

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
ESCOLA DE QUÍMICA

**Bruno Labanca Lopes**



ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA  
PRELIMINAR DA IMPLEMENTAÇÃO DE  
BIODIGESTOR EM ESCOLA DE COMUNIDADE  
CARENTE NO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO

RIO DE JANEIRO

2023

Bruno Labanca Lopes

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA PRELIMINAR DA IMPLEMENTAÇÃO DE  
BIODIGESTOR EM ESCOLA DE COMUNIDADE CARENTE NO MUNICÍPIO DO RIO  
DE JANEIRO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Orientador(es): Isabelli Dias Bassin  
Élcio Ribeiro Borges

Rio de Janeiro

2023

## CIP - Catalogação na Publicação

L864a      Lopes, Bruno Labanca  
Análise de Viabilidade Econômica preliminar da  
implementação de biodigestor em escola de comunidade  
carente no município do Rio de Janeiro / Bruno  
Labanca Lopes. -- Rio de Janeiro, 2023.  
94 f.

Orientadora: Isabelli Dias Bassin.  
Coorientador: Élcio Ribeiro Borges.  
Trabalho de conclusão de curso (graduação) -  
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de  
Química, Bacharel em Engenharia Química, 2023.

1. Biodigestor. 2. Viabilidade Econômica. 3.  
Comunidade carente. 4. Resíduos Sólidos Alimentares.  
5. Trabalho de Conclusão de Curso (EQ/UFRJ). I.  
Bassin, Isabelli Dias, orient. II. Borges, Élcio  
Ribeiro, coorient. III. Título.

Bruno Labanca Lopes

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA PRELIMINAR DA IMPLEMENTAÇÃO DE  
BIODIGESTOR EM COMUNIDADE CARENTE NO MUNICÍPIO DE RIO DE JANEIRO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Escola de Química da Universidade Federal do  
Rio de Janeiro, como parte dos requisitos  
necessários à obtenção do grau de Engenheiro  
Químico.

Aprovado em 20 de julho de 2023.

---

Professora Isabelli Dias Bassin, *DSc*, Escola de Química/UFRJ

---

Professor Élcio Ribeiro Borges, *DSc*, Escola de Química/UFRJ

---

Felipe Pereira da Silva, *MSc*, Escola de Química/UFRJ

---

Daniel Tinôco Campos Neto, *DSc*, COPPE/UFRJ

Rio de Janeiro  
2023

*À minha mãe Rosângela e ao meu pai Aloísio, que são a luz que guia meus caminhos com  
muita sabedoria e, principalmente, amor.*

## AGRADECIMENTOS

Finalizar este ciclo em minha vida foi, de longe, o maior desafio que tive até o momento. Porém carrego o principal aprendizado durante esta década do meu caminho até a linha de chegada: o de que nossa jornada é completa apenas se a compartilhamos com alguém. Felizmente, mesmo que em espírito, nunca estive sozinho.

Assim, inicio meus agradecimentos aos meus professores da Escola de Química/UFRJ, Instituto de Química/UFRJ, COPPE/UFRJ e IFRJ que instigaram o pensamento crítico e me fizeram cruzar limites pessoais e profissionais que sequer conhecia. Em especial, gostaria de dedicar o meu muito obrigado a meus orientadores Isabelli Bassin e Élcio Borges, além dos professores Aline Brito, Ana Lúcia Gama, Andrea Medeiros, Andrea Valdman, Armando Cunha, Bernardo Dias, Bluma Soares, Carla Manske, Celeste Yara, Clarice Ferraz, Fabiana Fonseca, Fábio Santos, Karen Signori, Márcia Dezotti, Pâmella Passos, Rafael Almada, Raquel Massad e Susana Borschiver.

Aos meus amigos, que hoje são minha segunda família, dedico minha eterna gratidão. Obrigado Amanda, Ariadne, Danyelly, Gabriel, J.Gracindo, Marcela, Mariana, Marina, Mateus, Natalia, Paolla, Tatiana, Thiago e Yakini.

À minha estimada psicóloga Tayane Muniz, que segurou minha mão nestes mais de 4 anos de parceria e não deixou que eu desistisse dos meus sonhos.

Ao meu amor Gabriel Gonzalez, por ser meu grande companheiro nesta jornada da vida.

O próximo agradecimento vai para as pessoas que me viram crescer e me guiaram para que eu pudesse ser o Bruno que tenho tanto orgulho de ser: a minha família. Envio meus agradecimentos às minhas tão amadas avós, Noêmia e Zuleika, torcendo para que consigam recebê-los no plano superior. Aos meus tios e tias, em especial Ana Maria, Cida, Raul, Rosane e Roseli, por serem meus exemplos e inspirações. Aos meus primos e primas, especialmente Akito (Eric), Flavia, Jonas, Kelly, Leo, Luca, Maíra (minha também madrinha), Mariana e Wagner.

Por último, agradeço aos meus gigantes pais, Rosângela e Aloísio, e os dedico tudo o que conquistei e conquistarei. Nada será suficiente para retribuir todo amor e cuidado que venho recebendo durante minha breve jornada neste plano. Vocês são e sempre serão o maior presente que tive o privilégio de receber, e este trabalho é inteiramente dedicado a vocês.

*“Faça o que fizer, apoie-se no que seja mais importante para você. Só então terá profundidade e significado, e só então ressoará com os outros.” Eldest, Christopher Paolini.*

## RESUMO

LOPES, Bruno Labanca. **Análise de Viabilidade Econômica preliminar da implementação de biodigestor em comunidade carente no município do Rio de Janeiro.** Rio de Janeiro, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

O desperdício de alimentos, especialmente em países em desenvolvimento como o Brasil, vem impactando negativamente suas populações, ao alarmar para questões socioambientais como a ineficiência do sistema de produção e distribuição de alimentos, além de doenças geradas pela má disposição dos resíduos sólidos. Soluções tecnológicas gradativamente estão sendo utilizadas para mitigar este cenário, como a digestão anaeróbia, processo natural realizado por bactérias anaeróbicas e que utiliza biodigestores para decompor a matéria orgânica em biogás e digestato potencialmente utilizável como biofertilizante. O biogás é um produto de valor comercial e ampla utilidade, podendo ser aplicável em uma realidade doméstica como ao cozinhar e para aquecimento de água. Foi realizado um estudo de caso em uma Escola de tempo integral, dedicada ao atendimento de alunos em situação de vulnerabilidade social, localizada no complexo de comunidades Cantagalo-Pavão-Pavãozinho objetivando mapear a viabilidade econômica de implementação de um sistema de biodigestão na propriedade. Concernente com o exposto, foi realizado o levantamento de informações necessárias para o dimensionamento do sistema de biodigestão, usando o biodigestor canadense, e análise da viabilidade econômica, visando a economia financeira gerada pelo consumo de gás encanado, majoritariamente usado para cozinhar refeições aos alunos e funcionários da instituição. Com os resultados obtidos, calculou-se valor total para execução do projeto, estimado em R\$3.420,58, considerado baixo. Dentro da análise prévia de viabilidade, obteve-se o valor de *Payback* abaixo de 6 meses, bem como um Valor Presente Líquido positivo e uma Taxa Interna de Retorno maior que a Taxa Mínima de Atratividade, todos indicadores econômicos favoráveis à implementação da solução apresentada. Impedimentos técnicos foram levantados porém podem ser contornados mediante ações a serem realizadas pela Escola e desenvolvimento de trabalhos complementares a este apresentado. Em suma, o presente trabalho poderá contribuir para o desenvolvimento de trabalhos futuros acerca dessa temática, com foco em responsabilidade social.

