DO FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS GERADO .....                                      | 44 |
| 4.9.   | CONSTRUÇÃO DO BIODIGESTOR DE BANCADA .....                                                                                               | 44 |
| 4.9.1  | Caracterização do Substrato: .....                                                                                                       | 44 |
| 4.10   | - CÁLCULO DA QUANTIDADE DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS A SER PRODUZIDA A PARTIR DOS VALORES DA CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA.....                 | 45 |
| 5.     | RESULTADOS E DISCUSSÕES.....                                                                                                             | 46 |
| 5.1.   | CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....                                                                                                   | 46 |
| 5.2.   | DIMENSIONAMENTO DO BIODIGESTOR .....                                                                                                     | 46 |
| 5.2.1  | Escolha do Tipo de Unidade de Biodigestor: .....                                                                                         | 46 |
| 5.4.   | ESTIMATIVA DA QUANTIDADE DE PRODUÇÃO TEÓRICA DE BIOGÁS A SER PRODUZIDA; .....                                                            | 49 |
| 5.5.   | ESTIMATIVA TEÓRICA DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO GÁS METANO PRODUZIDO; .....                                                                | 49 |
| 5.6.   | CÁLCULO DE CRÉDITOS DE CARBONO; .....                                                                                                    | 50 |
| 5.7.   | ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DO BIODIGESTOR; .....                                                                     | 50 |
| 5.7.1  | Custo da construção do biodigestor.....                                                                                                  | 50 |

|       |                                                                                                                        |    |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.7.2 | Taxas de licenciamento .....                                                                                           | 51 |
| 5.7.3 | Economia gerada pela utilização da energia elétrica e gás de cozinha .....                                             | 51 |
| 5.7.4 | Receita gerada pela venda dos créditos de carbono e biofertilizante .....                                              | 52 |
| 5.7.5 | Resultados da viabilidade técnica.....                                                                                 | 53 |
| 5.8.  | SIMULAÇÃO NO “ <i>DWSIM</i> SIMULATOR” DO FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS GERADO .....                    | 53 |
| 5.9.  | BIODIGESTOR DE BANCADA .....                                                                                           | 54 |
| 5.9.1 | Caracterização do substrato .....                                                                                      | 54 |
| 5.9.2 | Produção do Biogás .....                                                                                               | 56 |
| 5.9.3 | Caracterização do Biogás .....                                                                                         | 59 |
| 5.10. | CÁLCULO DA QUANTIDADE DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS A SER PRODUZIDA A PARTIR DOS VALORES DA CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA..... | 59 |
| 6.    | CONCLUSÃO.....                                                                                                         | 61 |
| 7.    | SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....                                                                                  | 62 |
|       | REFERÊNCIAS .....                                                                                                      | 63 |

## 1. INTRODUÇÃO

Na direção rumo à sustentabilidade, as universidades possuem um papel importante dentro da sociedade, seja no campo econômico, tecnológico ou social, já que são responsáveis pela formação de profissionais de diversas áreas do conhecimento, devendo cumprir de modo consciente as políticas públicas e servir de exemplo ao exercer boas práticas em suas atividades. Sendo responsáveis por consumir bens, serviços e gerar resíduos sólidos, o campus universitário deve se adequar às exigências das legislações ambientais do estado do Maranhão.

A UFMA, especificamente, em seu Estatuto (UFMA, 2017), tem como princípios a preservação do meio ambiente. O Restaurante Universitário é responsável pela produção de cerca de 4.600 refeições diariamente, e isso consequentemente gera resíduos orgânicos, ou seja, biomassa para matéria-prima para geração de bioenergia. Além disso, o aumento contínuo das tarifas e da demanda de energia elétrica e os graves problemas ambientais relacionados ao aumento de resíduos orgânicos, as preocupações ambientais com medidas de descarte de resíduos mais seguras e controladas têm feito com que as partes interessadas locais no Brasil busquem maneiras de otimizar os sistemas de tratamento de resíduos existentes (Lima *et al.*, 2018).

Em todo o mundo, a produção de resíduos sólidos urbanos está aumentando anualmente, acompanhada de padrões de consumo e urbanização. Os países emergentes liberam 109,5–525,6 kg de resíduos sólidos urbanos (RSU) por pessoa por ano, enquanto as nações industrializadas produzem tipicamente 521,95–759,2 kg de resíduos sólidos urbanos por pessoa por ano (Karak *et al.*, 2012). Globalmente, a geração de RSU ultrapassa 2 bilhões de toneladas por ano que ameaçam o meio ambiente (Karak *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2010). No Brasil, cerca de 1,3 bilhão de toneladas de alimentos produzidos vão para o lixo todos os anos e grande parte disso vai para aterros sanitários, onde a matéria orgânica se decompõe para produzir metano (Deena *et al.*, 2022). Com o emprego de biodigestores, os resíduos alimentares tornam-se fonte de geração de energia, pois a partir do processo de biodigestão anaeróbia da matéria orgânica, obtém-se sua conversão em gás metano, com alto poder energético agregando valor ao resíduo (Vidal, 2014). Essa abordagem também estabelece um sistema econômico e sustentável de gerenciamento de resíduos, promove boa saúde e segurança ao eliminar o excesso de desperdício de alimentos, evita a contaminação da água e do solo e ajuda na conservação dos recursos naturais (Reshmy *et al.*, (2021); Rena *et al.*, (2022)).

O biodigestor é um reator responsável por acontecer os processos de fermentação e produção de biogás, sob condições controladas, quanto maior o nível de controle e tecnologia utilizada, maior será a eficiência do processo (Bel Jr, 2010).

O biogás é composto por uma mistura de gases, sendo os principais o metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), juntamente com água e outros poluentes como sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ), amônia ( $\text{NH}_3$ ) e vários compostos orgânicos voláteis também estão presentes no biogás, a depender da matéria-prima. Em geral, o biogás contém metano (40–70%), dióxido de carbono (25–50%), sendo os restantes traços de outros compostos como sulfeto de hidrogênio (1–2%), nitrogênio (0–1%), hidrogênio (0–1%), siloxanos, vapor de água, um vestígio de oxigênio e monóxido de carbono. (Riva *et al.*, (2014); Mata-Alvarez *et al.*, (2014); Abbasi *et al.*, (2011)).

De acordo com Moura (2012), o poder calorífico do biogás pode chegar até a 7.000 kcal/m<sup>3</sup>, e até 12.000 kcal/m<sup>3</sup> sem a presença de gás carbônico, e por conter alto poder calorífico, o biogás pode gerar energia elétrica em turbinas, motores a diesel e ciclo de Otto, com adaptações necessárias (Calza *et al.*, 2015).

Como visto, o biogás além de ser uma fonte limpa e renovável de geração de energia, contribui para o meio ambiente, minimizando a emissão de gases do efeito estufa e para o saneamento ambiental, evitando a disposição inadequada de resíduos orgânicos. (Aneel, (2015); Silva, (2020)). Além disso, o biogás é um produto que pode gerar renda de formas variadas ao investidor e ao agricultor, que pode contribuir para o desenvolvimento das regiões próximas da planta instalada através da oferta de empregos e da redução de custos com a energia elétrica e gás de cozinha (Coelho *et al.*, 2014).

Diante do exposto, os biodigestores podem ser considerados como uma solução viável para o tratamento de resíduos sólidos e o abastecimento energético do restaurante universitário UFMA em função da simplicidade operacional, investimento, custos reduzidos e possibilidade de obtenção de receita, com a venda/distribuição do biofertilizante e, consequentemente, ter um campus universitário reconhecido no âmbito sustentável.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

Este trabalho tem como principal objetivo de dimensionar um biodigestor anaeróbico para geração de biogás a partir de resíduos alimentares provenientes do restaurante universitário da UFMA e avaliação do potencial de geração do biogás produzido.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Levantar os dados quantitativos de geração de resíduos alimentares do restaurante universitário da Universidade Federal do Maranhão;
- Estabelecer as dimensões da unidade de biodigestão adequada à quantidade de resíduos gerados no restaurante universitário;
- Estimar a quantidade de biogás a ser produzida, assim como sua conversão energética;
- Demonstrar a economia gerada pelo uso do biogás gerado a partir resíduos alimentares

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS NO BRASIL**

A geração dos resíduos sólidos urbanos está influenciada por fatores culturais, níveis econômico e social, clima, hábitos de consumo, renda e padrões de vida da população. Logo, a origem dos resíduos está diretamente vinculada às atividades básicas do ser humano (Bione, 1999). Aliado a isto, o crescimento exponencial da população também interfere diretamente no aumento da geração de resíduos sólidos, que consequentemente pode acarretar efeitos prejudiciais para a saúde da população local e do meio ambiente (Rocha, 2016). Diante deste cenário, a sociedade global em relação às questões ambientais, buscaram a criação de políticas para um desenvolvimento sustentável no planeta. No Brasil, por exemplo foram criadas a Política Nacional de Resíduos Sólidos, a qual objetiva um gerenciamento dos resíduos gerados no país (Ferreira, 2015).

O resíduo alimentar é um termo que se refere aos resíduos orgânicos oriundos de muitos processos que envolvem os alimentos em geral (Hegnsholt et al., 2018). No Brasil, aproximadamente 26 milhões de toneladas de alimentos são desperdiçados anualmente, dos quais 5,3 milhões de toneladas são de frutas e 5,6 milhões de toneladas de hortaliças (CEDES, 2018). A geração de resíduos alimentares causa um grande impacto ambiental, uma vez que são responsáveis pela emissão anual de 3,3 bilhões de toneladas de gases de efeito estufa depositados na atmosfera (CEDES, 2018).

#### **3.2 BIOMASSA**

A biomassa é qualquer matéria orgânica derivada de vegetais que possa ser transformada em energia. A matéria orgânica, pode ser de origem florestal (madeira), agrícola (soja, arroz e cana-de-açúcar, entre outras) e rejeitos urbanos e industriais (sólidos ou líquidos, como o lixo) (Fernandes, *et al.* 2011). Seu uso como fonte de energia é amplamente reconhecido como uma das alternativas mais promissoras para a geração de energia, sobretudo com foco em um futuro sustentável (EPE, 2018). Essa estratégia baseia-se na utilização de recursos naturais ou processos ambientalmente amigáveis, promovendo, essencialmente, o reaproveitamento de materiais.

O processo da biomassa para fins energéticos pode acontecer de diversas formas (rotas tecnológicas), sendo elas a combustão direta, pirólise, liquefação, gaseificação, biodigestão e seus respectivos produtos energéticos são o etanol, combustíveis líquidos, eletricidade, calor, carvão, gás, biogás, biodiesel, metanol etc. Porém, atualmente, a biomassa vem sendo bastante utilizada na geração de eletricidade, principalmente em sistemas de cogeração e no suprimento de eletricidade de comunidades isoladas da rede elétrica (PROINFA, 2012).

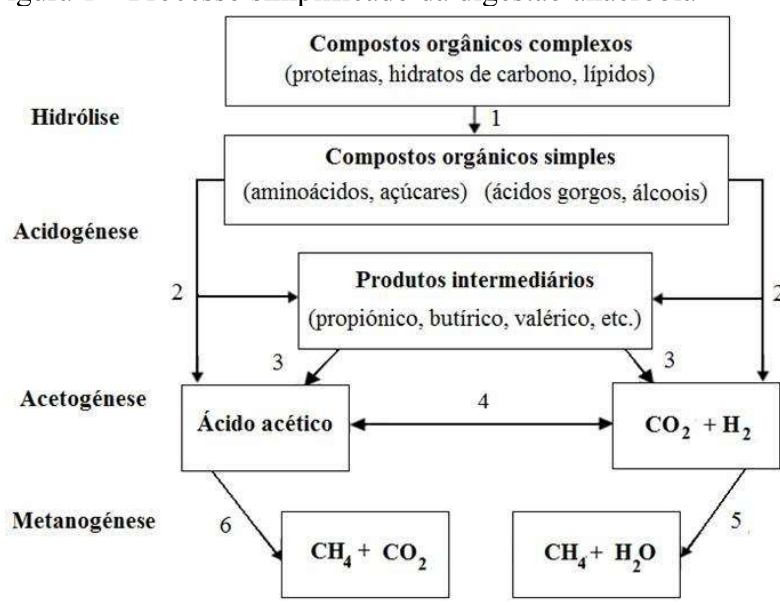
O maior potencial para a conversão energética por meio da biodigestão encontra-se nos resíduos provenientes de atividades como suinocultura, caprinocultura, equinocultura, pecuária, avicultura, entre outras (EPE, 2015). Como o Brasil é um país majoritariamente agropecuário há uma geração enorme de resíduos tanto agrícola quanto pecuário. Outros grandes destaques são os restos de alimentos ou partes não consumidas na alimentação humana, como bagaço de cana, cascas de frutas e alimentos jogados no lixo. Todos estes rejeitos são fontes ricas em carbono e são potenciais para digestão anaeróbica (Esteves, 2017).

### 3.3 FUNDAMENTOS DO BIOGÁS

#### 3.3.1 Biodigestão Anaeróbica

A digestão anaeróbia é um processo bioquímico que ocorre na ausência de oxigênio livre, no qual microrganismos altamente seletivos quebram a matéria orgânica complexa em substâncias mais simples, como ( $\text{CH}_4$ ), amônia livre ( $\text{NH}_3$ ), nitrogênio ( $\text{N}_2$ ), gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Esse processo microbiano ocorre em quatro etapas bioquímicas essenciais, nas quais os microrganismos realizam a degradação da matéria orgânica sem a presença de oxigênio (Esteves, 2017).

Figura 1 – Processo simplificado da digestão anaeróbia



Fonte: Abad 2015, adaptado de Suárez, 2014.

A hidrólise é a primeira etapa da biodigestão, responsável pela quebra das macromoléculas do substrato em moléculas menores. Segundo Karlsson *et al.* (2014), nesta etapa as enzimas das bactérias hidrolíticas rompem moléculas de proteína, hidratos de carbono, álcoois e graxas e as transformam em aminoácidos, açúcares simples e ácidos graxos, respectivamente. A quebra das macromoléculas do substrato é indispensável para que as etapas subsequentes aconteçam, pois possibilita a sua absorção pelos outros microrganismos.