Palavras-chave: Biodigestor. Viabilidade Econômica. Biogás. Resíduos Sólidos Alimentares.



## ABSTRACT

LOPES, Bruno Labanca. **Análise de Viabilidade Econômica preliminar da implementação de biodigestor em comunidade carente no município do Rio de Janeiro.** Rio de Janeiro, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Food waste, especially in developing countries like Brazil, has been negatively impacting their populations, by raising awareness of socio-environmental issues such as the inefficiency of the food production and distribution system, in addition to diseases caused by poor disposal of solid waste. Technological solutions are gradually being used to mitigate this scenario, such as anaerobic digestion, a natural process carried out by anaerobic bacteria and which uses biodigesters to decompose organic matter into biogas and potentially usable digestate as biofertilizer. Biogas is a product of great commercial value and wide utility, and can be applied in a domestic reality such as cooking and water heating. A case study was carried out in a full-time school, dedicated to assisting students in situations of social vulnerability, located in the Cantagalo-Pavão-Pavãozinho community complex, aiming to map the economic viability of implementing a biodigestion system on the property. For this, a survey was carried out of the necessary information for the dimensioning of the biodigestion system, using the plug-flow biodigester, and analysis of the economic viability, aiming at the financial savings generated by the consumption of piped gas, mostly used to cook meals for students and employees of the institution. From the results obtained, the total value for the execution of the project was calculated, estimated at R\$3,420.58, considered low. Within the previous economic feasibility analysis, a Payback value below 6 months was obtained, as well as a positive Net Present Value and an Internal Rate of Return greater than the Minimum Attractiveness Rate, all economic indicators favorable to the implementation of the presented solution. Some technical impediments were raised, but they can be circumvented through actions to be carried out by the school and the development of complementary works to this one presented. In short, this work may contribute to the development of future work on this topic, with a focus on social responsibility.

Keywords: Biodigester. Economic Viability. Biogas. Food Solid Waste.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 2.1 - Perda de alimentos da pós-colheita até a distribuição em 2016, porcentagem global e por região.
- Figura 2.2 - Percentual de perdas por tipo de alimentos.
- Figura 2.3 - Esquema simplificado de funcionamento de um sistema de incineração.
- Figura 2.4 - Vista externa de Planta de Tratamento Mecânico-Biológico.
- Figura 2.5 - Diagrama simplificado de digestão anaeróbica com geração de biogás.
- Figura 2.6 - Purificação do biogás conforme uso final.
- Figura 2.7 - Esquema de funcionamento do biodigestor de modelo indiano.
- Figura 2.8 - Esquema de funcionamento do biodigestor de modelo chinês.
- Figura 2.9 - Biodigestor canadense em fazenda brasileira.
- Figura 2.10 - Seção transversal de Biodigestor canadense.
- Figura 2.11 - Esquema de funcionamento do biodigestor de modelo tubular.
- Figura 2.12 - (A) Vista Externa do Biodigestor MESB; (B) Vista Interna de Biodigestor sem Resíduos Sólidos Orgânicos.
- Figura 3.1 - Diagrama de blocos metodologia aplicada.
- Figura 4.1 - Localização da Escola Integral Solar Meninos de Luz.
- Figura 4.2 - A) Posto de coleta de Resíduos Sólidos Urbanos na comunidade do Cantagalo e B) Rampa do ciclo de lixo.
- Figura 4.3 - Postos de coleta na comunidade Pavão-Pavãozinho. (A) Plano Inclinado Local, (B) Posto de coleta próximo ao plano inclinado e (C) Posto de coleta próximo à ladeira principal da comunidade
- Figura 4.4 - Vista alta da Escola Solar Meninos de Luz.
- Figura 4.5 - Terrenos candidatos à implementação do sistema de biodigestão na Escola Solar Meninos de Luz. (A) Terrenos nivelado sem construções e (B) Terreno contendo horta e composteira.
- Figura 4.6 - Mapa em satélite das instalações da Escola Solar Meninos de Luz.
- Figura 4.7 - Ilustração de biodigestor dimensionado.
- Figura 4.8 - Ilustração de topo do biodigestor dimensionado.
- Figura 4.9 - Ilustração lateral do biodigestor dimensionado.
- Figura 5.1 - Exemplo de aplicação de camada de impermeabilização em vala com tubulação instalada.

Figura 5.2 - Ilustração digital de canaleta de concreto e sistema fechado com membrana de cobertura em Policloreto de Vinila fixada. (A) Vista frontal, (B) Vista aproximada da canaleta e (C) Vista do biodigestor revestido com manta de cobertura.

Figura 5.3 - Vista de topo contendo dimensões para canaleta.

Figura 5.4 - Vista de topo contendo número estimado de tijolos para canaleta.

Figura 6.1 - Sistema de biodigestão dimensionado.

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 - Composição típica do biogás gerado no processo de tratamento anaeróbio.

Tabela 2.2 - Poder calorífico inferior para concentrações de metano no biogás.

Tabela 4.1 - Dados da geografia das comunidades Pavão-Pavãozinho e Cantagalo.

Tabela 4.2 - Variação da Densidade Populacional no Município e Estado do Rio de Janeiro.

Tabela 4.3 - Comparação da geração de lixo em escolas brasileiras.

Tabela 4.4 – Parâmetros calculados para dimensionamento de biodigestor

Tabela 4.5 – Valores calculados de dimensionamento e produção de biogás

Tabela 6.1 - Detalhamento de materiais receita total para implementação do sistema de biodigestão.

Tabela 6.2 - Depreciação Anual de Materiais do sistema de biodigestão.

Tabela 6.3 - Resultados da Análise de Viabilidade Econômica calculada via Excel®.

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 2.1 - Comparação entre diferentes modelos de biodigestor.

Quadro 4.1 - Informações levantadas na Escola Integral Solar de Luz.

Quadro 4.2 - Fórmulas para cálculo de volume de biodigestor.

Quadro 4.3 - Percentual de sólidos totais em Resíduos Alimentares (RA) a partir de referências bibliográficas.

Quadro 4.4 - Dimensões de biodigestor recomendadas por volume útil.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ABREN	Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos
AT	Alcalinidade Total
BMP	<i>Biochemical Methane Potential</i>
CEG	Companhia Estadual de Gás (Gás Naturgy)
CLT	Consolidação das Leis do Trabalho
COMLURB	Companhia Municipal de Limpeza Urbana
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
FORSU	Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MEI	Microempreendedor Individual
MESB	Metanização em estado sólido em batelada
MO	Matéria Orgânica
ONU	Organização das Nações Unidas
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PERS	Plano Estadual de Resíduos Sólidos
PEX	Polietileno Reticulado
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PVC	Policloreto de Vinila
RAFA	Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente
RSA	Resíduo Sólido Alimentar
RSU	Resíduo Sólido Urbano
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
ST	Sólidos Totais
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
TMB	Tratamento Mecânico-Biológico

TRH Tempo de Residência Hidráulica

TS Seção Transversal

UASB *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*

VC Volume de Carga

VPL Valor Presente Líquido

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Área (m <sup>2</sup> )
$C_{ST}$	Carga de Sólidos Totais (kg/dia)
$C$	Comprimento (m)
$D$	Diâmetro (m)
$F_c$	Fluxo de Caixa
$g$	Gramas
$h$	Altura (m)
$ha$	Hectar
$hab$	Habitantes
$i$	Taxa Mínima de Atratividade (%)
$kg$	Quilograma
$m$	Metro
$M_{\text{água}}$	Massa Total de Água (kg/dia)
$M_T$	Massa Total de Alimentação (kg/dia)
$n$	Período de tempo (meses ou anos)
$Pd$	Quantidade de Resíduos Gerada (kg/dia)
$pH$	Potencial Hidrogeniônico
$ST_I$	Porcentagem inicial de sólidos presentes em resíduos alimentícios (%)
$ST_F$	Porcentagem final de sólidos requerida para alimentação de biodigestor (%)
$S_V$	Percentual de Sólidos Voláteis Alimentícios (%)
$t$	Tempo (dias, meses ou anos)
$T$	Temperatura (°C ou °K)
$TRH$	Tempo de Retenção Hidráulica (dia)
$TS$	Seção Transversal (m)
$V$	Volume (m <sup>3</sup> )
$V_{\text{água}}$	Volume de água (m <sup>3</sup> /dia)
$V_{MO}$	Volume de Matéria Orgânica (m <sup>3</sup> /dia)
$\Sigma$	Somatório
$\rho_{\text{água}}$	Densidade de água (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_R$	Densidade de Resíduos Alimentícios (kg/m <sup>3</sup> )



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
1.1 MOTIVAÇÃO DE ESTUDO .....	19
1.2 OBJETIVOS .....	19
<b>1.2.1 Objetivo geral.....</b>	<b>19</b>
<b>1.2.2 Objetivos específicos.....</b>	<b>19</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>21</b>
2.1 GESTÃO DE RESÍDUOS ALIMENTARES .....	21
<b>2.1.1 Geração de resíduos de alimentos .....</b>	<b>21</b>
<b>2.1.2 Resíduos Alimentares em comunidades carentes .....</b>	<b>23</b>
<b>2.1.3 Gestão de Resíduos .....</b>	<b>25</b>
<b>2.1.4 Tratamento de Resíduos .....</b>	<b>27</b>
2.2 O PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA .....	32
<b>2.2.1 Etapas da Digestão Anaeróbia .....</b>	<b>33</b>
<b>2.2.2 Fatores influenciadores da Digestão Anaeróbia .....</b>	<b>36</b>
<b>2.2.3 Biogás e Biofertilizante.....</b>	<b>37</b>
2.3 BIOGÁS .....	38
<b>2.3.1 Composição Química.....</b>	<b>38</b>
<b>2.3.2 Aplicações e Tratamento do Biogás .....</b>	<b>38</b>
<b>2.3.3 Poder Calorífico .....</b>	<b>40</b>
2.4 BIODIGESTORES .....	40
<b>2.4.1 Tipos e Modelos de Biodigestores .....</b>	<b>41</b>
<b>2.4.2 Comparativo entre Modelos .....</b>	<b>48</b>
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>50</b>
<b>4 ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>52</b>
4.1 MAPEAMENTO DE DADOS DO ELEMENTO DE ESTUDO E DE SUA LOCALIDADE .....	52
<b>4.1.1 Localidade e perfil demográfico da comunidade local.....</b>	<b>52</b>
<b>4.1.2 Dados da atual propriedade de implementação .....</b>	<b>55</b>
<b>4.1.3 Perfil de terreno da localidade .....</b>	<b>58</b>

4.2 DIMENSIONAMENTO DO BIODIGESTOR E ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS .....	61
<b>4.2.1 Identificação e quantificação dos parâmetros.....</b>	<b>62</b>
<b>4.2.2 Dimensionamento do biodigestor e da produção de biogás.....</b>	<b>67</b>
<b>5 ESTUDO DE VIABILIDADE DO PROJETO .....</b>	<b>71</b>
5.1 INSUMOS PARA IMPLEMENTAÇÃO DO BIODIGESTOR ESCOLHIDO.....	71
<b>5.1.1 Caixa de Carga .....</b>	<b>71</b>
<b>5.1.2 Biodigestor.....</b>	<b>71</b>
<b>5.1.3 Caixa de Saída.....</b>	<b>76</b>
<b>5.1.4 Conexões e Válvulas .....</b>	<b>76</b>
5.2 MODELO DE CÁLCULO DE VIABILIDADE ECONÔMICA.....	76
<b>5.2.1 Payback .....</b>	<b>77</b>
<b>5.2.2 Valor Presente Líquido .....</b>	<b>77</b>
<b>5.2.3 Taxa Interna de Retorno.....</b>	<b>78</b>
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>79</b>
6.1 QUANTIDADES E CUSTO TOTAL .....	79
6.2 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA.....	82
<b>7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>84</b>
7.1 CONCLUSÕES .....	84
7.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	85
<b>8 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>86</b>
<b>APÊNDICE A – VISITA À ESCOLA SOLAR MENINOS DE LUZ.....</b>	<b>92</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios para a humanidade do século XXI refere-se a como as nações lidarão com a gestão de resíduos sólidos, especialmente relacionada ao desperdício de alimentos, cuja proporção vem aumentando gradativamente. Este cenário expõe muitos outros tão graves quanto a deficiência de distribuição de alimentos ao redor do mundo, a ineficiência de processos de produção, a distribuição e armazenamento para minimizar a perda de suprimentos e até preocupações governamentais a respeito do agravamento da saúde pública por disposição inadequada de resíduos alimentares.

Segundo estudo da FAO (2019), bilhões de toneladas de alimentos são desperdiçados anualmente, sendo a América Latina um importante continente na fatia do desperdício, onde um considerável percentual é perdido ainda nos processos produtivos ou desperdiçados.

O Brasil é o 10º país que mais desperdiça alimentos globalmente, segundo a Organização das Nações Unidas (FAO, 2013), mesmo detendo legislação para gerenciamento de resíduos, nacionais e locais, como o Política Nacional de Resíduos Sólidos, regido pela Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.

Soluções tecnológicas vêm sendo exploradas de forma a mapear o ciclo de vida dos resíduos e fazer uso ao conceito dos 3Rs (Reduzir, Reaproveitar e Reciclar). Dentro deste panorama, a digestão anaeróbia é uma opção amplamente adotada em diversos processos produtivos pois permite a reciclagem energética de forma natural, utilizando como substratos resíduos alimentares ou muitos outros de natureza orgânica para geração de energia através da sintetização do biogás, de alto poder calorífico. As aplicações envolvendo o biogás são diversas, podendo ser utilizadas para geração de energia térmica, combustível automotivo e, até, ser convertido em energia elétrica. Os sistemas de digestão anaeróbia possuem como módulo principal o biodigestor, local onde as reações de quebra da matéria orgânica ocorrem por meio do metabolismo dos microrganismos anaeróbios e convertido em dois produtos: biogás e biofertilizante. Existem diversos modelos de biodigestores no mercado, sendo os mais difundidos os modelos chinês, indiano e canadense, cada um deles com sua especificidade de aplicação.

A ampla adoção de biodigestores como alternativa à disposição dos resíduos alimentares poderá beneficiar a população em diferentes níveis, seja pela redução da

quantidade de resíduos despejados em aterros sanitários a até o uso da energia vinda dos alimentos para promover economia financeira e aumento do poder de compra.

## 1.1 MOTIVAÇÃO DE ESTUDO

A partir da conjunção apresentada, pretendeu-se utilizar os conhecimentos obtidos ao longo do curso de graduação em Engenharia Química para aplicar o conceito da digestão anaeróbia na construção de um projeto de biodigestor, de forma a impactar diretamente os custos de uma instituição que promove assistência a pessoas em vulnerabilidade social.

O presente estudo funcionou como um complemento à pesquisa realizada por SILVA (2019) na Escola Integral Solar Meninos de Luz, localizada no complexo de comunidades Cantagalo-Pavão-Pavãozinho, de forma a avaliar a viabilidade econômica da aplicação de um biodigestor em suas instalações para reaproveitamento de resíduos alimentícios. Desta forma, esperou-se que este projeto trouxesse retorno financeiro à instituição, de forma a conseguir expandir sua atuação a um maior número de pessoas carentes.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Analisar a viabilidade econômica de um sistema de biodigestão usando resíduos alimentares projetado para uma Escola de tempo integral localizada no complexo de comunidades Cantagalo-Pavão-Pavãozinho da cidade do Rio de Janeiro..