A segunda etapa da biodigestão é a acidogênese, na qual as bactérias fermentativas produtoras de ácidos que transformam moléculas de proteínas, gorduras e carboidratos em ácidos graxos voláteis, álcoois, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio, amônia e sulfeto de hidrogênio, além de novas células bacterianas EPE, (2013). A acetogênese é a terceira etapa da biodigestão, as bactérias acetogênicas, que promovem a oxidação, convertem o material degradado das etapas anteriores em ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono (Karlsson *et al.*, 2014).

E a quarta e última etapa é a metanogênese, fase mais crítica e mais lenta, e é onde ocorre a formação do metano que é o componente do biogás mais esperado pela biodigestão, por ser o único composto de valor energético. Esta fase é afetada pelas condições de operação (temperatura, taxa de alimentação, TRH, pH etc.) e os microrganismos metanogênicos são mais sensíveis a interferências pois não são resistentes a alterações de pH e substâncias tóxicas (Karlsson *et al.*, (2014) e EPE, (2013)).

Os microrganismos presentes na digestão anaeróbia são, em sua maioria, bactérias que se alimentam de carbono, nitrogênio e sais minerais. A conversão de resíduos alimentares envolve um complexo processo de conversão simultânea de diversos compostos orgânicos (carboidratos, proteínas, gorduras, lignocelulose) em biogás, geralmente em um único estágio de processo (Ferreira, 2015).

Os principais fatores que afetam o processo de digestão anaeróbica são a temperatura, o potencial hidrogeniônico - pH, os nutrientes, o teor de umidade, o tipo do reator, a concentração do resíduo (Cifuentes (2015); Rocha (2016); Gonçalves (2013); Cortez (2008); Chernicharo (2007)).

- **Temperatura** – A temperatura tem efeitos importantes nas propriedades físico-químicas de componentes encontrados nos substratos anaeróbios. Também influencia a velocidade de crescimento e metabolismo dos microrganismos, e com isso, o aumento da produção de biogás (CIBIOGÁS,2020). São considerados a faixa de operação nas três gamas de temperaturas: criofílicas ou psicofílicas entre 10° C a 20°C, a mesófilas entre 20° C a 45°C e a termofílica entre 45° C a 60°C. A temperatura ideal associada com a digestão anaeróbia é entre 30° C a 35°C, podendo ocorrer também entre 50° C a 55° (Paixão, 2018).
- **pH** – O pH é necessário para o desenvolvimento dos microrganismos deve apresentar acidez e a alcalinidade com a concentração do pH entre 6 e 8, sendo ideal 7 e 7,2 (Paixão, 2018);

- **Nutrientes** – Os microrganismos anaeróbios possuem em suas células concentrações aproximadas de nitrogênio, fósforo e enxofre nas proporções aproximadas de 12, 2 e 1%, respectivamente, de matéria seca. Para o processo anaeróbio são exigidas proporções de 700:5:1 entre a demanda biológica de oxigênio, N e P (CIBIOGÁS, 2020);
- **Concentração do resíduo** – Quanto maior o teor de sólidos voláteis, maior volume de nitratos, fosfatos e sulfatos, maior será o potencial de geração de biogás (Paixão, 2018);
- **Teor de água** – O teor de água, dentro do biodigestor pode variar de 60% (biodigestores com alto teor de sólidos totais) a 90% (biodigestores com baixo teor de sólidos totais) do peso do conteúdo total (Paixão, 2018).

### 3.2.2 Biogás

O biogás é um gás inflamável obtido a partir da digestão anaeróbia de matéria orgânica (CIBIOGÁS,2020). É composto por uma mistura de gases, sendo os principais o metano (55-70%) e gás carbônico (30-45%) e o restante corresponde a traços de outros gases como: sulfetos de hidrogênio, amônia (NH<sub>3</sub>), nitrogênio (N<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO) e oxigênio (O<sub>2</sub>) (Riva *et al.*, (2014); Mata-Alvarez *et al.*, (2014); Abbasi *et al.*, (2011)).

De acordo com a definição da ANP, o biogás é um gás produzido a partir do processo da biodigestão anaeróbica, que pode ser também produzido a partir de resíduos sólidos urbanos oriundos de aterros sanitários ou do esgoto sanitário em estações de tratamento de esgoto (Esteves, 2017). Moura (2012) afirma que, o poder calorífico do biogás pode chegar até a 7.000 kcal/m<sup>3</sup>, e até 12.000 kcal/m<sup>3</sup> sem a presença de gás carbônico, e por conter alto poder calorífico. De acordo com Vieira (2015) afirma que a utilização do biogás vem-se expandindo no funcionamento de motores, geradores, moto picadeiras, resfriadores de leite, aquecedor de água, geladeira, fogão, lampião, lança-chamas.

Historicamente a China e a Índia foram os primeiros países a produzir biogás e a utilizá-lo como fonte de energia oriunda de resíduos alimentares e dejetos em geral, sendo o biogás produzido aproveitado para iluminação e cozimento Karlsson (2014). Mas o primeiro estudo da utilização de biogás ocorreu na Inglaterra, 1895 com aproveitamento de uma pequena planta, com o uso de estrume e outros materiais em uma estação de tratamento de esgotos. A cada década o processo anaeróbio vem evoluindo e expandindo nos tratamentos dos resíduos industriais e agrícolas (Paixão, 2018).

### 3.3 BIODIGESTOR

A bioenergia se dá a partir do uso de biodigestores os quais são usados como reatores anaeróbios no processo de transformação. Os biodigestores são equipamentos que fazem a fermentação anaeróbica dos resíduos orgânicos, pela ação de microrganismos e na ausência de ar, gerando compostos gasosos, em especial o gás metano e dióxido de carbono (Silva, (2020) e Oliveira, (2019)). Alimentados com biomassa, os biodigestores podem gerar grandes quantidades de biogás a partir da decomposição da matéria orgânica e é um equipamento de construção relativamente simples, sua estrutura consiste em uma câmara de digestão e um gasômetro. A câmara de digestão é onde acontece a degradação da matéria orgânica, o gasômetro encontra-se sobre a câmara de digestão e é onde o biogás fica retido para seu posterior uso (Kunz e Oliveira, 2006).

As condições químicas e físicas no interior dos biodigestores possibilitam a produção do biogás por conta do desenvolvimento favorável das bactérias que ajudam na decomposição do resíduo orgânico, dentre os fatores que compõem essas condições, tem-se a temperatura, pH e relação carbono/nitrogênio (C/N) da biomassa (Araújo, 2017). Existem diversas maneiras de classificar um biodigestor de acordo com características do projeto de implantação, como por exemplo, de acordo com o teor de sólidos voláteis (SV), abastecimento (contínuo ou batelada) e estágios. Outro fator crucial que caracteriza um biodigestor é o nível de concentração de sólidos totais voláteis (Rocha, 2016).

A classificação referente ao abastecimento do biodigestor, existe dois modos: contínuo e batelada. Quando o processo é contínuo, a recarga da biomassa é feita diariamente, proporcional a produção do biogás. E no segundo caso, batelada, quando há a recarga da biomassa, utiliza-se a capacidade máxima do reservatório, portanto, a recarga só será feita a partir da finalização do processo de biodigestão, um procedimento mais extenso que o anterior (Bezerra, 2020). E em relação à quantidade de estágios do equipamento, existem biodigestores de um estágio, dois estágios e multi-estágios. O sistema de um estágio é aquele no qual se utiliza apenas um reator para realizar simultaneamente duas etapas da transformação bioquímica, quando são rudemente simplificadas para adequar-se em um processo só. Enquanto nos sistemas de dois ou mais estágios tais etapas acontecem em reatores distintos (Rocha, 2016).

#### 3.3.1 Modelos de Biodigestores

Biodigestores são os equipamentos que fazem a fermentação anaeróbica dos resíduos orgânicos, sem a presença do ar atmosférico, por meio de um processo chamado biodigestão, gerando compostos gasosos, em especial o gás metano e dióxido de carbono (Araújo, (2017)). Existem diversos de modelos utilizados de biodigestores, os tipos frequentemente utilizados

são os do tipo contínuo, no qual o fluxo de dejetos é diário, sendo eles o modelo tubular, indiano e chinês, sendo o indiano o mais difundido pelo mundo pelo fato de sua construção ser simples e seu custo-benefício ser maior (Deganutti *et al.*, (2002)).

Cada tipo de biodigestor é usado de acordo com o uso de técnicas visando a obtenção de rendimentos mais satisfatórios e associando as tecnologias disponíveis ao tipo e frequência de oferta de resíduos e a viabilidade econômica de implantação do projeto. (Ricardo, (2012)).

#### 3.3.1.1 – Modelo Chinês

No modelo chinês, o equipamento é constituído por uma estrutura destinada para a fermentação da biomassa e armazenamento do biogás, consiste em sua estrutura, uma câmara cilíndrica feita de alvenaria com teto impermeável. A biomassa fica disposta no fundo do sistema do equipamento e o biogás fica armazenada na parte superior. De acordo com Lastella (2002), a funcionalidade do reator é baseada no princípio de prensa hidráulica, acarretando o aumentando a pressão em seu interior acumulando biogás e obtendo também a caixa de saída, recipiente onde será retirado o efluente da câmara de digestão, chamado biofertilizante (Alves, (2017)).

#### 3.3.1.2 – Modelo Indiano

No modelo indiano, o equipamento é constituído por um tanque de fermentação com duas câmaras, que promoverá a circulação da biomassa, favorecendo a digestão e terá uma campânula inclusa com função de gasômetro. O biodigestor indiano possui pressão constante e assim como no modelo chinês, a alimentação do sistema deverá ser feita de forma contínua (Alves, (2017)). Este sistema tipo de equipamento foi desenvolvido para trabalhar com alta concentração de sólidos totais de até 8%. (SAKUMA, (2013)).

#### 3.3.1.3 – Modelo Fluxo Tubular

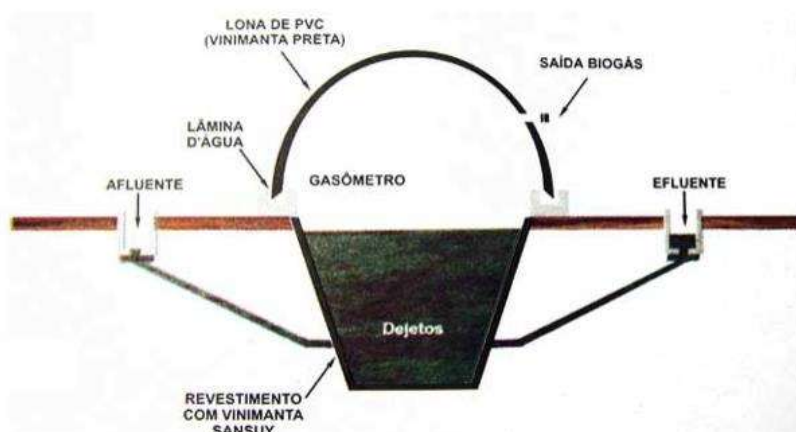
O modelo fluxo tubular, também conhecido como “canadense” ou “biodigestor de lona” ou “biodigestor de lagoa coberta”, é um tanque escavado no solo, impermeabilizado e coberto com material geossintético (PVC, PEAD), que possui característica de baixa permeabilidade a fluídos e gases, e suficientemente flexível para acumular biogás. Sua geometria é de base retangular de seção trapezoidal com inclinação do talude.

O modelo fluxo tubular é amplamente empregado no meio rural no gerenciamento dos efluentes da produção animal e é considerado de fácil construção e operação. Uma de suas características técnicas com relação à produção de biogás, é por conta do seu formato, que promove uma grande área de exposição ao sol, favorecendo a ação das bactérias que compõem o processo de digestão no interior do equipamento (Moraes, 2012). Quanto ao seu funcionamento, o fluxo de substrato é contínuo e é introduzido em uma das extremidades do

biodigestor (caixa de entrada), passando pelo processo de digestão na câmara da digestão e posteriormente, sendo descarregado o efluente (biofertilizante) do processo na outra extremidade (caixa de saída) (Morais, (2012).

O biodigestor de fluxo tubular é projetado para separar as fases de acidogênese e metanogênese ao longo de seu comprimento, permitindo que funcione como um sistema de duas fases. Essa configuração resulta em um tratamento anaeróbico mais estável, com alta taxa de depuração e eficiência na recuperação de energia, além de proporcionar uma operação mais econômica (Silva *et al.*, 2016). Outra característica do biodigestor fluxo tubular, é que podem receber substratos praticamente livres de sólidos, ou seja, possuem o teor de ST inferior a 5% (PROBIOGÁS, 2015). Entretanto, segundo CIBiogás (2020), para que este modelo funcione de maneira eficiente, é aconselhável que os teores de ST não ultrapassem 2%. A Figura 2 esquematiza o modelo tubular.

Figura 2 – Modelo de biodigestor Tubular



Fonte: Figueiredo, (2017).

### 3.4 DIMENSIONAMENTO BIODIGESTOR FLUXO TUBULAR

Para Souza e Pecci (2021), o dimensionamento correto do biodigestor é um fator importante para garantir a eficiência do processo, quando as dimensões não estiverem adequadas, terá a consequência o não atingimento do potencial total de geração de metano. Antes de iniciar o dimensionamento, os parâmetros de operação do biodigestor já devem ser definidos, de acordo com o tipo de digestão, temperatura do processo, tecnologia e quantidade de estágios (Tabatabaei e Ghanavati, 2018).

Segundo Alves (2017), o dimensionamento geométrico de um biodigestor é realizado com base na quantidade de resíduos gerados diariamente e no tempo necessário para a retenção desses resíduos no sistema, garantindo que o processo de biodigestão ocorra de forma eficiente. A escolha desse tipo de biodigestor é frequentemente associada à necessidade de dimensionamento de acordo com o número de animais em uma propriedade ou o volume de

resíduos gerados, levando em conta variáveis como a temperatura, a composição do substrato e o tempo necessário para a digestão.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA OBJETO DO ESTUDO

A matéria orgânica utilizada neste estudo, foi proveniente do descarte de alimentos da cozinha do Restaurante Universitário (RU) da Universidade Federal do Maranhão (UFMA), localizado na Avenida dos Portugueses, 1966 Campus do Bacanga, São Luís – Maranhão, CEP 65080-805 (Figura 3). Os resíduos alimentares do restaurante são gerados das sobras das refeições dos usuários e dos resíduos do processo de manipulação dos alimentos.

Figura 3 - Localização do Restaurante Universitário



Fonte: Google Maps (2024)

### 4.2 DIMENSIONAMENTO DO BIODIGESTOR

Neste tópico serão apresentadas as metodologias a respeito do dimensionamento do biodigestão considerando os tipos que melhor se enquadra no estudo assim como parâmetros de eficiência, dimensões de todas as partes componentes, volume digerido e a avaliação de sua viabilidade na geração de biogás.

#### 4.2.1 Escolha do Tipo de Unidade de Biodigestor:

Os parâmetros de operação para o projeto de um biodigestor são, em geral, baseados no tipo de digestão (seca ou úmida), na temperatura do processo (psicrofílica, mesofílica ou termofílica), no sistema de agitação (mistura completa, parcial ou sem mistura), na tecnologia (batelada, semi-continua ou contínua) e a na quantidade de estágios, tais critérios, são necessários para a construção de um biodigestor de forma que possibilitam as condições necessárias e controladas para a ocorrência da biodigestão (Kunz *et al.*, (2019); Tabatabaei e Ghanavati, (2018)). Neste trabalho, os parâmetros de operação para o projeto de dimensionamento do biodigestor foram: a digestão úmida, a temperatura mesofílica (próximos a 37°C), a alimentação semi-continua, o fluxo laminar, de único estágio e sem mistura. Foi

adotado o biodigestor de modelo fluxo tubular.

A metodologia adotada para o dimensionamento do biodigestor terá como base o modelo de ALVES (2017) e de Souza e Pecci (2021), no qual são estimadas as dimensões geométricas dos componentes do biodigestor em função da quantidade de resíduo produzida e tempo de retenção.

#### 4.2.2 Volume da carga diária de matéria orgânica

O volume de carga diária ( $V_t$ ) de biomassa se refere a soma do volume do resíduo alimentar e o volume de água diário adicionados dentro do biodigestor, o qual pode ser calculado a partir da Equação 1. O volume total diário é dado por:

$$V_t = \text{volume do resíduo alimentar} + \text{volume de água diário} \quad (1)$$

Onde:

$V_t$  = volume total diário da biomassa

#### 4.2.3 Volume da câmara de biodigestão

O volume da câmara de biodigestão está relacionado ao tempo de retenção hidráulica (TRH), ou seja, para produzir o biogás, é necessário um tempo mínimo para o desenvolvimento das bactérias anaeróbicas no interior do biodigestor. O TRH pode ser obtido através da relação entre o volume do biodigestor e a vazão de alimentação em ( $\text{m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$ ).

Segundo a literatura Souza e Pecci (2021), para a biodigestão de resíduos orgânicos, em geral, o valor de TRH é de 30 dias. O valor do volume da câmara ( $V_{\text{camara}}$ ) pode ser estimado segundo a Equação 2:

$$V_{\text{camara}} = \text{TRH} \times V_t \quad (2)$$

Onde:

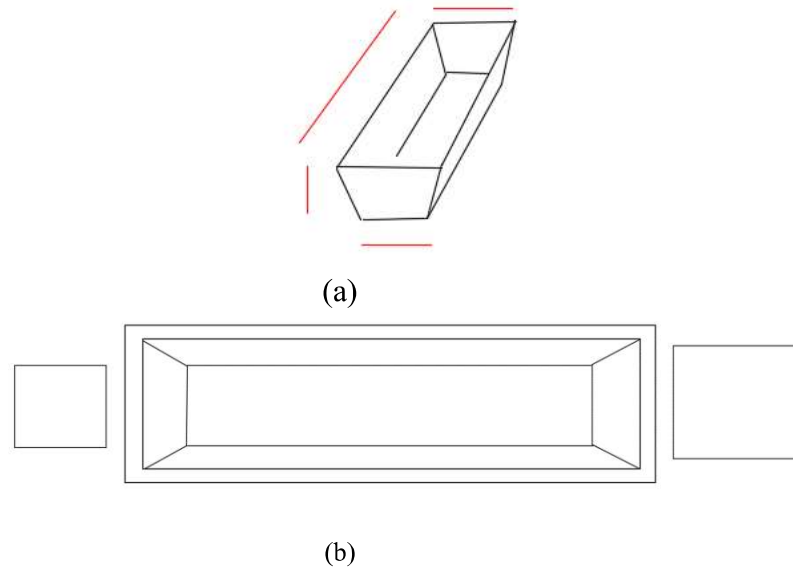
$V_t$  corresponde ao volume total diário da biomassa

TRH = tempo de retenção hidráulica

#### 4.2.4 Determinação das dimensões da câmara

Os biodigestores fluxos tubulares normalmente apresentam o formato de um trapézio invertido com a superfície superior retangular (Figura 4). a partir dessas dimensões geométricas será utilizado para a determinação das medidas de volume do biodigestor. Segundo Bartholomeu *et al.* (2007), recomenda-se que o volume geométrico de instalação seja 30% maior que o volume total calculado do biodigestor. Desta maneira, o volume da câmara de biodigestão pode ser obtido pela Equação 3.

Figura 4 – Modelo da Caixa de Biodigestão (a) Vista frontal; (b) Vista de topo.



Fonte: Produzido pela Autora (2024).

$$V_{GB} = 1,3 \times V_{câmara} = \frac{a+b}{2} \times h \times L \quad (3)$$

Onde:

$V_{GB}$  = Volume geométrico da câmara de biodigestão ( $m^3$ )

$V_{câmara}$  = volume da câmara de biodigestão ( $m^3$ )

$a$  = Largura da base maior do trapézio (m);

$b$  = Largura da base menor do trapézio (m);

$h$  = Altura do trapézio (m)

$L$  = Comprimento do biodigestor (m)

As medidas da secção transversal mostrada na Figura 3 são as incógnitas que precisam ser determinadas. Neste estudo, será considerado o ângulo de  $110^\circ$  para a inclinação das paredes do biodigestor. De acordo com Souza e Pecci (2021), o ângulo teta é igual a subtração do ângulo reto dos  $110^\circ$ , será igual a  $20^\circ$ . Para a altura do biodigestor, foram consideradas as seguintes relações conforme Tabela 1.

Tabela 1: Altura ideal para cada faixa de volume do biodigestor fluxo tubular

| Volume do biodigestor ( $m^3$ ) | Altura ideal (m) |
|---------------------------------|------------------|
| Até 100                         | 1,5              |
| Entre 100 e 500                 | 2,5              |
| Entre 500 e 2000                | 3,5              |
| Acima 2000                      | 4,5              |

Fonte: Souza e Pecci (2021) e Alves (2017)

A segunda relação é entre o comprimento ( $L$ ) e a largura ( $a$ ) adotada para o projeto será igual a 1:5, uma vez que deve ser respeitada para a manutenção das características do fluxo

hidráulico do biodigestor tubular (Alves, (2017) apud Armin, (2004)) (Feiden *et al.*, 2004). Substituindo as correlações na Equação 4, encontramos:

$$V_G = \frac{(a+b)}{2} \times h \times L \quad (4)$$

Assim, para encontrarmos os valores de a, b e L da Equação 4 será utilizada a ferramenta solver do Excel. Essa ferramenta permite ser usada para encontrar a melhor solução para problemas que envolvem a maximização ou minimização de uma função objetivo, sujeita a restrições.

#### 4.2.5 Caixa de entrada e saída

A caixa de entrada do biodigestor é o local de extremidade que serão introduzidos o substrato e a caixa de saída é onde será coletado o substrato após o processo de biodigestão. De acordo com Souza e Pecci (2021) e Alves (2017), é necessário que a caixa de entrada deva possuir volume de 20% maior que a quantidade de resíduos orgânicos gerados por dia pelo restaurante universitário ( $V_f$ ). A caixa de saída, onde é retirado o biofertilizante deve ter um volume 3 vezes maior que a caixa de entrada. E a altura das caixas devem ser de 1 m, dessa maneira, ambas apresentarão o formato quadrado (Figura 5) (Gonçalves *et al.*, 2018).

$$V_{caixa,e} = V_f \times 1,2 = P_e \times L_{caixa,e}^2 \quad (5)$$

$$P_e = 1,00; \quad L_{caixa,e} = \sqrt{V_{caixa,e}} \quad (6)$$

$$V_{caixa,s} = 3 \times V_{caixa,e} \quad (7)$$

$$P_s = 1,00; \quad L_{caixa,s} = \sqrt{V_{caixa,s}} \quad (8)$$

Onde:

$V_{caixa,e}$  = Volume da caixa de entrada ( $m^3$ );

$V_f$  = Volume de resíduo orgânico diário ( $m^3$ );

$V_{caixa,s}$  = Volume da caixa de saída ( $m^3$ );

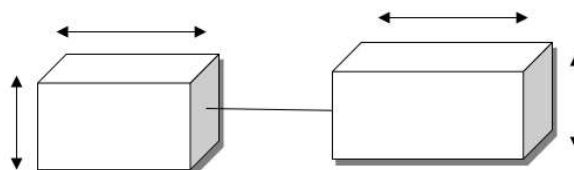
$P_e$  = Profundidade da Caixa de Entrada;

$P_s$  = Profundidade da Caixa de Saída;

$L_{Caixa,E}$  = Lateral da Caixa de Entrada;

$L_{Caixa,S}$  = Lateral da Caixa de Saída

Figura 5 – Geometria da caixa de entrada e saída



Fonte: Próprio Autora (2024).

#### 4.2.6 Estimativa das dimensões do gasômetro

O gasômetro é acoplado à parte superior da câmara de biodigestão, servindo como reservatório para o biogás gerado pela ação das bactérias anaeróbias. Esse compartimento é constituído por uma campânula, que armazena e regula o fluxo do gás produzido (Oliveira *et al.*, 2019).

Para o dimensionamento do gasômetro, utilizou-se a metodologia descrita por Araújo *et al.*, (2015) e Pederiva *et al.* (2012) que estabelece o volume do gasômetro como metade do volume útil do biodigestor. Além disso, para realizar esse cálculo, é fundamental saber a quantidade de biogás gerada diariamente em metros cúbicos, o que permite estimar o volume necessário do gasômetro, conforme descrito na Equação 9. Também foi utilizado o valor de diâmetro do biodigestor igual a 3,7 metros, conforme indicado por Pederiva *et al.*, (2012).

$$vg = \frac{vb}{2} \quad (9)$$

Onde:

$V_g$  = volume do gasômetro;

$V_b$  = volume de biogás por dia;

A metodologia para o cálculo do diâmetro do gasômetro ( $D_g$ ) está diretamente relacionada ao diâmetro do biodigestor. Esse parâmetro pode ser estimado por meio da aplicação da Equação 10, que leva em conta as dimensões do biodigestor e os ajustes necessários para o gasômetro.

$$Dg = Di + 0,10 \quad (10)$$

Onde:

$D_i$  = diâmetro do biodigestor;

$D_g$  = diâmetro do gasômetro;

0,10: corresponde a margem de segurança ou ajuste, frequentemente incluída em projetos de engenharia para compensar pequenas variações de construção, dilatação térmica ou outras tolerâncias técnicas.

Com o valor do diâmetro, calcula-se a altura útil do gasômetro, que também está relacionada com o seu volume, como mostra a Equação 11.

$$Hg \text{ útil} = \frac{4 \times Vg}{\pi \times Dg^2} \quad (11)$$

Onde:

$V_g$  = Volume gasômetro;

Hg útil = altura útil do gasômetro.

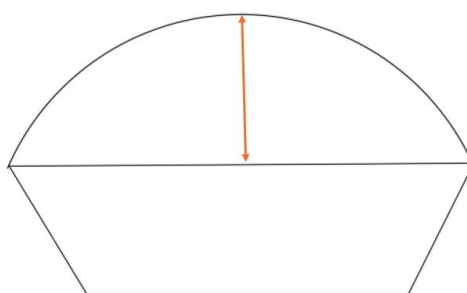
Para o cálculo da altura total do gasômetro foi adicionado na altura útil o valor de 0,15 m, correspondente ao desnível devido à pressão do biogás, e mais 0,1 m, como taxa de segurança, evitando, assim, transbordamento de acordo com Araújo *et al*, (2015).

$$Hg\ total = Hg\ util + P + taxa\ de\ segurança \quad (12)$$

Onde:

Hg total = altura total

Figura 6 – Modelo do Gasômetro



Fonte: Próprio Autor (2024).

#### 4.3 - PRODUÇÃO ESTIMADA TÉORICA DE BIOGÁS

Para a produção de biogás vários parâmetros podem afetar o rendimento. Os sólidos voláteis (S<sub>V</sub>) estão entre os fatores que contribuíram para a quantidade de produção de biogás. Para a produção de biogás vários autores estimam que a porcentagem de S<sub>V</sub> gira em torno de 22,3% para resíduos alimentares. Neste estudo, a produção estimada teórica de biogás foi calculada a partir da média dos dados de sólidos voláteis disponíveis na literatura (Moura, 2017; Rocha, 2016). A Tabela 2 apresenta a composição de S<sub>V</sub> dos resíduos alimentares da literatura e a média que será utilizada neste estudo.