### 1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são descritos a seguir:

- Levantar e apontar do panorama mundial acerca do impacto socioambiental da geração de resíduos sólidos alimentares;
- Rastrear e detalhar trabalhos com foco em processo de digestão anaeróbia e em biodigestores disseminados no mercado que usam resíduos sólidos como fonte de alimentação, retratando suas principais características e distinções;
- Levantar e atualizar do cenário da instituição escolar, dentro do contexto da comunidade, como a natureza e descarte de seus resíduos sólidos gerados, de maneira

a subsidiar a análise de dados do estudo de caso no âmbito do projeto de dimensionamento do sistema de biodigestão;

- Avaliar a viabilidade técnica e econômica visando reprodutibilidade e validação do modelo de biodigestor encontrado para sua efetiva implementação nas condições locais atuais;
- Analisar possibilidade de ampliação/extrapolação de escala do projeto visando atender as demandas parciais ou totais do corpo social na comunidade Cantagalo-Pavão-Pavãozinho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

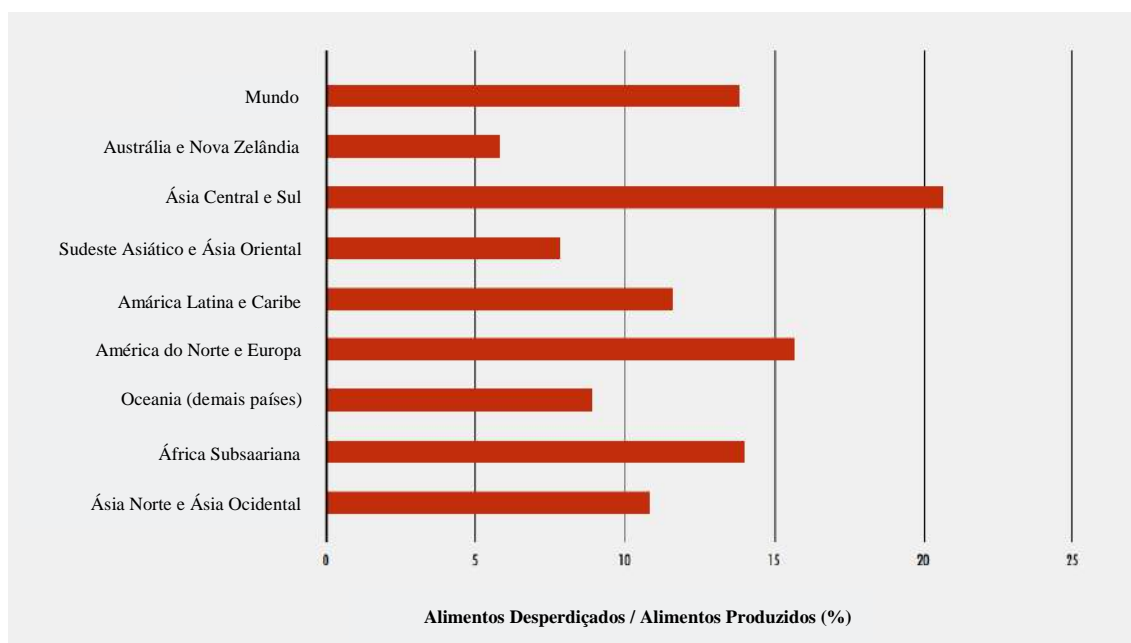
### 2.1 GESTÃO DE RESÍDUOS ALIMENTARES

#### 2.1.1 Geração de resíduos de alimentos

O desperdício de alimentos possuem aspecto fundamental relacionado a sua escala. Globalmente, estima-se que aproximadamente um terço de todos os alimentos produzidos para consumo humano seja desperdiçado a cada ano, chegando a até 1,3 bilhão de toneladas de alimentos desperdiçados anualmente, sendo quase 14% sendo perdidos antes de sua comercialização (FAO, 2019).

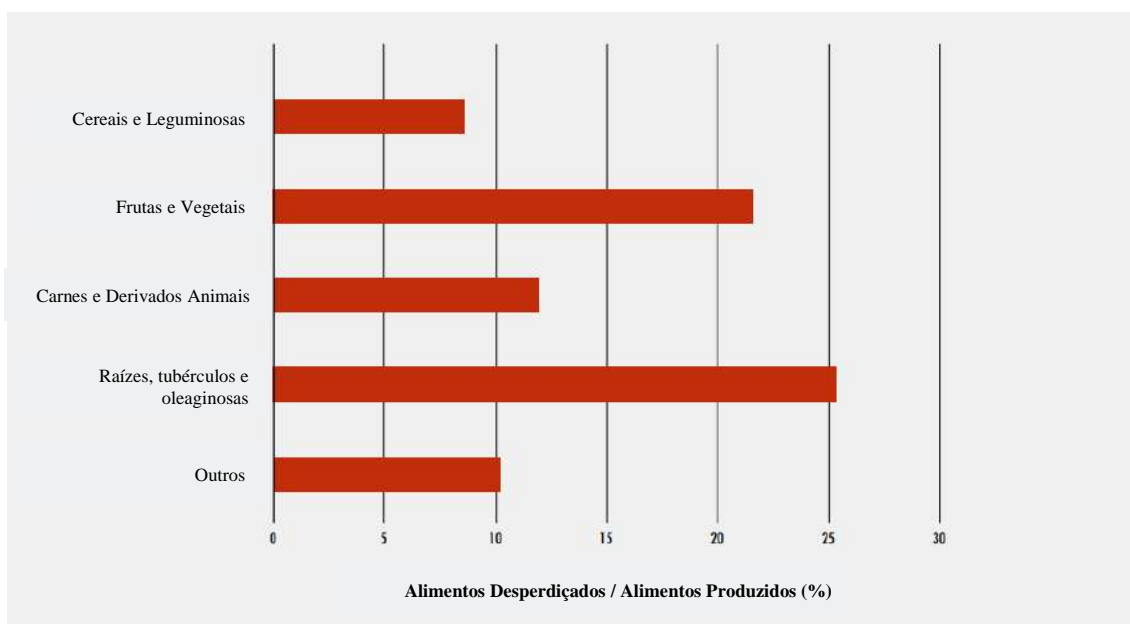
As Figuras 2.1 e 2.2 retratam os perfis de perdas de substratos por regiões ao redor do planeta e por grupos alimentares:

**Figura 2.1 Perda de alimentos da pós-colheita até a distribuição em 2016, porcentagem global e por região.**



Fonte: Traduzido de FAO, 2019.

**Figura 2.2 Percentual de perdas por tipo de alimentos.**



Fonte: Traduzido de FAO, 2019.

Tal perda possui influência da falta de planejamento do número de refeições, tipicidade do alimento, modo de preparo, ausência de indicadores de qualidade, compras feitas sem critérios, entre outros (ZANDONADI & MAURICIO, 2012). Além disso, a geração de resíduo alimentar é inerente ao crescimento populacional, pois está ligada a todas as etapas da cadeia alimentar: assim, quanto maior a demanda por alimentos maior será a geração de resíduos alimentares (ZHANG et al., 2014).