Tabela 2: Composição de SV dos resíduos alimentares.

| Referência | (Zhang <i>et al</i> , 2006) | (Li <i>et al</i> ., 2011) | (Zhang <i>et al</i> ., 2011) | (Browne <i>et al</i> ., 2013) | (Zhang <i>et al</i> ., 2013) | Probio gás (2015) | Média |
|------------|-----------------------------|---------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------|-------|
| %SV        | 26,4                        | 22,6                      | 17,1                         | 27,6                          | 21,0                         | 19,0              | 22,3  |

Fonte: Rocha (2016)

A partir da quantidade de resíduos orgânicos obtidos produzidos por dia e da porcentagem da média do SV obtidos na Tabela 2, pode-se estimar o valor de SV a partir da Equação 13.

$$SV \left( \frac{Kg}{dia} \right) = Qnt\ resíduos\ (dia) \times 0,223 \quad (13)$$

Segundo dados da literatura (Moura, 2017; Ferreira (2015), uma tonelada de Sólidos Voláteis (SV) produz em média um volume de 400m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> por dia. Tendo conhecimento do resultado encontrado da composição de Kg,SV/dia este valor foi multiplicado por 400m<sup>3</sup>, que corresponde ao volume médio da produção de metano em cada tonelada de SV presente nos resíduos orgânicos, desta maneira, pode-se estimar a quantidade de biogás em m<sup>3</sup>/dia a partir da Equação 14.

$$CH_4 \left( \frac{m^3}{dia} \right) = \frac{SV \left( \frac{Kg}{dia} \right)}{1000} \times V_{CH_4} \quad (14)$$

Onde:

SV= Sólidos Voláteis (kg/dia)

V<sub>CH<sub>4</sub></sub>= Volume de metano

#### 4.4 - ESTIMAR A QUANTIDADE DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS A SER PRODUZIDA;

É possível calcular a produção de biogás mensal gerada no projeto do biodigestor. Para tanto, é preciso estabelecer a quantidade de resíduos orgânicos gerados mensalmente, em quilogramas (kg). O cálculo da massa de resíduos orgânicos em Kg/mês pode ser obtido a partir da Equação 15.

$$M_{RO} = \rho_{RO} \times V_{RO} \quad (15)$$

Onde:

M<sub>RO</sub> = Massa de resíduos orgânicos (Kg/mês);

$\rho_{RO}$  = Densidade de resíduos orgânicos (kg/L);

V<sub>RO</sub> = Volume de resíduos orgânicos (L/mês);

A partir da Tabela 2, foi possível obter a quantidade de sólidos voláteis (SV<sub>RO</sub>) que está presente na MRO. Uma vez que a concentração de SV é em média 22,3%. Os sólidos voláteis dos resíduos orgânicos (SV<sub>RO</sub>) foi determinado a partir da Equação 16.

$$SV_{RO} = \% \overline{SV} \times M_{RO} \quad (16)$$

Onde:

V<sub>RO</sub>= Quantidade de sólidos voláteis (KgSV/mês);

$\overline{SV}$  = Sólidos voláteis do substrato (%).

Segundo a literatura (Probiogás, 2015), o potencial máximo de metano médio para esse tipo de substrato corresponde a 0,488 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>.kgSV<sup>-1</sup> e o potencial de produção de biogás é de 0,850 Nm<sup>3</sup>.KgSV<sup>-1</sup>. Desta forma, a partir da Equação 14 pode-se determinar o valor mensal correspondente à produção de biogás pode ser obtido pela Equação 17:

$$\text{Produção de biogás} = P_{PB} \times \overline{SV}_{RO} \quad (17)$$

#### 4.5 - ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO GÁS METANO PRODUZIDO;

Utilizando a metodologia descrita por Coldebella *et.al* (2006), o poder calorífico inferior (PCI) do metano corresponde a 9,9 kWh/m<sup>3</sup> em condições normais de temperatura e pressão (CNTP). A partir deste dado e da quantidade da produção diária do gás metano em cada tonelada, foi possível calcular o valor da estimativa do potencial energético do gás metano produzido neste estudo pode ser obtido pela Equação 18.

$$CPICH_4 = CH_4 \left( \frac{m^3}{dia} \right) \times CPI_{CH_4} (CNTP) \quad (18)$$

Onde:

$CPI_{CH_4}$  = poder calorífico inferior do CH<sub>4</sub>

De acordo com CCE (2000), a eficiência de conversão do biogás em energia elétrica com grupos geradores (motor ciclo Otto) é de aproximadamente 25%. Sendo assim, a produção real de energia seria equivalente à produção real de CH<sub>4</sub>, que pode ser encontrada utilizando o valor do PCI e multiplicando por 25% é equivalente a produção anual real de energia, que é encontrada usando o valor da produção real de energia CH<sub>4</sub> e multiplicando pela quantidade de dias do ano, Equação 19.

$$\begin{aligned} \text{Produção real de } CH_4 &= CPI_{CH_4} \times \frac{25}{100} \\ \text{Produção anual de } CH_4 &= \text{Produção real de } CH_4 \times 365 \text{ dias} \end{aligned} \quad (19)$$

#### 4.6 - METODOLOGIA DE CÁLCULO DE CRÉDITOS DE CARBONO

A determinação para do volume de créditos de carbono foi obtido seguindo metodologia descrita por Damovich *et al.* (2007). De acordo com o autor, foi estipulado o fator de conversão de metano para créditos de carbono de 0,48 com base em metodologias de cálculo do Protocolo de Quioto e em fatores de equivalência de gases de efeito estufa fornecidos pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. Segundo o autor, a quantidade de carbono está relacionada com o volume anual de resíduo produzido em m<sup>3</sup> e o fator de conversão do metano para créditos de carbono (Equação 20).

$$C_c = VR_{ano} \times 0,48 \quad (20)$$

Onde:

$C_c$ : Crédito de carbono equivalente;

$VR_{ano}$ : Volume anual de resíduo produzida em m<sup>3</sup>;

0,48: Fator de conversão do metano para créditos de carbono.

## 4.7 – ECONOMIA, LUCROS E CUSTOS DE UM BIODIGESTOR

### 4.7.1 Estimativa da redução no consumo da matriz energética (energia elétrica e gás de cozinha) com o aproveitamento do biogás produzido:

O cálculo da viabilidade econômica foi realizado a partir do levantamento de todos os custos com a implantação de acordo com adaptações da metodologia descrita por Alves (2017) e Gonçalves *et al.*, (2018). Com o intuito de visualizar os valores da possível redução significativa na demanda da matriz energética, este estudo fez a estimativa da redução no consumo da matriz energética do campus a partir do levantamento de dados sobre o consumo de gás de cozinha mensalmente no RU.

O cálculo da estimativa de redução no consumo de gás de cozinha foi realizado a partir da correlação da quantidade de biogás em relação ao GLP seguindo adaptações da metodologia descrita por Motta (1986) o qual descreve a relação de 1m<sup>3</sup> de biogás equivale 0,40 kg de GLP.

Em relação a energia elétrica, o RU não possui um medidor individual de energia elétrica. Diante disso, foi realizado um levantamento de dados sobre o consumo de energia elétrica nos restaurantes universitários seguindo adaptações da metodologia descrita por Costa *et al.*, (2016). A fim de analisar o valor da potência em watts, foi realizado um levantamento de dados foi relacionando aos equipamentos (ar-condicionado, liquidificador industrial, câmara frigorífica, bebedouros, ventiladores, refrigerador industrial) que consomem a energia elétrica em restaurantes universitários. O cálculo do consumo de energia elétrica foi realizado através do site “*Energy.gitcoy*” que dará o resultado do valor a ser pago mensalmente.

### 4.7.2 Metodologia do Lucro das vendas de crédito de carbono e biofertilizante:

Para o cálculo da vendas do crédito de carbono foi utilizado a metodologia segundo Gonçalves *et al.*, (2018) que fez uma estimativa que o preço por crédito de carbono foi obtido de mercados de carbono vigentes na época (como o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo - MDL). Portanto foi adotado um valor médio de (5,00 euro) por crédito de carbono. Esse valor foi adotado com base em estimativas de preços praticados no mercado internacional de carbono no período do estudo e com o valor correspondente do euro como sendo de R\$ 6,10, teremos que o valor anual arrecadado com a venda de créditos de acordo com a Equação 21.

$$ReceitaCc = Cc \times \text{€}5,00 \times \text{R\$ } 6,10. \quad (21)$$

Onde:

Cc = Crédito de carbono;

Para o cálculo do lucro da venda do biofertilizantes sólidos foi utilizado a metodologia segundo Gonçalves *et al.*, (2018). De acordo com MORAIS (2012), citado por Gonçalves, o

biofertilizante usado nas áreas agrícolas com um custo de R\$ 10,00 por m<sup>3</sup>. Com isso, foi calculado a receita de biofertilizantes de acordo com a Equação 22.

$$Receita_{bio} = V_{dia} \times Custo_{bio} \times ano \quad (22)$$

Onde:

$V_{dia}$ : volume total de resíduo por dia (m<sup>3</sup>)

$Custo_{bio}$ : Custo do biofertilizante (R\$ 10,00 por m<sup>3</sup>)

#### 4.7.2. Estimativa de custo de um biodigestor (Modelo):

A estimativa de custo de um biodigestor foi realizada com base de orçamento para a construção de um biodigestor com os preços unitários dos materiais utilizados. Os custos unitários dos materiais serão consultados nas tabelas do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (Sinapi, 2022).

#### 4.7.3. Estudo de viabilidade econômica da implantação do biodigestor

O cálculo da viabilidade econômica é feito a partir do levantamento de todos os custos com a implantação de acordo com a metodologia de Alves (2017) e Gonçalves et al.,(2018).

Para o cálculo do lucro das vendas do crédito de carbono e biofertilizantes foi utilizado a metodologia segundo Gonçalves *et al.*,(2018). Para o cálculo da viabilidade econômica serão usados critérios da matemática financeira, como o Valor presente líquido (VPL), Taxa interna de retorno (TIR) e o Payback. A Tabela 3 encontra-se as Equações 23, 24 e 25 que serão usadas nesta sessão de matemática financeira.

| Tabela 3 – Métodos de cálculos para a viabilidade econômica do projeto |      |                                 |
|------------------------------------------------------------------------|------|---------------------------------|
| <i>Metodologia de cálculo</i>                                          |      | <i>Fonte</i>                    |
| <i>Cálculo do VPL</i>                                                  |      |                                 |
| $VPL = -C_0 + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(1+r)^n}$                        | (23) | Gonçalves <i>et al.</i> ,(2018) |
| <i>TIR</i>                                                             |      |                                 |
| $0 = -C_0 + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(1+r)^n}$                          | (24) | Gonçalves <i>et al.</i> ,(2018) |
| <i>Payback</i>                                                         |      |                                 |
| $Payback = \frac{Inv_{ini}}{F_{cx}}$                                   | (25) | Gonçalves <i>et al.</i> ,(2018) |

Fonte: produzido pela autora.

#### 4.8. SIMULAÇÃO NO “DWSIM SIMULATOR” DO FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS GERADO

A cadeia de produção e aproveitamento energético do biogás passa por algumas etapas, que se inicia com o pré-tratamento, até seu aproveitamento energético na geração de energia elétrica, onde vários sistemas devem ser dimensionados. Neste estudo, para o dimensionamento do biodigestor foi realizado um fluxograma no Simulador “DWSIM Simulator”.

#### 4.9. CONSTRUÇÃO DO BIODIGESTOR DE BANCADA

Para a construção do biodigestor de bancada foram confeccionados dois protótipos de biodigestor com volumes distintos de 1 (um) e 4 (quatro) litros, ambos de vidros. Para a construção do biodigestor, será utilizado um pote de vidro, as tampas foram perfuradas para armazenamento do biogás através do balão. Tudo foi vedado com fita veda rosca, para evitar possíveis vazamentos. O sistema será vedado e revestido com papel alumínio para manter a temperatura do sistema. A Figura 7 apresenta os biodigestores utilizados para os testes reais de produção de biogás.

Figura 7 – Biodigestores de bancada (a) de 1 litro e (b) de 5 litros



(a)



(b)

Fonte: Produzido pela Autora (2024).

##### 4.9.1 Caracterização do Substrato:

Os resíduos alimentares do RU foram caracterizados quanto o pH, o teor de sólidos voláteis, o teor de sólidos totais e DQO, conforme os procedimentos descritos a seguir:

###### Potenciométrica do pH

O pH foi determinado diretamente na amostra diluída com água destilada. Para isso, foi utilizado o pHmetro modelo PHS3BW, marca Bel Equipamentos. Antes das análises o pHmetro foi calibrado com soluções tampão de pH 7 e pH 4.

###### Determinação sólidos totais e sólidos voláteis totais

Inicialmente cerca de 40 g da amostra foi adicionada no cadinho e, em seguida, levada a estufa a 105°C, correspondente à massa de sólidos totais. Posteriormente, a amostra foi levada

a uma mufla e aquecida a 550°C por 2 horas e 30 minutos. A massa restante correspondeu à massa de sólidos voláteis. A determinação dos teores de sólidos totais e voláteis foi realizada de acordo com a metodologia descrita por APHA; AWWA; WEF (1998).

#### **4.9.2 Produção e Caracterização do Biogás**

Para a produção do biogás, inicialmente cerca de 300g de resíduos alimentares do RU foram triturados com o objetivo de diminuir sua granulometria e, conseqüentemente, aumentar a área superficial para que os microrganismos aproveitassem ao máximo os nutrientes. Os biodigestores serão alimentados com o substrato com diluição de água com proporção de 1:1 e, o processo de biodigestão será monitorado por 30 a 50 dias.

A caracterização do biogás foi realizada utilizando o kit portátil para análise de biogás, adquirido da empresa Alfakit. O Kit permite que através do método colorimétrico ou volumétrico, um volume do gás entre em contato com determinados reagentes. Assim as análises de gás sulfídrico ( $H_2S$ ) e amônia ( $NH_3$ ) presentes do biogás são feitas de maneira colorimétrica e dióxido de carbono ( $CO_2$ ) volumétrica sendo a concentração de metano ( $CH_4$ ) obtida pela diferença. Para a execução das análises de biogás pelo Kit Alfakit, será coletado o biogás produzindo nos biodigestores de bancada.

#### **4.10 - CÁLCULO DA QUANTIDADE DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS A SER PRODUZIDA A PARTIR DOS VALORES DA CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA**

O cálculo da produção estimada de biogás foi realizado a partir da Equação 15 descrita no item 4.5. Os valores dos sólidos voláteis obtido experimentalmente a partir das análises físico-química do substrato foi obtido segundo descrito no subitem 5.9.1, será utilizado para substituir a incógnita " $\overline{SV}$ " na referida Equação 16. Desta maneira, e assim será obtido a quantidade de produção de biogás a partir do dado experimental.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O restaurante universitário da UFMA do campus de São Luís, segundo dos da Pró Reitoria de Assistência Estudantil (PROAES) serve cerca de 4300 refeições por dia. Considerando-se o período de aquisição dos dados pela PROAES, o restaurante gerou 450 kg/dia de resíduos alimentares a serem destinados ao lixo o que corresponde a 9900 kg/mês, considerando que os resíduos são gerados de segunda a sexta servindo refeições no almoço e jantar. A Figura 8 mostra o restaurante universitário da UFMA campus Dom Delgado.

Figura 8 - Restaurante universitário da UFMA / São Luís



Fonte: Produzido pela Autora (2024).

### 5.2. DIMENSIONAMENTO DO BIODIGESTOR

#### 5.2.1 Escolha do Tipo de Unidade de Biodigestor:

Neste estudo, foi adotado o biodigestor de fluxo tubular pelo fato do clima tropical quente e úmido de São Luís favorecer a eficiência do processo de digestão anaeróbica. Além disso, o biodigestor de fluxo tubular é particularmente adequado para regiões com temperaturas elevadas, uma vez que a atividade microbiana responsável pela decomposição dos resíduos orgânicos é intensificada nessas condições. De acordo com o estudo de Chernicharo (2007), biodigestores em áreas tropicais tendem a operar de forma mais eficiente devido à estabilidade térmica natural proporcionada pelo ambiente.

Os parâmetros de operação para o projeto de dimensionamento do biodigestor foram a digestão úmida, a temperatura mesofílica (próximos a 37°C), a alimentação semi-continua, o fluxo laminar, de único estágio e sem mistura.

Outro fator determinante para a escolha deste tipo de biodigestor foi a simplicidade e durabilidade. O sistema de fluxo tubular é eficiente e compacto, o que facilita sua instalação em áreas com espaço limitado, como algumas zonas rurais e periurbanas de São Luís. Essa

tecnologia também requer menos mão de obra especializada para sua operação, permitindo que pequenos produtores e cooperativas possam gerenciar o sistema com treinamento básico (Silva *et al.*, 2019).

O resíduo obtido também é um dos requisitos para a escolha do biodigestor uma vez que o resíduo digestado pode beneficiar a agricultura local, que é uma atividade relevante para a economia da região. O uso de biofertilizantes melhora a qualidade do solo e reduz a necessidade de insumos químicos, promovendo práticas agrícolas mais sustentáveis (Rodrigues *et al.*, 2018).

### **5.2.2 Volume do Biodigestor**

O volume do biodigestor está relacionado com a quantidade de matéria orgânica disponível para a produção do biogás. Neste caso, temos como resíduo um substrato sólido. Para este tipo de substrato e, de acordo com literatura (Silva e Santos, 2009), a densidade para a fração de matéria orgânica é igual a 1.213 kg/m<sup>3</sup>. Como a relação de substrato e água deste estudo foi de 1:1, logo 450 kg de resíduo alimentar precisaria de 450 L de água.

### **5.2.3 Volume da carga diária de matéria orgânica**

Uma vez que a carga diária de biomassa é a soma do volume do resíduo alimentar e o volume de água diário no qual o volume de água calculado anteriormente foi de 0.45 m<sup>3</sup> e, baseado na densidade da matéria orgânica tem-se o volume de resíduos diários de aproximadamente 0,38 m<sup>3</sup>. Desta maneira, utilizando a Equação 1, descrita no item 4.2.2, o volume total diário é encontrado no valor de 0,83 m<sup>3</sup>.

### **5.2.4 Volume da câmara de biodigestão**

Como mencionado no item 4.2.3, para produzir o biogás, é necessário do tempo mínimo para o desenvolvimento das bactérias anaeróbicas. Neste estudo, para o cálculo do volume da câmara de biodigestão, foi considerado o tempo de 22 dias, uma vez que aos finais de semana o biodigestor não será alimentado. Sendo assim, utilizando a Equação 2, o valor do volume da câmara de biodigestor, correspondente à 18,26 m<sup>3</sup>.

### **5.2.5 Determinação das dimensões da câmara**

A partir do volume total da câmara de biodigestão, será possível então calcular o volume geométrico do biodigestor, usando a recomendação segundo Bartholomeu *et al.* (2007), para que o volume geométrico de instalação seja 30% maior que o volume total calculado do biodigestor, para assegurar assim um volume de segurança. De acordo com a Equação 3, o volume geométrico do biodigestor é de 23,738 m<sup>3</sup>.

Sabendo que o modelo proposto neste estudo foi o biodigestor de fluxo tubular proposto cujo formato corresponde a um trapézio invertido com a superfície superior retangular.

Desta maneira, utilizando a ferramenta solver do Excel foi possível obter os valores de a, b e L do biodigestor (Figura 4). Desta maneira, para as dimensões a, b e L foram obtidos os valores de 4,06 m, 2,17 m e 5,02 m, respectivamente.

Além disso, com base na Tabela 1, a altura foi definida como 1,5 metros de acordo com Alves (2017), visto que o volume total do biodigestor não ultrapassa de 100 m<sup>3</sup>, atendendo aos limites estabelecidos para o projeto.

#### **5.2.6 Caixa de entrada e saída**

Considerando o volume de carga diária de 0,83 m<sup>3</sup>, acrescido de 20% e utilizando a Equação 5, foi obtido um valor de 0,99 m<sup>3</sup>. Além disso, considerando o padrão para a profundidade da caixa de entrada de 1 metro, as laterais da caixa de entrada serão iguais a 1,39 metros e as paredes da caixa de saída terão 2,4 metros de largura.

Com relação a caixa de saída, considera-se a mesma profundidade, ou seja, 1 m e um tamanho três vezes maior que a caixa de entrada. A partir da Equação 7 foi calculado o volume da caixa de saída, sendo igual a 5,11 m<sup>3</sup>.

#### **5.2.7 Estimativa das dimensões do gasômetro**

Considerando que a quantidade de resíduo eliminado diariamente é de aproximadamente 450 kg, a produção de biogás estimada é de 32,41 m<sup>3</sup>/dia, o que equivale a 1 m<sup>3</sup>/h, ou seja, 24 m<sup>3</sup> de biogás por dia. Com base nesses dados, o volume do gasômetro corresponde a 12 m<sup>3</sup>/dia (Equação 9). A partir disso, é possível calcular a altura útil do gasômetro utilizando a Equação 11, que resulta em 1,06 metros.

Para o dimensionamento do biodigestor foi adicionado na altura útil 0,15 metros, correspondente ao desnível devido à pressão do biogás e, mais 0,1 m, como taxa de segurança, evitando, assim, transbordamento (Araújo *et al*, 2015). Dessa forma, ao todo foram adicionados 0,25 metros na altura útil. Assim, a altura útil final do gasômetro é de 1,31 metros (Equação 12).

### **5.3. ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO TEÓRICA ESTIMADA DE BIOGÁS**

Sabendo-se que quantidade diária de 450 kg de resíduos orgânicos e multiplicando pelo percentual médio de sólidos voláteis, 0,223 (Tabela 2), a quantidade de sólidos voláteis encontrada é de 100,35 kgSV/dia.

Considerando ainda, com base na literatura (Ferreira, 2015), que uma tonelada (1.000 kg) de sólidos voláteis, na CNTP, produz, em média, 400 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>, neste estudo, a produção diária de biometano foi equivalente a 40,14 m<sup>3</sup>/dia.

#### 5.4. ESTIMATIVA DA QUANTIDADE DE PRODUÇÃO TEÓRICA DE BIOGÁS A SER PRODUZIDA;

Utilizando a Equação 15, espera-se que os 9.900 Kg de resíduos sólidos orgânicos gerados mensalmente no restaurante universitário possuam em média 838 Kg de SV e que o potencial de produção de biogás seja de  $0,85 \text{ Nm}^3.\text{KgSV}^{-1}$ . Assim, a produção estimada de biogás é de  $712,3 \text{ m}^3/\text{mês}$ .

Por se tratar de um gás, a unidade utilizada ( $\text{Nm}^3$ ) é uma convenção padrão de medida. Utilizando parâmetros de referência da cidade de São Luís (temperatura:  $28^\circ\text{C}$ ; altitude: 64 metros (de acordo com mapa topográfico); e umidade relativa: 77%) encontrou-se o valor de produção de biogás igual a  $528 \text{ m}^3/\text{mês}$ .

A produção teórica de  $528 \text{ m}^3/\text{mês}$  de biogás é considerada satisfatória, pois se encontra dentro dos intervalos observados em projetos semelhantes. Segundo o estudo de Siqueira *et al.* (2017), a produção de biogás em biodigestores rurais que utilizam aproximadamente 500 kg de resíduos por dia resultou em uma média de  $540 \text{ m}^3/\text{mês}$ . De forma complementar, Faria *et al.* (2020) relatam que biodigestores de pequeno porte, que processam entre 400 e 500 kg de resíduos orgânicos diariamente, podem gerar entre 500 e  $600 \text{ m}^3$  de biogás por mês, com a produção variando em função de fatores como temperatura e qualidade dos resíduos. Dessa forma, o resultado obtido de  $528 \text{ m}^3/\text{mês}$  indica que a conversão de resíduos em biogás no projeto é eficiente, considerando o volume de biomassa processado.

#### 5.5. ESTIMATIVA TEÓRICA DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO GÁS METANO PRODUZIDO;

Sabendo o valor de biometano é aproximadamente  $40,14 \text{ m}^3/\text{dia}$ , a produção real de energia seria equivalente à produção real de  $\text{CH}_4$ , que pode ser encontrada utilizando o valor do PCI e multiplicando por 25% é equivalente a produção anual real de energia, que é encontrada usando o valor da produção real de energia  $\text{CH}_4$  e multiplicando pela quantidade de dias do mês, conforme a Equação 19, obtemos o valor de  $2.185,62 \text{ kWh/mês}$  a produção real de  $\text{CH}_4$  mensalmente.

A estimativa de  $2.185,62 \text{ kWh/mês}$  obtida, com a utilização de 450 kg de resíduos diários como biomassa, está em linha com o esperado para projetos de biodigestores de pequeno a médio porte. De acordo com Kocar e Civas (2013), biodigestores operando com resíduos sólidos urbanos ou agrícolas, com uma carga semelhante de 400 a 500 kg de biomassa por dia, podem gerar entre 2.000 e  $2.500 \text{ kWh/mês}$  de energia.

Em outro estudo, Chernicharo (2007) analisou a produção de biogás em biodigestores utilizando resíduos orgânicos em média de 400 a 500 kg por dia. O potencial energético

encontrado foi de 1.800 a 2.200 kWh/mês, dependendo da eficiência do processo e da quantidade de metano capturado. Dessa forma, a estimativa encontrada de 2.185,62 kWh/mês também se encontra dentro dos limites observados, o que indica que o sistema utilizado é eficiente e segue os parâmetros técnicos adequados para a conversão de resíduos em energia.

5.6. CÁLCULO DE CRÉDITOS DE CARBONO;

Sabendo o volume anual de resíduo produzido, que é aproximadamente 100 m<sup>3</sup> anual e usando a Equação 20, obteremos 48 quantidades de crédito de carbono que irá compensar cada tonelada de CO<sub>2</sub> que deixou de ser lançado na atmosfera.

O resultado obtido é considerado excelente, quando comparado com outros trabalhos literários. Por exemplo, Zhang *et al.* (2014) relataram a obtenção de 45 créditos de carbono em instalações com capacidade de processamento de 90 metros cúbicos de resíduos orgânicos na China. Em outro estudo, Silva *et al.* (2017) investigaram a obtenção de créditos de carbono em pequenas propriedades agrícolas no Brasil, com resultados variando entre 40 e 60 créditos de carbono anuais para volumes de resíduos que variavam entre 100 e 150 metros cúbicos. Logo, o resultado obtido demonstra ser positivo, no ponto de vista ambiental e econômico.

Além disso, a possibilidade de comercialização desses créditos no mercado de carbono oferece uma oportunidade viável de retorno financeiro, integrando a sustentabilidade ambiental com a viabilidade econômica. Assim, o projeto não só contribui para a mitigação das mudanças climáticas, mas também se apresenta como uma solução economicamente sustentável.

5.7. ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DO BIODIGESTOR;

5.7.1 Custo da construção do biodigestor

Foi calculado o custo de implantação do biodigestor em função do volume, em m<sup>3</sup> da caixa de carga, sabendo que o volume do biodigestor é de até 100 m<sup>3</sup>, foi obtido o valor do custo em R\$ 45.700,00. Além do gerador elétrico para a geração de energia elétrica no valor de R\$35.000,00.

A Tabela 4 apresenta os custos unitários das ferramentas utilizadas para a construção foram consultados nas tabelas do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil para o ano de 2024 (SINAPI, 2024).

Tabela 4 – Custos de ferramentas e mão de obra

| Ferramentas e mão de obra | Quantidade | Preço unitário (R\$) |
|---------------------------|------------|----------------------|
| Trena (fita métrica) 10m  | 01         | 26,53                |
| Extensão elétrica         | 01         | 248,50               |
| Furadeira                 | 01         | 450,90               |
| Kit serra copo            | 01         | 89,22                |

|                          |            |        |
|--------------------------|------------|--------|
| Cola silicone            | 01         | 30,60  |
| Chave para tubo 18"      | 01         | 180,45 |
| Chave Philips 3/16x5"    | 01         | 12,20  |
| Chave de fenda 3/16x6"   | 01         | 11,20  |
| Alicate de pressão 10"   | 01         | 72,10  |
| Serra manual 12"         | 01         | 34,50  |
| Lápis carpinteiro        | 01         | 3,20   |
| Fita isolante 19mm x 20m | 01         | 9,80   |
| Escavação mecânica       | 2hrs       | 155,00 |
| Pedreiro                 | 10 diárias | 100,20 |
| Ajudante                 | 10 diárias | 70,30  |

Fonte: Produzido pela Autora (2024).