O desperdício de alimentos ocorre em vários estágios da cadeia de abastecimento alimentar, desde a produção e processamento até a distribuição, varejo e consumo. Em países de baixa renda, tal descarte é comumente atribuído a infraestrutura precária e instalações de armazenamento inadequadas, resultando em deterioração e perdas durante a produção e transporte. Por outro lado, em países de alta renda, esta realidade costuma estar relacionada ao comportamento do consumidor, incluindo compras excessivas, armazenamento inadequado e descarte de sobras com valor nutritivo (ZHANG et al., 2014).

Segundo levantamento realizado pelo *Boston Consulting Group*, o continente Africano é o líder em perdas de frutas e vegetais pela deficiência do controle de temperatura pelo comércio, bem como o 3% dos peixes capturados na Amazônia brasileira são descartados por conta de técnicas ineficientes de carregamento no transporte. Além disso, é levantado que, mundialmente, cerca de 8% dos alimentos são

desperdiçados na mesa do consumidor. Por último, realizando uma projeção para 2030 dos custos relacionados ao desperdício e perdas alimentícias, a conta superaria U\$1,5 bilhões. Isto colocaria o valor dentro dos 7% dos países com maior produto interno bruto, assim como o volume de perdas representaria o terceiro maior agente emissor de gases do efeito estufa (BCG, 2023).

De acordo com um relatório de 2019 da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), estima-se que 127 milhões de toneladas de alimentos são perdidos ou desperdiçados na América Latina e no Caribe a cada ano. Isso representa cerca de 13,5% do total de alimentos produzidos na região. O relatório também observa que o desperdício de alimentos é um problema significativo nas áreas urbanas, onde até 40% de todos os alimentos são desperdiçados (FAO, 2019).

A quantidade de desperdício de alimentos em países individuais da América do Sul varia muito. Em um estudo do IBGE (2023), estima-se que o Brasil desperdiça cerca de 46 milhões de toneladas de alimentos por ano, cuja perda financeira fica próxima a R\$61,3 bilhões anuais. De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU), o Brasil fica na 10ª posição de países com maior desperdício de alimentos globalmente. Na Argentina, um estudo de 2017 constatou que o desperdício de alimentos representa cerca de 16 milhões de toneladas do total de resíduos gerados em áreas urbanas (C40, 2017) em um país com uma taxa de pobreza próxima a 32%, contendo 11,3% de toda a sua população em estado de insegurança alimentar severa (FOOD BANKING, 2020).

### **2.1.2 Resíduos Alimentares em comunidades carentes**

Comunidades de baixa renda, situadas em encostas ou em locais planos, apresentam sérios problemas de gestão ambiental urbana, sendo a geração, disposição e coleta de resíduos sólidos urbanos um deles. Desafios como a alta densidade urbana, a falta de espaço para disposição temporária de resíduos e a dificuldade de acesso de caminhões e equipamentos de coleta em áreas de favelas, por exemplo, são permanentes. O fato é que, mesmo com coleta regular, ainda é frequente a presença de focos de disposição irregular de lixo em locais como as comunidades carentes da cidade do Rio de Janeiro.

No caso das favelas cariocas, mesmo a coleta dos resíduos feita pela Companhia de Limpeza Urbana, a Comlurb, na sua forma mais simplificada — resíduos domiciliares, por exemplo — ainda não está totalmente resolvida pois a abrangência não é ampla.



Localizadas tanto em áreas de várzea como em encostas ou morros, os serviços de limpeza urbana apresentam limitações de ordem geográfica e sociocultural. Com frequência, ainda é possível verificar nesse tipo de assentamento precário índices elevados no que tange aos desequilíbrios sociais, culturais e ambientais, bem como relações que se estabelecem com a informalidade e a irregularidade do uso e ocupação do solo, marcados pelo déficit de bens e serviços básicos (SCHUELER, KZURE & RACCA, 2018)..

Convém lembrar que os tecidos urbanos das favelas são, em geral, fragilizados pela própria natureza desse tipo de ocupação. As ruelas e servidões, principalmente as inclinadas, com ou sem pavimento, se constituem como um emaranhado de acessos rudimentares aos espaços de moradia, espaços de uso comunitário e atividades comerciais locais, que apresentam dificuldades para o acesso de coletores mecanizados. A coleta porta a porta, ou alternativas já utilizadas como a figura do gari comunitário, têm exigido o dimensionamento adequado dos equipamentos e da frequência do recolhimento do lixo para evitar acumulação dos RSU em qualquer estágio. Soma-se a isso a resistência de parte significativa de moradores que ainda descartam inadequadamente os diferentes tipos de resíduos e que comprometem a saúde pública (SCHUELER, KZURE & RACCA, 2018).

A alta densidade habitacional e o baixo percentual relativo de áreas públicas, complementado pela inexistência ou pouca quantidade de vias carroçáveis, torna as comunidades de baixa renda locais extremamente difíceis em relação a disposição e coleta dos RSU. O pouco espaço e as más condições para dispor os descartes diários, temporariamente, no interior das moradias, favorece que sejam dispostos nas ruas logo que gerados, normalmente muito antes do recolhimento público ser feito. Assim, as já estreitas ruas (quando existem) recebem esse lixo, que fica exposto a chuva, animais e transeuntes. No caso de comunidades situadas em encostas, a situação sanitária e ambiental tende a se agravar. A dificuldade do recolhimento junto com a necessidade de descarte muitas vezes leva o lixo para as encostas, o que aumenta a quantidade de vetores, contribui para a erosão do solo e reduz, ainda mais, a possibilidade de coleta (SCHUELER, KZURE & RACCA, 2018)..

Nesses espaços, o consumo de produtos orgânicos e industrializados, eletroeletrônicos e materiais de construção civil aumentou substancialmente nas últimas duas décadas, a partir das políticas de crescimento econômico no país. No entanto, os problemas de descarte nas favelas cariocas, apesar dos programas de urbanização e das

iniciativas do poder público para a coleta desses resíduos, ainda constituem uma questão socioambiental a ser enfrentada (SCHUELER, KZURE & RACCA, 2018)..

Cabe sublinhar que esse instrumento urbanístico enfrenta uma resistência histórica um amplo desenvolvimento por parte do poder público e setores hegemônicos da economia no país. As áreas mais vulneráveis e de inquestionável criticidade urbana e ambiental permanecem relegadas à segregação sócio- espacial. Em linhas gerais, esses espaços de exclusão socioeconômica, sociocultural e socioambiental ainda se mantêm no limiar da informalidade e irregularidade do uso do solo. Apesar de haver investimentos em urbanização de favelas no Rio de Janeiro foram representativos nas duas últimas décadas o aporte de recursos públicos foi destinado majoritariamente para a infraestrutura (viária, águaesgotamento sanitário, drenagem pluvial, iluminação e contenção de encostas), sem se ater às demandas por melhorias habitacionais e tratamento adequado dos Resíduos Sólidos Urbanos (SCHUELER, KZURE & RACCA, 2018)..

### **2.1.3 Gestão de Resíduos**

Os esforços para combater o desperdício de alimentos globalmente ganharam destaque nos últimos anos. Muitos países e organizações implementaram políticas e iniciativas para reduzir o desperdício de alimentos em vários estágios da cadeia de abastecimento.

No Brasil, foi criada a lei 14.016/20, que garante segurança jurídica a pessoas jurídicas doadoras e conectores com bancos de alimentos (DA SILVA, 2022). Além disso, soluções têm sido apresentadas para promover maiores políticas públicas no país, como no caso das citadas pela Embrapa na Semana de Inovação Suécia-Brasil, em 2020 (Embrapa, 2020). Nela, dispõem as seguintes propostas:

- Fortalecer políticas públicas de segurança alimentar e nutricional;
- Fortalecer a rede de bancos de alimentos, como as centrais de abastecimento, conhecidas como Ceasas; e ampliá-las para os municípios ainda não atendidos que tenham maiores índices de insegurança alimentar.