### 5.7.2 Taxas de licenciamento

Foi usado a metodologia de (Junges *et al.*, 2009), citado por Gonçalves, para obter os valores referentes ao licenciamento do biodigestor, conforme a Tabela 5.

| Tabela 5 – Taxas e impostos aplicados |                    |
|---------------------------------------|--------------------|
| <b>Taxa e Impostos</b>                | <b>Valor (R\$)</b> |
| Licença prévia                        | 8.037,19           |
| Licença de instalação                 | 8.744,06           |
| Licença de operação                   | 6.429,75           |
| Custo total                           | 23.211,00          |

Fonte: Junges *et al.*, 2009

### 5.7.3 Economia gerada pela utilização da energia elétrica e gás de cozinha

Neste estudo, foi considerado o consumo de energia de alguns aparelhos de cozinhas universitárias, tendo-se uma potência média dos aparelhos no valor de 8.355 watts. Sabendo que a empresa local cobra R\$0,6427 em tarifa convencional à estabelecimentos de poder público e utilizando a calculadora de consumo de energia elétrica do site “*Energy.gitcoy*”, o total do consumo desses aparelhos (liquidificador industrial, refrigeradores industriais, forno elétrico industrial, câmaras frigoríficas) foi de 6015,60 kWh mensalmente, sendo utilizados por 24 horas por dia.

Neste sentido, foi estimado o valor de R\$3.866,23 reais de gastos com energia elétrica por mês. Todavia, a utilização do gerador elétrico para a conversão do biogás em energia elétrica, teremos uma economia abatida na conta de energia de R\$1.400,21 reais mensais.

Com as informações obtidas pela PROAES, o restaurante universitário consome em média 2170 kg por mês de consumo de gás de cozinha e, de acordo com dados da literatura, 1m<sup>3</sup> de biogás equivale 0,40 kg de GLP (Motta, 1986). Portanto, teremos 528 m<sup>3</sup>/mês de biogás equivalente a 211 kg de GLP por mês, ou seja, não irá suprir a demanda total de gás de cozinha

do restaurante universitário, mas economizará 14 botijas de 13 kg, tendo uma economia de R\$ 1.400 reais mensais.

Estudos como o de Costa e Souza (2019) indicam que o uso de biodigestores para a geração de biogás pode reduzir até 60% dos custos com eletricidade e gás em áreas urbanas e rurais, o que demonstra o grande potencial econômico dessa tecnologia em diferentes contextos. Dias e Silva (2017) complementam essa análise ao relatar que, em fazendas, a adoção de biodigestores resultou em uma redução de 30% a 50% nas despesas com eletricidade e gás de cozinha. Esses dados reforçam que o uso do biogás não apenas proporciona economia significativa, mas também contribui para uma gestão energética mais eficiente e sustentável, especialmente em locais com grande disponibilidade de resíduos orgânicos.

#### **5.7.4 Receita gerada pela venda dos créditos de carbono e biofertilizante**

A implementação do biodigestor não apenas permite a obtenção de biogás, mas também oferece benefícios econômicos, como a utilização do biofertilizante e a venda de créditos de carbono. Como o preço dos créditos de carbono oscila no mercado, semelhantemente a uma bolsa de valores (Gonçalves *et al.*, 2018), foi considerado um valor médio em euros para os cálculos do retorno financeiro. Foram obtidos 48 créditos de carbono, que resultou em uma receita anual calculada estimada de R\$ 18.000,00. De acordo com a *International Carbon Action Partnership - ICAP 2023*, o preço médio dos créditos de carbono no mercado global apresenta valores variando entre US\$ 20 e US\$ 50 por tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente, dependendo da região e do projeto. Isso demonstra que a receita gerada pela venda dos créditos de carbono é competitiva e oferece um retorno financeiro eficiente.

Já o lucro obtido com a comercialização de biofertilizantes, utilizando a metodologia de Moraes (2012), conforme citado por Gonçalves *et al.* (2018), foi estimado em R\$ 10,00 por metro cúbico, resultando em uma receita anual de R\$ 2.191,20. No contexto dos biofertilizantes, o mercado brasileiro tem apresentado um crescimento acelerado, impulsionado pela crescente demanda por práticas agrícolas sustentáveis, conforme ressaltado por Silva *et al.* (2018). Essa tendência reflete não apenas a valorização dos insumos orgânicos, mas também a crescente conscientização sobre a importância da sustentabilidade na agricultura, o que reforça a relevância econômica e ambiental do uso de biofertilizantes.

Tanto o mercado de créditos de carbono quanto o de biofertilizantes têm mostrado crescimento constante, impulsionados por demandas ambientais e de sustentabilidade.

### 5.7.5 Resultados da viabilidade técnica

Com os valores de receitas, custos anuais e com a ajuda do software Excel, foi possível obter o tempo exato do *Payback*, fluxo de caixa anual e assim obter o VPL e TIR do investimento, apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Tabela 6 – Resultados da matemática financeira: Valor presente líquido (VPL), Taxa interna de retorno (TIR) e o Payback

| <i>VPL (R\$)</i> | <i>TIR (%)</i> | <i>Payback (anos)</i> |
|------------------|----------------|-----------------------|
| 74.407,98        | 27,00          | 2,84                  |

Fonte: produzido pela autora.

Observou-se que há viabilidade econômica para a implementação do biodigestor, sabendo que o fluxo de caixa é de R\$ 42.593,52 reais e com investimento inicial de R\$110.000,00 reais, a implantação do projeto daria um retorno de investimento em 2,84 anos.

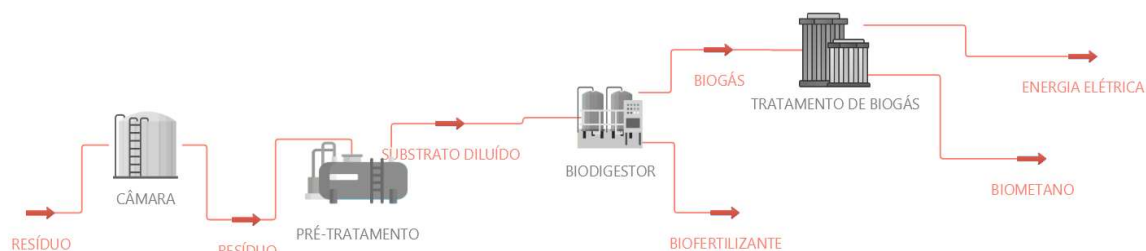
### 5.8. SIMULAÇÃO NO “*DWSIM SIMULATOR*” DO FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS GERADO

Neste estudo, foi utilizado o programa *DWSIM Simulator*, este programa é um simulador de processos químicos que permite modelar os sistemas de processos industriais, como unidades de tratamento, reatores e separadores.

Este fluxograma foi sugerido para um processo em batelada de produção de biogás. O processo de produção de biogás começa com o armazenamento dos resíduos orgânicos em uma câmara. A câmara com volume de 18,26 m<sup>3</sup> irá receber os resíduos coletados semanalmente, que serão inseridos em um tanque de pré-tratamento. Neste tanque, os resíduos serão diluídos com água para facilitar a digestão no biodigestor e melhorar a decomposição da matéria prima. Após o pré-tratamento, o material será encaminhado ao biodigestor onde ocorrerá a decomposição da matéria orgânica. O processo de biodigestão irá acontecer em 22 dias gerando biogás, conforme previsto nos estudos teóricos. Em seguida, o biogás será encaminhado para o sistema de tratamento que removerá impurezas, como umidade, enxofre e CO<sub>2</sub>, produzindo assim o gás biometano. O sistema de tratamento de gás consiste basicamente em filtrar, purificar e comprimir o gás para fins de remoção de impurezas, umidade e compostos indesejados do biogás.

O subproduto obtido, ou seja, o biofertilizante que é subproduto obtido após o processo de biodigestão, será quantificado direcionado para a venda capitaneando assim recursos financeiros. A Figura 9 mostra o fluxograma do processo com as etapas do processo de produção de biogás estruturado no simulador *DWSIM*.

Figura 9 – Fluxograma da Planta de Biogás instalada no Campus.



Fonte: produzido pela autora

O biogás, após ser tratado, pode ser utilizado de duas maneiras: para geração de energia elétrica ou para se tornar biometano. Na geração de eletricidade, o biogás é queimado em geradores, fornecendo energia renovável. Já o biometano é obtido após a purificação do biogás, sendo uma alternativa sustentável ao gás de cozinha tradicional. No RU, o biometano pode ser utilizado diretamente como gás de cozinha, contribuindo para a redução de custos operacionais e das emissões de gases de efeito estufa. Essa prática promove o uso de energia limpa e reforça o compromisso com a sustentabilidade no ambiente acadêmico.

## 5.9. BIODIGESTOR DE BANCADA

### 5.9.1 Caracterização do substrato

Para a obtenção de biogás a partir do biodigestor de bancada foram coletados os resíduos de alimentares oriundos da bandeja do restaurante universitário. As amostras foram acondicionadas em recipientes plásticos com capacidade para 2 litros e levadas ao laboratório de Química de Interfaces e Materiais – LIM localizado na UFMA. Em seguida as amostras foram trituradas em liquidificador doméstico da Marca Mondial até completa homegeização. Foram trituradas aproximadamente 300g de resíduo e adicionadas cerca de 100 mL de água. A Figura 10 apresenta a amostra bruta recolhido para a análise físico-química.

Figura 10 – Amostra o resíduo alimentar bruto para a caracterização físico-química (a) resíduo alimentar bruto (b) amostra no laboratório e (c) amostra triturada



(a)



(b)



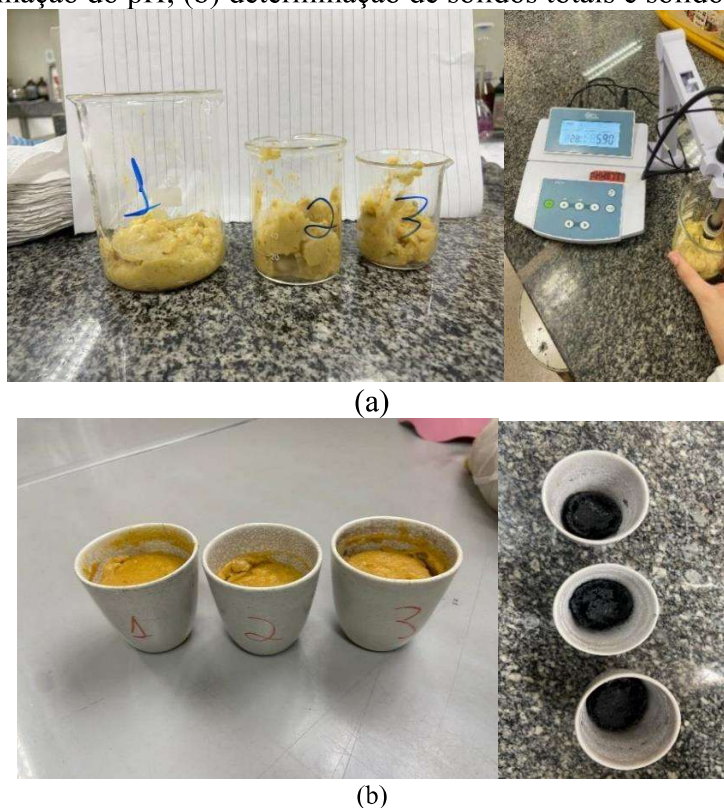
(c)

Fonte: produzido pela autora

É possível observar que os resíduos apresentam grande heterogeneidade, por isso são triturados no liquidificador, o que facilita a homogeneização e melhora a eficiência das análises físico-químicas.

As amostras foram separadas em partes para realizar as análises da caracterização físico-química do resíduo quanto ao pH, sólidos totais e sólidos voláteis. A Figura 11 mostra as caracterizações físico-químicas quanto a determinação do pH, determinação de sólidos totais e determinação de sólidos voláteis.

Figura 11 – Caracterização do resíduo recolhido do restaurante universitário (a) Determinação do pH; (b) determinação de sólidos totais e sólidos voláteis



Fonte: Produzido pela Autora (2024).

O pH é um parâmetro crucial na digestão anaeróbica, pois afeta a atividade microbiana e a eficiência da produção de biogás. Os resultados das análises mostraram um pH variando entre 5,8-6,2, o que representa uma leve acidez. Sendo a amostra (5,8) com o pH mais ácido e (6,2), foram realizadas 3 amostras no total. De acordo com Zhang *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2018, valores de pH próximos a 6,0 são considerados ideais para o crescimento de microrganismos metanogênicos, essenciais para a digestão anaeróbica.

Os sólidos totais (ST) são a concentração total de matéria em uma amostra, consistindo na fração orgânica e na fração inorgânica. O valor encontrado 5,22 mg/L demonstra que os

sólidos totais foram relativamente baixos se comparados à literatura. Muitos resíduos alimentares têm sólidos totais que variam entre 10.000 a 30.000mg/L (Kahn *et al.*, 2020; Oliveira *et al.*, 2020). A baixa concentração pode indicar que os resíduos em estudo possuem menor densidade ou qualidade. Vale ressaltar que a amostra dessa vez foi feita de restos de feijoada dissolvidos em água e que possivelmente influenciaram na redução da concentração de sólidos totais, resultando em uma amostra mais líquida e, em consequência, com menor quantidade de sólido. Segundo Gallert e Winter (2003), o aumento do teor de sólidos totais no substrato é um dos fatores importantes para otimizar a eficiência da digestão anaeróbica, visto que os microrganismos consomem essa matéria para gerar o biogás.

Os sólidos voláteis (SV), por sua vez, representam a fração da matéria orgânica que pode ser decomposta por microrganismos durante o processo de digestão anaeróbica. A concentração encontrada de 12.676 mg/L indica uma quantidade significativa de matéria orgânica disponível para esse processo. Segundo dos Santos *et al.* (2021), a relação entre sólidos voláteis e sólidos totais é um importante indicativo da qualidade do substrato para a produção de biogás; quanto maior a percentagem de sólidos voláteis, maior o potencial de geração de biogás. A Tabela 7 mostra os resultados das caracterizações realizadas neste estudo.

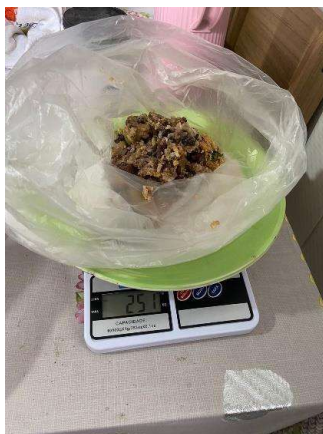
Tabela 7: Resultados das análises

| Parâmetros                   | Resultados |
|------------------------------|------------|
| pH                           | 5.9 ± 6.2  |
| Sólidos totais (mg/L)        | 5,22       |
| Sólidos voláteis (mg/L)      | 12.676,00  |
| Fonte: próprio autor (2024). |            |

### 5.9.2 Produção do Biogás

Neste estudo o biogás foi obtido a partir da confecção de um biodigestor de bancada de 1 e 4 litros. Aqui definido como biodigestor (B1) e o biodigestor (B4). O biodigestor B1 foi utilizado no processo de produção de biogás. Este biodigestor consiste em uma garrafa de vidro com tampa de plástico, equipada com uma mini mangueira para a saída do gás, que era armazenado em um balão de festa. O resíduo utilizado foi resto de feijoada, triturado no liquidificador com 200 g de comida e 300 ml de água. A operação ocorreu em ambiente aberto e ventilado, com temperaturas variando entre 24°C e 30°C, e o tempo de retenção hidráulica foi de 30 dias. A Figura 12 mostra o resíduo alimentar para produção de biogás no Biodigestor de bancada B1.

Figura 12 – Resíduo alimentar para produção de biogás no Biodigestor de bancada B1



Fonte: Produzido pela Autora (2024).

Após pesado, o material foi triturado e adicionado 300 mL de água e, em seguida, o material foi adicionado no biodigestor B1. Após decorrido o tempo de retenção de 30 dias foi possível observar que não houve a formação de biogás. Alguns fatores podem ter contribuído para este resultado, dentre elas, a temperatura, volume da amostra etc.

Estudos demonstram que as bactérias responsáveis pela produção do biogás são particularmente sensíveis a flutuações de temperatura, com uma faixa ideal de desenvolvimento em torno de 35°C. Dentro dessa faixa, a atividade metabólica é otimizada, resultando em uma produção eficiente de metano (Ghosh *et al.*, 2016; Adhikari *et al.*, 2021). Durante a produção de biogás ocorreram variações de temperatura na cidade de São Luís, causadas pela alternância entre chuva e sol. Isto pode ter prejudicado o processo, já que as bactérias metanogênicas são muito sensíveis a essas oscilações. Além disso, o volume da amostra inserida no biodigestor foi muito pequeno, cerca de 200 g, o que geraria uma produção insignificante em questão de quantidade de biogás. Esta produção considerável, impossibilitando a formação visível de biogás e sendo impossível realizar a análise de caracterização do biogás. O teor de sólidos totais muito baixo também pode ter influenciado na produção do biogás.

A fim de sanar essas dificuldades foi realizado outro teste agora utilizando o Biodigestor B4 e, desta vez, utilizando outro tipo de resíduo, também obtido do Restaurante universitário. Neste estudo, o biodigestor utilizado era composto de um recipiente de vidro (de 4 litros) com tampa de plástico, equipado com uma mini mangueira para a saída e armazenamento do gás, sendo que o gás produzido era armazenado em um balão de festa. A Figura 13 mostra o biodigestor de bancada B4.

Figura 13 – Biodigestor de bancada (B4)



Fonte: Produzido pela Autora (2024).

Neste teste, o resíduo utilizado foi proveniente de resto de batata doce, arroz, feijão, beterraba, alface e frango empanado. Inicialmente cerca de 500g de resíduo bruto foi triturado em liquidificador doméstico juntamente com 500 mL de água. Após esta etapa foi feita uma diluição 1:1 e, em seguida adicionada no reator. A operação ocorreu em ambiente fechado e abafado a temperatura ambiente de aproximadamente 29°C.

A partir de do 10º dia de biodigestão, foi observado um odor característico de álcool na tampa do biodigestor, persistindo ao longo de 30 dias. De acordo com Khalid *et al.*, 2016, esse fenômeno pode ser explicado pela ação de microrganismos fermentadores, como as leveduras, que metabolizam os açúcares e amidos presentes nos resíduos orgânicos, resultando na produção de etanol como um dos subprodutos. Os resíduos utilizados no experimento incluíram carboidratos provenientes de batata-doce, arroz e feijão, que são ricos em açúcares fermentáveis, favorecendo a geração de etanol durante as etapas iniciais da digestão anaeróbica. Além disso, fatores como o aumento da temperatura e a acidez do meio também podem favorecer a fermentação, contribuindo para a formação de compostos voláteis, incluindo o etanol, que é percebido pelo odor característico (Mata-Alvarez *et al.*, 2000).

Esse odor pode também ser um sinal da fase de acidogênese, onde a matéria orgânica é convertida em ácidos voláteis, e a presença de etanol sugere que a fase de metanogênese, que ocorre posteriormente, pode ainda não estar completamente estabelecida (Basan *et al.*, 2020). Portanto, a monitorização do odor de álcool é crucial no processo de digestão anaeróbica. A sua presença pode sinalizar a necessidade de ajustes nas condições operacionais, como controle de temperatura e pH, que são fatores determinantes para a eficiência da produção de biogás. A Figura 14 mostra do biodigestor no início do teste e o reservatório de biogás. Nota-se que não foi observado biogás nos 10 primeiros dias de teste.

Figura 14 – Biodigestor de bancada B4 no período de teste de biodigestão



(a)

(b)

Fonte: Produzido pela Autora (2024)

Apesar destas observações seguiu-se com os testes e, após o 30º dia, não foram observadas alterações significativas dentro do biodigestor, e não houve registro de gás acumulado no balão de armazenamento. Essa situação pode ser atribuída a um vazamento no sistema, especialmente se o biodigestor estiver vedado apenas com fita veda rosca. Os biodigestores operam em condições de ausência de oxigênio durante a produção de biogás. Embora a pressão interna possa aumentar devido ao acúmulo de biogás, isso deve ser controlado, pois um aumento excessivo pode levar ao deslocamento de componentes, resultando em vazamentos (Cano *et al.*, 2020).

Além disso, a natureza do biogás, que contém uma mistura de gases, incluindo metano e dióxido de carbono, pode interagir quimicamente com os materiais da fita, comprometendo sua eficácia ao longo do tempo (Khan *et al.*, 2021). Essa degradação do material de vedação pode ser um fator crítico para a eficiência do biodigestor de bancada, resultando em perda de gás e impedindo a realização da análise de caracterização do biogás.

### 5.9.3 Caracterização do Biogás

Esta etapa não foi realizada devido à quantidade insuficiente de gás coletado para análise, este problema decorreu de vazamentos no sistema do biodigestor, causado por falhas no material inadequado para vedação, como a fita veda rosca, que não é recomendada para sistemas que operam sob pressão, conforme citado pelo Cano *et al.*, (2020).

### 5.10. CÁLCULO DA QUANTIDADE DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS A SER PRODUZIDA A PARTIR DOS VALORES DA CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA

Com a densidade da fração de matéria orgânica igual a  $1,213 \text{ kg/m}^3$ , o valor de  $12.676 \text{ mg/L}$  de sólidos voláteis permanece equivalente a aproximadamente 1,27% de concentração, pois a porcentagem de sólidos voláteis é uma relação direta de concentração (mg/L).

Através da Equação 15, espera-se que os 9.900 Kg de resíduos sólidos orgânicos gerados mensalmente no restaurante universitário possuam em média 47,77 Kg de SV e que o potencial de produção de biogás seja de 0,85 Nm<sup>3</sup>.KgSV<sup>-1</sup>. Assim, a produção estimada de biogás é de 40,60 nm<sup>3</sup>/mês.

No presente estudo, foram obtidas duas estimativas de produção de biogás a partir de resíduos alimentares, a quantidade de 712,3 nm<sup>3</sup>/mês, calculada com base em uma fração de sólidos voláteis (SV) de 22,3%, com base na literatura, que sugere um material mais rico em componentes que podem ser convertidos em biogás, enquanto os 1,27% obtidos experimentalmente indicam um substrato com menor potencial de conversão. Essa diferença pode ser atribuída à composição do substrato utilizado, que apresenta nutrientes menos bio-disponíveis, limitando a atividade microbiana e, consequentemente, a produção de biogás. A escolha dos restos de feijoada como biomassa pode ter influenciado diretamente a composição dos nutrientes e o equilíbrio do substrato, impactando negativamente a eficiência do processo de digestão anaeróbica (Straka *et al.*, 2019; Angelidaki *et al.*, 2003).

## 6. CONCLUSÃO

O presente trabalho demonstrou, por meio de estudos semi-teóricos, que a implantação do projeto de tratamento de resíduos alimentares, geração de biogás e biofertilizantes é tecnicamente e economicamente viável. A análise das condições operacionais do biodigestor, utilizando 450 kg de resíduos orgânicos por dia e um volume total diário de 0,83 m<sup>3</sup>, indicou uma produção mensal de 528 m<sup>3</sup> de biogás. Esse biogás, após purificação, possui um potencial energético de 2.185,62 kWh/mês, o que é suficiente para abastecer o próprio restaurante universitário, reduzindo significativamente os custos com energia e gás de cozinha. Além disso, o projeto gera biofertilizantes que podem ser utilizados na agricultura, promovendo o aproveitamento sustentável dos resíduos. Do ponto de vista econômico, observou-se um fluxo de caixa anual de R\$ 53.793,72 com um investimento inicial de R\$ 110.000,00. Isso resulta em um retorno do investimento em apenas 2,84 anos, tornando o projeto altamente rentável. A comercialização de créditos de carbono também se apresenta como uma oportunidade de receita adicional, agregando valor ao projeto. A venda de 48 créditos de carbono anualmente pode gerar R\$ 18.000,00, enquanto a comercialização de biofertilizantes a R\$ 10,00/m<sup>3</sup> pode render R\$ 2.191,20 por ano.

Do ponto de vista ambiental, o projeto contribui significativamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa e reforça o compromisso com a sustentabilidade. A produção de biogás como fonte renovável de energia promove a substituição de combustíveis fósseis, reduzindo impactos ambientais e integrando soluções inovadoras ao ambiente acadêmico. Ademais, a implantação do biodigestor fluxo tubular é simples e de fácil operação, o que reduz custos e garante um retorno financeiro significativo para a universidade, especialmente em relação às despesas com energia. Os resíduos gerados pelo RU fornecerão o substrato necessário para o funcionamento do biodigestor, assegurando a viabilidade do projeto enquanto o RU operar no campus.

Por fim, espera-se que este trabalho científico possa contribuir no auxílio da elaboração de projetos futuros e que se torne referência na área, possibilitando também o surgimento de outros projetos que poderão ser desenvolvidos por alunos da graduação, mestrado ou do doutorado da própria universidade.

## **7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

Para futuros projetos recomenda-se:

- Construir um biodigestor maior, com volume de cerca de 20 litros para melhorar a avaliação da quantidade de biogás gerado, já que o volume de gás gerado seria suficiente para realizar testes mais completos. Com um biodigestor de maior volume, seria possível observar o comportamento do sistema de forma mais realista e estável, sem as limitações de um protótipo pequeno.
- Avaliar a influência de diferentes tipos de resíduos orgânicos na produção de biogás, utilizando como biomassa restos provenientes de um cardápio semanal variado. Essa abordagem permite testar como a composição alimentar impacta a eficiência do biodigestor.
- Uso de fitas isolantes específicas para sistemas de biogás ou outros materiais de vedação que ofereçam alta resistência, garantindo a integridade total do sistema e evitando vazamentos de gás.

## REFERÊNCIAS

- ABAD, Paula Melero. **Valorização de resíduos agro-industriais por processos de digestão anaeróbia**. 2015. Dissertação de Mestrado.
- ABBASI, G.; KHOSHALHAN, F.; HOSSEININEZHAD, S. **Gerenciamento de resíduos sólidos municipais e produção de energia: uma abordagem de otimização multiobjetivo para a cadeia de fornecimento de energia de resíduos de biogás e incineração**. Avaliações e tecnologias de energia sustentável, v. 54, 2022.
- ADHIKARI, B. R.; SHARMA, H. R.; NITISH, K. **Microbial Dynamics in Anaerobic Digestion: A Review**. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2021.
- ALVES, A. **Desenvolvimento de um aplicativo computacional para dimensionamento técnico e econômico de biodigestores tipo tubular**. 2017
- ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Distribuição de energia elétrica. Disponível em < <http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=757> >.
- ANGELIDAKI, I. **Effect of Substrate Composition on Biogas Production in Anaerobic Digesters**. Biomass and Bioenergy, v. 25, n. 3, p. 257–265, 2003.
- ARAÚJO, A. P. C. **Produção de biogás com diferentes resíduos orgânicos de restaurante universitário**. 2017. 42 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/20292>
- ARAÚJO, M. I. DO B. et al. **Dimensionamento de Biodigestores Indiano para a cidade de Campina Grande**. Anais do 5º Encontro Regional de Química & 4º Encontro Nacional de Química. Anais...São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2015.
- ARMIN, F. **Avaliação da eficiência de um biodigestor tubular na produção de biogás a partir de águas residuárias de suinocultura**. Cascavel. 2004.
- BARTHOLOMEU, M. B. et al. **Formulação do modelo de otimização da qualidade do biogás em um biodigestor de modelo tubular: um estudo de caso no município de Conchas - SP**. Revista de Economia e Administração, v. 6, n. 2, 2007.
- BASAN, B.; MESSINGER, A.; DOĞAN, E. Understanding the mechanisms of the anaerobic digestion process in biogas production. **Bioresource Technology**, 2020.
- BIONE, F. R. A. **Conceitos básicos de resíduos sólidos**. São Paulo: EESC/USP, 1999.120p.
- BLEY, J. C. **Geração elétrica a partir do biogás com saneamento ambiental: a experiência da Itaipu Binacional**. In: I Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos de Animais. Florianópolis, 11 a 13 de março de 2009. Anais Eletrônicos do CCE - CENTRO PARA CONSERVAÇÃO E ENERGIA. Guia Técnico de Biogás. Amadora - Portugal, 2000.
- BROWNE, J. D.; MURPHY, J. D. Assessment of the resource associated with biomethane from food waste. **Appl. Energy**, v. 104, p. 170-177, 2013.
- BOUALLAGUI, H. et al. Mesophilic biogas production from fruit and vegetable waste in a tubular digester. **Bioresource technology**, v. 86, n. 1, p. 85–89, 2003.
- CALZA, L.; et al. **Avaliação dos custos de implantação de biodigestores e da energia produzida pelo biogás**. Engenharia Agrícola, v. 35, n. 6, p. 990-997, 2015.