Ainda no âmbito da geração de resíduos alimentares, sua disposição final também representa um cenário alarmante, especialmente em regiões com índices expressivos de pobreza. O descarte inadequado pode influenciar a disseminação de doenças infecciosas entre a população em contato direto com estes resíduos.

A nível nacional, o saneamento básico é um direito assegurado pela Constituição Federal e definido pela Lei nº 11.445, de 2007, como o conjunto de serviços, infraestrutura e instalações operacionais de abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana, drenagem urbana, manejos de resíduos sólidos e de águas pluviais (BRASIL, 2007). Nesse setor, a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (RSU) e o esgotamento sanitário são substratos com potencial de produção de biogás e biometano.

Em 2019, apenas 54,1% dos brasileiros tinham acesso à coleta de esgoto, variando de 79,5% dos moradores na região sudeste, para 28,3% na região nordeste e 12,3% na região norte. Além disso, apenas 49,1% dos esgotos gerados no país eram tratados (SNIS, 2019).

Com relação à coleta domiciliar de resíduos sólidos, dados de 2022 revelam uma cobertura nacional de cerca de 93%, com índices regionais variando entre 83% (regiões Norte e Nordeste) à quase 99% (região Sudeste). Entretanto, apenas 60,5% possuem disposição adequada em aterros sanitários, sendo o restante ainda destinados a aterros controlados ou lixões. Quanto à coleta seletiva, houve um aumento significativo no levantamento de 2021 comparado aos dados de 2020, onde 75,1% dos municípios possuíam algum tipo de iniciativa (ABRELPE, 2022).

De acordo com a Lei Federal nº 12.305/2010 (PNRS), os resíduos sólidos urbanos englobam os resíduos domiciliares, aqueles originários de atividades domésticas em residências urbanas e os resíduos de limpeza urbana, os quais são originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas, bem como de outros serviços de limpeza urbana (AZEVEDO SILVA, 2012).

Além disso, o ano de 2022 também foi bastante representativo para o setor de gestão de resíduos sólidos no Brasil em termos normativos, a começar com a edição do Decreto nº 10.936/2022, que trouxe nova regulamentação para a Lei 12.305/2010, a Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Decreto nº 11.043/2022, que instituiu o Planares - Plano Nacional de Resíduos Sólidos, o principal instrumento previsto na Lei, que estabelece as estratégias, diretrizes e metas para o setor, num horizonte de 20 anos (ABRELPE, 2022).

No estado do Rio de Janeiro, foi elaborado um Plano Estadual de Resíduos Sólidos (PERS), que consiste em um instrumento de gestão que auxilia os municípios a se guiarem na elaboração dos seus planos municipais e em suas tomadas de decisão, além de

promover a articulação entre diferentes municípios, de forma que haja uma diminuição de custos para as cidades (ALMEIDA, 2019).

A elaboração do PERS consistiu em diagnóstico a respeito dos resíduos sólidos no Estado, bem como definição de soluções a partir de metas, diretrizes e estratégia para o cumprimento delas. Cita-se como subprograma o “Lixão Zero”, criado após a consolidação da Lei 4191/03, intitulada Política Estadual de Resíduos Sólidos e do Decreto 41.084/07 que regulamentou esta lei. O subprograma visou agregar aspectos técnicos, jurídicos e econômicos, visando a redução dos custos de operação e de investimentos para atingir a meta de erradicação dos lixões no estado até o ano de 2018 (ALMEIDA, 2019).

#### **2.1.4 Tratamento de Resíduos**

O princípio da ecoeficiência, definido pelo PNRS, possui como objetivo o estabelecimento de uma ordem de prioridade na geração dos resíduos. Esta ordem demanda evitar a geração dos rejeitos, pois eles revelam a falta de um olhar sustentável nos projetos dos desenhos industriais (ALMEIDA, 2019).

A hierarquia do sistema de gestão de resíduos sólidos são:

- Não Geração;
- Redução;
- Reutilização;
- Reciclagem;
- Tratamento;
- Disposição final ambientalmente adequada.

Embora a prevenção do desperdício de alimentos seja a estratégia mais eficaz a ser globalmente implementada, o tratamento e a reciclagem energética de resíduos alimentares que não podem ser evitados representa um impacto positivo ao meio ambiente.

As soluções tecnológicas podem ajudar a desviar os resíduos de alimentos dos aterros sanitários, reduzir as emissões de gases de efeito estufa e recuperar compostos de valor agregado. O tratamento e a recuperação dos resíduos sólidos na forma de energia possui utilidade, principalmente, em processos industriais, recuperando parte da energia introduzida à cadeia de produção a partir da queima ou degradação da matéria sólida (SILVA, 2019).

Apesar disto, é importante observar que nem todas as soluções podem ser adequadas para todos os contextos e podem exigir infraestrutura, regulamentações e gerenciamento operacional adequados para uma implementação eficaz. Abordagens integradas que combinem múltiplas tecnologias e estratégias, juntamente com políticas eficazes e mudanças comportamentais, são necessárias para criar uma economia circular para o desperdício de alimentos e maximizar seus benefícios ambientais e econômicos.

Ao abordar resíduos sólidos alimentícios, que compõem a fração orgânica dos RSU, por sua degradação provocar fatores danosos à saúde humana, como a presença de vetores, pode-se considerar o tratamento e a disposição final como opções aplicáveis, retratadas a seguir:

#### 2.1.4.1 Compostagem

A compostagem é um tratamento aeróbio que estabiliza a matéria orgânica sem geração de biogás, cuja solução é responsável por 26,3% de todo RSU recuperado no país (SNIS, 2021). A decomposição aeróbica dos resíduos alimentares resulta na formação de um composto rico em nutrientes através da ação de microorganismos que pode ser usado como corretivo do solo na agricultura, paisagismo e horticultura, fomentando o incremento da fertilidade do solo.

A aplicação do composto gerado, assim como do digestato, é apontada como uma questão-chave, com a oportunidade de aproveitamento para reflorestamento, que, ao contrário da agricultura, aceita algumas impurezas decorrentes da origem mista do resíduo, ou ainda como cobertura de aterros para redução de fuga de metano na superfície.

#### 2.1.4.2 Incineração

A Incineração é um processo para o tratamento dos resíduos que envolve a combustão das substâncias orgânicas presentes na matéria que compõe os resíduos. Os componentes de um sistema de incineração comumente apresenta os seguintes componentes (DOS SANTOS, 2011):

- Armazenamento e manipulação de resíduos;
- Alimentador de resíduos;
- Combustão no forno;
- Recuperação do calor com produção de vapor e eletricidade (plantas com
- Aproveitamento energético);

- Controle da poluição do ar (tratamento dos gases da combustão)
- Manipulação dos dejetos (cinzas e águas residuais).