CANO, M. A.; PEÑA, J. M.; LÓPEZ, D. Evaluation of sealing systems in biogas digesters: performance and efficiency. **Renewable Energy**. 2020.

CCE - **Centro para Conservação de Energia**. (2000). Guia Técnico do Biogás [Monografia]. Ed. JE92 Projectos de Marketing Ltda.

CEDES – **Centro de Estudos e Debates Estratégicos**. Consultoria Legislativa da Câmara dos Deputados. Perdas e desperdício de alimentos – estratégias para redução. Série de cadernos de trabalhos e debates 3. Brasília, DF, pág. 260, 2018;

CHERNICHARO, C. A. L. Reatores Anaeróbios. 1. ed. Belo Horizonte: **Editora UFMG**, 2007.

CIFUENTES, I. D. R. **Análise da viabilidade técnica e econômica da microgeração de energia elétrica a partir do aproveitamento do biogás oriundo de resíduos alimentares**. Recife (PE): UFPE, 2015. [Dissertação de Mestrado].

CIBIOGÁS. **Fundamentos do biogás: características e aplicações do biogás e do digestato**. Foz do Iguaçu, 2020.

COELHO, M. A. A. **Estudo de viabilidade econômica de plantas de biogás com tecnologia de última geração**. **Revista ESPACIOS**, v. 35, n. 3, 2014.

COLDEBELLA, A. **Viabilidade do uso do biogás da bovinocultura e suinocultura para geração de energia elétrica e irrigação em propriedades rurais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Cascavel, 2006.

COSTA, M. P.; SOUZA, F. A. **O Potencial do Biogás no Brasil: Redução de Custos em Áreas Urbanas e Rurais**. **Revista Brasileira de Tecnologia Sustentável**, 2019.

CORTEZ, L., LORA, E., GÓMEZ, E (Org.). **Biomassa para energia**. Campinas: **Editora da Unicamp**, 2008.

DAMOVICH, J. *et al.* **Diagnóstico ambiental em torno da suinocultura na bacia do rio toledo e identificação do potencial econômico dos dejetos**. V Encontro de Economia Paranaense–ECOPAR. Anais. Curitiba, 2007.

DEENA, S. R. *et al.* Enhanced biogas production from food waste and activated sludge using advanced techniques—a review. **Bioresource Technology**, p. 127234, 2022.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. C. J. P.; ROSSI, M. **Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada**. In: Encontro de Energia no Meio Rural, 4, 2002, Campinas. Anais... Campinas, 2002.

DIAS, C. S.; SILVA, J. P. **Impacto Econômico do Uso de Biodigestores em Propriedades Rurais Brasileiras**. **Journal of Sustainable Energy**, 2017.

ESTEVES, R. C. **Avaliação de biodigestores em escala de bancada para geração de biogás de resíduos orgânicos**. 2017.

EPE – **Empresa de Pesquisa Energética**. Anuário estatístico de energia elétrica 2013. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro. 2013.

EPE – **Empresa de Pesquisa Energética**. Anuário estatístico de energia elétrica 2013. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro. 2018. Acesso: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes/dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-457/Biomassa%20e%20Expans%C3%A3o%20de%20Energia.pdf>.

FARIA, J. C.; SANTOS, P. L.; LIMA, F. P. **Produção de Biogás em Sistemas Rurais: Avaliação de diferentes tipos de resíduos orgânicos**. **Journal of Renewable Energy**, 2020.

FERNANDES, A.C. **Cálculos na Agroindústria da Cana-de-açúcar. 3 ed. Piracicaba: STAB – Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil. 2011. 416 p.**

FERREIRA, B. O. **Avaliação de um sistema de metanização de resíduos alimentares com vistas ao aproveitamento energético do biogás.** Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG, 2015.

FEIDEN, A.; *et al.* **Avaliação da eficiência de um biodigestor tubular na produção de biogás a partir de águas residuárias de suinocultura.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia de Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel – PR, 2004.

FIGUEIREDO, L. S. **Análise da viabilidade do uso de biodigestores em propriedades rurais.** Instituto Federal de Minas Gerais, Formiga MG, 2017.

GALLERT, C., Winter, J. (2003). **Anaerobic digestion of biodegradable solid waste in municipal solid waste.** *Water Research*, 39(2-3), 253-266. DOI: 10.1016/j.watres.2004.06.022.

GRUBERT, S.S.; OLIVEIRA, V.Á. d. **Evolução das energias renováveis e perspectivas para o futuro utilizando a biomassa.** *Revista Jurídica, Direito, Sociedade e Justiça (RJDSJ)*, v.6, ed.8, p.53-68, 2019

GONÇALVES *et al.* (2018). **Dimensionamento e análise da viabilidade técnica e econômica de um biodigestor tubular** [Trabalho Científico, Instituto Federal de Minas Gerais]. [https://www.ifmg.edu.br/arcos/ensino-1/tai/20181\\_tai3\\_biodigestortubular.pdf](https://www.ifmg.edu.br/arcos/ensino-1/tai/20181_tai3_biodigestortubular.pdf)

GONÇALVEZ, I. R. **Estudo da produção de biogás a partir de resíduos alimentares.** Portugal: IPVC, 2013. [Dissertação de Mestrado]

GHOSH, S.; RAY, M.; Dutta, S. Temperature and pH effects on the production of biogas from organic waste: a review. **Environmental Technology Reviews**, 2016.

HEGNSHOLT, E. *et al.* **Lidando com a crise de perda e desperdício de alimentos de 1,6 bilhão de toneladas.** Boston Consulting Group. 2018. 10 p.

ICAP (International Carbon Action Partnership). **Carbon Markets in 2023: Trends and Pricing.** ICAP, 2023.

JUNGES, D. M. *et al.* **Análise econômico-financeira da implantação do sistema de biodigestores no município de toledo (pr).** *Revista de Economia*, v. 35, n. 1, 2009.

KARAK, R. Bhagat , P. Bhattacharyya Generation, composition and management of urban solid waste: the world scenario Crit. Rev. **Environ. ciência Tecnol.**, 42 (2012), pp. 1509 – 1630.

KARLSSON, T.; *et al.* **Manual básico de biogás.** 1 ed. Lajeado: Univates, 2014. 70p.

KHAN, M. N.; KUMAR, S.; ALI, S. **Characterization of Food Waste for Biogas Production: A Review.** *Journal of Cleaner Production*, 2020.

KHAN, M. I.; ANWAR, M. N.; ANWAR, S. **Effect of different sealing materials on the performance of biogas digesters: A review.** *Bioresource Technology Reports*, 2021.

KHALID, A.; WANG, Y.; HUSSAIN, A. **Biogas production from organic waste: A review of the process, mechanisms and optimization.** *Renewable Energy*, 2016.

KOCAR, G.; CIVAS, N. **Biogas Production from Agricultural and Animal Wastes in Turkey.** *Renewable Energy*, 2013.

KUNZ, A. & OLIVEIRA, P. A. V. **Aproveitamento de Dejetos de Animais para Geração de Biogás.** *Revista Política Agrícola*, Vol. 15, N. 3, 2006.

LASTELLA, G. *et al.* **Anaerobic digestion of semi-solid organic waste: biogas production and its purification.** *Energy Conversion and Management*, Oxford, v. 43, n. 1, p. 63-75, jan. 2002.

LI, Y. *et al.* **Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste.** *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 15, 821-826. 2011.

MARTE, CLARA DA PENHA, *et al.* **“Potencial energético do metano estimado a partir dos resíduos orgânicos gerados na Ceasa do município de São Luís, MA.”** *Revista Eletrônica Perspectivas Da Ciência E Tecnologia - ISSN: 1984-5693*, vol. 14, 20 May 2022, <https://doi.org/10.22407/1984-5693.2022.v14.e20221401>.

MATA-ALVAREZ, J.; *et al.* **A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 36, p. 412-427, 2014.

MATA-ALVAREZ, J.; DÍAZ, I.; RIVERA, M. **Temperature Influence on Anaerobic Digestion: A Review.** *Biomass and Bioenergy*, 2000.

MORAIS, M. A. **Estudo experimental e avaliação econômica da operação de biodigestores tubulares para a produção de biogás a partir de resíduos da suinocultura.** 2012.

MOURA, R. **Avaliação do Potencial de Geração de Energia a partir dos Resíduos Orgânicos do Restaurante universitário Central da UFRJ.** Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2017.

OLIVEIRA, R. A.; CUNHA, J. M.; ALMEIDA, D. S. **Chemical Analysis of Organic Wastes: Implications for Sustainability.** *Environmental Science and Pollution Research*, 2020.

OLIVEIRA, R. D. *et al.* **Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbia de dejetos em abatedouro e as possibilidades no mercado de carbono.** 2009. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO.

PAIXÃO, S. K. Silva da *et al.* **Produção de biogás a partir de resíduos de alimentos: uma proposta para um restaurante em Recife, PE.** 2018.

PEDERIVA, Andre Cristiano *et al.* **Gestão Ambiental: Análise de viabilidade e dimensionamento de um biodigestor para geração de energia elétrica e biofertilizante.**(p. 14). 2 Semana Internacional das Engenharias da Fabor-SIEF. Horizontina/RS, 2012.

PROINFA. **Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica.**

PROBIOGÁS, Projeto Brasil – Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético do Biogás no Brasil. Ministério das Cidades, Brasília, 2015.

RESHMY, R. *et al.* **Updates on high value products from cellulosic biorefinery.** *Fuel*, v. 308, p. 122056, 2022.

REN, Y. *et al.* **Enhanced biomethanation of lipids by high-solid co-digestion with food waste: Biogas production and lipids degradation demonstrated by long-term continuous operation.** *Bioresource Technology*, v. 348, p. 126750, 2022.

RIVA, M.; CAMPESTRINI, M.; TOUBASSY, J.; CLODIC, D.; STRINGARI, P. **Solid – Liquid – Vapor Equilibrium Models for Cryogenic Biogas Upgrading.** *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v.53, p.17506-17514, 2014.

RICARDO, C. M. **Avaliação econômica de biodigestores de fluxo tubular, com sistema de recirculação, no tratamento de dejetos de suínos.** 2012. 71 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2012.

ROCHA, C. M. **Proposta de implantação de um biodigestor anaeróbio de resíduos alimentares,** 2016

SINAPI - **SISTEMA NACIONAL DE PESQUISA DE CUSTOS E ÍNDICES DA CONSTRUÇÃO CIVIL.** Índices da construção civil.

SAKUMA, A. **Desenvolvimento e análise experimental de biodigestores modulares de baixo tempo de residência.** 2013.

SILVA & SANTOS, M. C. da SILVA; G. O. dos SANTOS; **Densidade aparente de resíduos sólidos recém coletados;** Artigo Publicado pela CNPq. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE; janeiro de 2009.

SILVA, R. S.; COSTA, M. L.; OLIVEIRA, J. F. **Economia de Energia Elétrica e Gás de Cozinha por Meio do Uso de Biogás em Propriedades Agrícolas.** *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, 2018.

SILVA, M. A.; SOUZA, J. C.; PEREIRA, A. A. **Aplicação de Biodigestores na Agricultura Familiar no Brasil.** *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, 2019

SILVA, R. S.; PEREIRA, J. M.; OLIVEIRA, L. F. **Créditos de Carbono e a Geração de Energia por Biodigestores em Propriedades Rurais.** *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, 2017.

SILVA, José Eder Pereira. **Avaliação técnica e econômica de um biodigestor de fluxo tubular: estudo de caso do modelo implantado na etec" orlando quagliato" em Santa Cruz do Rio Pardo, SP.** 2016.

SIQUEIRA, V. M.; COSTA, R. F.; OLIVEIRA, T. M. **Estudo da Eficiência de Biodigestores Rurais no Brasil: Produção de Biogás e Biofertilizantes.** *Revista de Energias Renováveis*, 2017.

STRAKA, F., BUBENÍKOVÁ, K., HAVLÍČEK, Z. (2019). "Anaerobic Digestion of Different Substrates: Nutrient Composition and Microbial Activity." *Renewable Energy Journal*, 135, 830-839.

SOUZA, L. B. P, Lorene. (2021). **Projeto de implantação de um biodigestor modelo fluxo tubular para a produção de biogás a partir de resíduos sólidos orgânicos do restaurante universitário da UTFPR - campus Ponta Grossa** [Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná]

SUÁREZ, J.L.R, 2014. **Producción de biogás a partir de biomasa de microalgas Scenedemos sp. procedente de diferentes procesos.** Tese doutoral. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela de Ingenieros Agrónomos. Madrid, España.

TABATABAEI, M.; GHANAVATI, H. **Biogas: fundamentals, process, and operation.** v. 6. Iran: Springer, 2018.

VIEIRA, G.E.G. *et al.* **Produção de biogás em áreas de aterros sanitários: uma revisão.** *Revista Liberado*, Novo Hamburgo, v. 16, n.26, p.101-220, 2015.

VIDAL, T. M. **Geração de biogás a partir de resíduos das agroindústrias de banana e palmito pupunha.** Cascavel: UNIOESTE, 2014. 61p. Dissertação (Mestrado) - Programa de

Pós-Graduação em Energia na Agricultura, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2014.

ZHANG, SK Tan, RM Gersberg. **Municipal solid waste management in China: situation, problems, and challenges** *J. Environ. Gerenciar*, 91 (2010), pp. 1623 – 1633

ZHANG L, LEE YW, JAHNG D. **Anaerobic co-digestion of food waste and piggery wastewater: focusing on the role of trace elements**. *Bioresour Technol* 102:5048–59. 2011.

ZHANG, C; SU, H.; TAN, T. **Batch and semi-continuous anaerobic digestion of food waste in a dual solid–liquid system**. *Bioresour Technol* 145:10–6. 2013.

ZHANG, R. et al. **Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion**. *Bioresour. Technol.* 98, 929–935. 2006.

ZHANG, W.; YU, S.; SUN, Y. **Effects of pH on the Performance of Anaerobic Digestion: A Review**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018.

ZHANG, Y.; ZHAO, Y.; WANG, M. **Influence of pH on the Performance of Anaerobic Digestion: A Review**. *Bioresource Technology*, 2020.