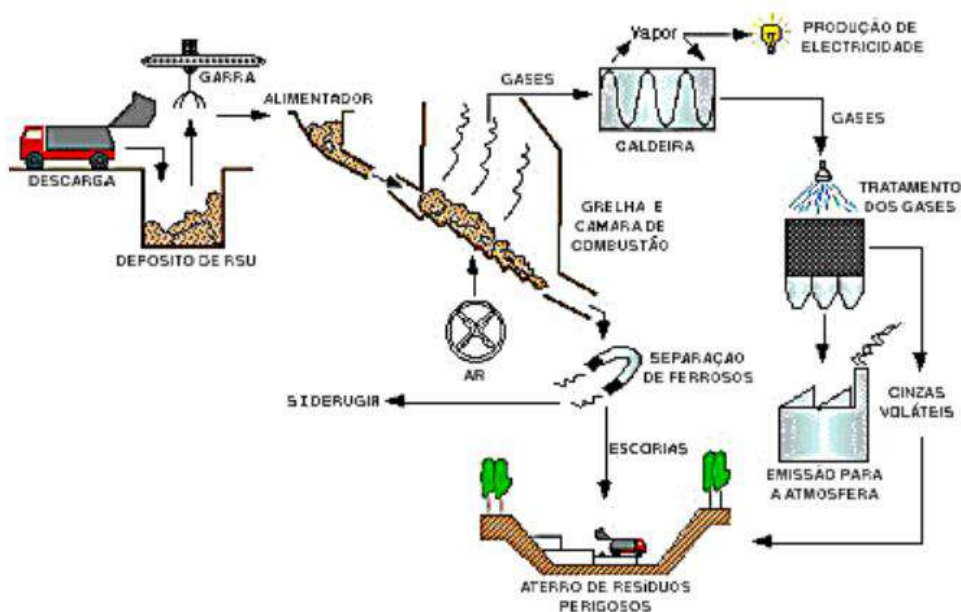
Esta tecnologia, quando aplicada para a recuperação energética, pode ser denominada *Waste-to-energy* (DOS SANTOS, 2011). A queima do RSU como combustível é empregada em caldeiras com o intuito de gerar calor na forma de vapor, que pode ser usado como utilidade no local ou convertido em energia com o uso de turbinas (GIZ, 2010).

O processo pode reduzir o volume de aterros sanitários de uma comunidade em até 90% e evitar a liberação de uma tonelada de dióxido de carbono para cada tonelada de lixo queimado (HOCKENOS, 2021).

Segundo a EPA (*Environmental Protection Agency*), cerca de 15% dos resíduos sólidos urbanos são incinerados nos Estados Unidos, enquanto no Japão este número representa 70%, totalizando cerca de 1800 incineradores na extensão do país oriental (SILVA, 2012).

Apesar deste processo ser apontado como uma das soluções mais eficientes, uma complexidade é atrelada ao alto custo de investimento e de operação, que depende de um intenso trabalho institucional e de comunicação, atualmente feito pela ABREN no Brasil. Para ser viável, fatores cruciais devem ser levados em consideração como a escalabilidade e disponibilidade de resíduos, de maneira associada a grandes centros urbanos, como São Paulo e Rio de Janeiro.(ASSUNÇÃO, 2022). Na Figura 2.3, pode ser observado um esquema geral simplificado de um sistema de incineração.

**Figura 2.3 Esquema simplificado de funcionamento de sistema de incineração.**



Fonte: OLIVEIRA, 2020.

#### 2.1.4.3 Tratamento Mecânico-Biológico (TMB)

O sistema de tratamento mecânico-biológico surgiu como uma tecnologia alternativa à incineração e com o principal objetivo reduzir a carga orgânica dos resíduos sólidos urbanos. Desta forma, é importante a elegibilidade dos resíduos tratados, que são aqueles que possuem considerável parcela de material orgânico biodegradável. Resíduos derivados de indústrias, serviços de saúde e de construção civil, por suas características de alta periculosidade e baixa biodegradabilidade, respectivamente, não são passíveis de tratamento por sistemas de TMB (PRATES et al., 2016).

A etapa mecânica visa:

- Reduzir o tamanho e homogeneizar o material a ser tratado, de forma a otimizar o tratamento biológico;
- Recuperar materiais recicláveis (metais, plásticos, vidros) e remover materiais que possam prejudicar o processo biológico;
- Aumentar a concentração do material orgânico biodegradável.

O tratamento biológico é considerado a parte central do TMB, tendo como principal objetivo acelerar o processo de decomposição da matéria orgânica. Os tratamentos disponíveis são subdivididos em processos aeróbios (com presença de

oxigênio), processos anaeróbios (ausência de oxigênio) ou processos combinados (PRATES et al., 2016).

Esta é uma solução mais completa para RSU não segregado na fonte, com geração de biogás, mas a desvantagem é o alto custo devido à manutenção dos equipamentos mecânicos e corrosão no sistema (PRATES, 2016). Além disso, segundo um representante da Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos (ABREN), os separadores mecânico-biológicos não conseguem segregar totalmente o resíduo orgânico do inorgânico, produzindo 20 a 25% de rejeito, que deve ser disposto em aterro sanitário (ASSUNÇÃO, 2022). A Figura 2.4 destaca uma planta de TMB localizada na Cheltenham, Inglaterra.

**Figura 2.4 Vista externa de Planta de Tratamento Mecânico-Biológico**



Fonte: URBASER, 2023

#### 2.1.4.4 Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo que converte resíduos alimentares em biogás e digestato rico em nutrientes. Os microrganismos decompõem a matéria orgânica na ausência de oxigênio, produzindo biogás que pode ser usado como energia renovável e o digestato que pode ser usado como fertilizante.

Esta solução é comportada por biorreatores denominados biodigestores, cuja oferta de diferentes modelos garante uma faixa de escalabilidade, podendo ser aplicável em pequena a larga escala. Sua aplicabilidade independente de grandes investimentos vindos do poder público ou do setor privado, tornando viável a implementação em áreas



urbanas de menor desenvolvimento socioeconômico, como comunidades cariocas, local do presente trabalho.

#### 2.1.4.5 Aterro Sanitário

É uma solução de disposição final que consiste em uma área especialmente preparada para receber os RSU, recebendo alto investimento com relação à infra-estrutura – seu solo é inteiramente impermeabilizado, o que evita que o chorume, líquido poluente proveniente da decomposição de matéria orgânica, contamine o subsolo (DE LIMA, A.A.; SCAL, M.L.W, 2013).

O material depositado passa por uma triagem mecanizada para a retirada de materiais recicláveis e a cada camada é recoberto por uma outra camada de terra. Neste local não há catadores de lixo, nem animais vetores. Os aterros sanitários são classificados de acordo com a forma de sua execução, que varia conforme a região escolhida para sua implantação. Podem ser divididos em: Aterros em Superfície, Aterros em Lagoas ou Aterros em Depressões e Ondulação (DE LIMA, A.A.; SCAL, M.L.W, 2013).

A escolha do local a ser utilizado como aterro sanitário deve seguir padrões segundo normas da ABNT (NBR 8419, 1992) e a lei da PNRS. Nestas normas, com o intuito de reduzir o risco de contaminação do solo e possíveis danos à saúde e patrimônio público, são definidos critérios e restrições como a presença de corpos hídricos, do tipo de solo, direção do vento e proximidade de habitações (SILVA, 2019).

## 2.2 O PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA

A digestão anaeróbia envolve a degradação e estabilização de materiais orgânicos sob condições anaeróbias por microrganismos e leva à formação de biogás (uma mistura de dióxido de carbono e metano, uma fonte renovável fonte de energia) e biomassa microbiana, líquida ou semilíquida, denominada como digerido ou digestato e rica em: matéria orgânica e nutrientes como nitrogênio, fosfato e potássio. Este é um processo natural, ocorrendo em locais como em pântanos, fundos de lagos e rios, esterqueiras, estômagos de animais ruminantes e aterros sanitários (CHEN; CHENG; CREAMER, 2008; MAIA, 2020).

Como um opção ao tratamento de resíduos e águas residuais, a digestão anaeróbia tem sido utilizada para o tratamento de lodo municipal e ampla aplicação no tratamento

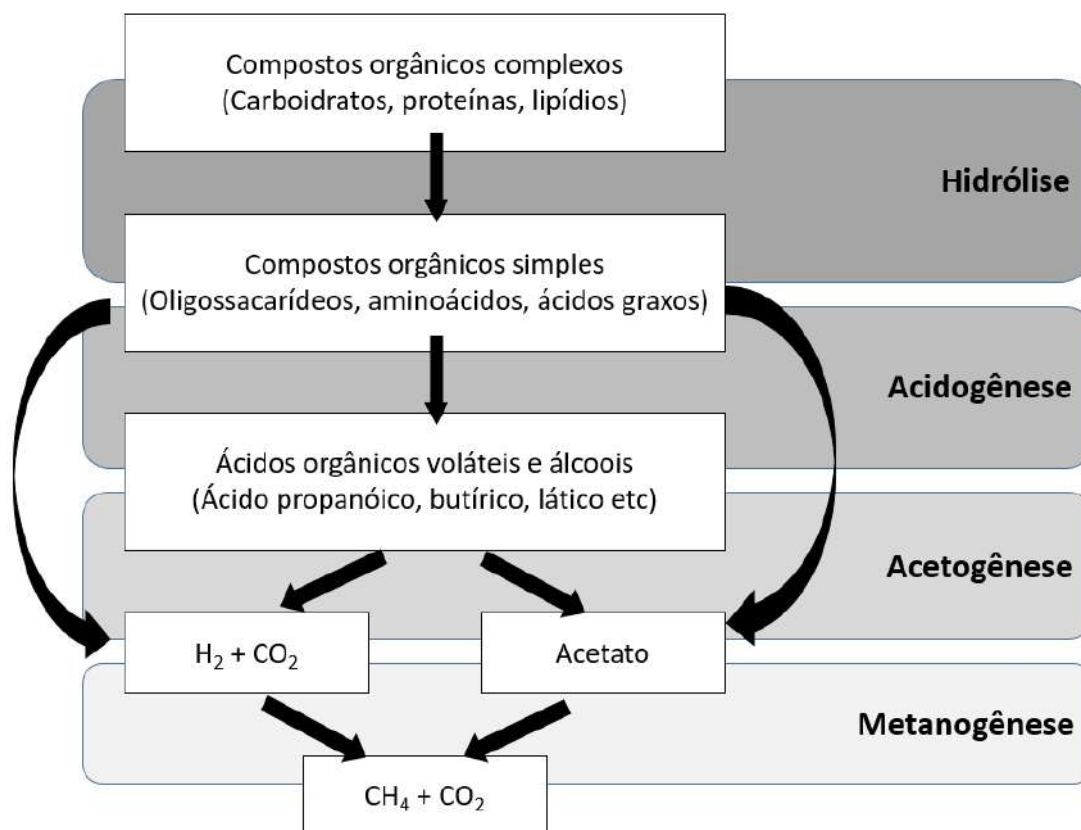
de resíduos industriais orgânicos, incluindo resíduos de processamento de frutas e vegetais, e resíduos agrícolas (CHEN; CHENG; CREAMER, 2008).

O aproveitamento energético também pode ser realizado posterior à conversão da matéria orgânica em biogás, podendo ser melhorado para a obtenção do Biometano, de maior poder calorífico e convertido em energia térmica e elétrica com o uso de turbinas, microturbinas ou motores (SILVA, 2019).

### 2.2.1 Etapas da Digestão Anaeróbia

A Figura 2.5 apresenta esquema simplificado das etapas de digestão anaeróbia, juntamente com seus produtos e intermediários de reação, detalhados na sequência.

**Figura 2.5 Diagrama simplificado de digestão anaeróbica com geração de biogás.**



Fonte: Adaptado de (MOURA *et al.*, 2023; SILVA, 2019)

### 2.2.1.1 Hidrólise

Nesta etapa, as bactérias anaeróbias produzem enzimas extracelulares hidrolíticas que degradam os materiais particulados complexos como os polissacarídeos em compostos solúveis mais simples, como açúcares, ácidos graxos e aminoácidos, que são permeáveis às membranas celulares dos microrganismos. Os microrganismos comumente encontrados em lodo anaeróbio que catalisam este tipo de reação são *Coprothermobacter*, *Clostridium* e *Bacillus* (TOMASINI, 2020).

A hidrólise possui participação ímpar na velocidade global de degradação em função principalmente da natureza do substrato a ser hidrolisado, podendo variar de horas para carboidratos a até dias para proteínas e lipídios. Lignocelulose e lignina são hidrolisadas mais lentamente e muitas vezes de maneira incompleta (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2010).

### 2.2.1.2 Acidogênese

Na fase acidogênica estes produtos solúveis são metabolizados no interior das células microbianas sendo convertidos em ácidos orgânicos voláteis, álcoois, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>. A hidrólise juntamente com a etapa acidogênica e acetogênica representam o processo fermentativo. Além do *Clostridium*, podem ser encontrados no lodo durante a acidogênese microrganismos do gênero *Thermotoga*, *Caldanaerobacter*, *Carboxydotherrmus* e *Thermoanaerobacter* (TOMASINI, 2020).

Apesar da fermentação acidogênica ser realizado por um diverso grupo de bactérias, cerca de 1% são facultativas e representam um papel de equilíbrio fundamental para o processo, pois consomem o oxigênio dissolvido no meio, induzindo o baixo potencial redox exigido pelos microrganismos obrigatoriamente anaeróbios (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2010).

Representações de reações de acidogênese, segundo Alcântara (2007), a partir da glicose são explicitadas a seguir:



### 2.2.1.3 Acetogênese

As bactérias acetogênicas (*Moorella*, *Clostridium*, *Alkaliphillus*, *Caldanaerobacter*, *Thermoanabacter*) oxidam os produtos gerados na etapa anterior em ácido acético para servir de substrato às arqueias metanogênicas (MAIA, 2020; TOMASINI, 2020).

As bactérias homoacetogênicas costumam ser as responsáveis por este processo, sendo elas estritamente anaeróbias e podendo ser divididas em autotróficas e heterotróficas. As reações abaixo, adaptadas de Maia (2020), explicitam a participação de cada uma delas na etapa de acetogênese:



Conforme apresentado em (5), as bactérias homoacetogênicas autotróficas utilizam uma mistura de hidrogênio e dióxido de carbono, com o  $\text{CO}_2$  servindo como fonte de carbono para a síntese celular. No entanto, algumas homoacetogênicas também podem usar o monóxido de carbono como fonte de carbono, segundo reação (6). Já as homoacetogênicas heterotróficas utilizam substratos orgânicos como fonte de carbono enquanto produzem acetato como produto final, conforme apresentado em (7) e (8) (MAIA, 2020).

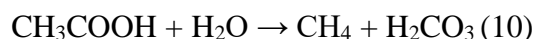
### 2.2.1.4 Metanogênese

Na fase metanogênica, as arqueias convertem  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$  e ácido acético em  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ . Estes microrganismos podem ser classificados de acordo com a sua afinidade pelo substrato. As metanogênicas acetoclásticas (ex: *Methanosaeta*) consomem o ácido acético como substrato enquanto as metanogênicas hidrogenotróficas (ex: *Methanothermobacter*, *Methanoculleus*, *Methanocaldococcus*) utilizam o  $\text{H}_2$  e  $\text{CO}_2$  (TOMASINI, 2020).

Quase todas as espécies podem produzir metano a partir da mistura de hidrogênio e dióxido de carbono através da reação (AZEVEDO SILVA, 2012):



A produção de  $\text{CH}_4$  à partir do acetato tem-se a seguinte reação:



## 2.2.2 Fatores influenciadores da Digestão Anaeróbia

Existem grandezas físico-químicas cuja taxa de formação do substrato é diretamente dependente, tais como: temperatura operacional do biorreator, umidade, tempo de permanência do substrato, tamanho das partículas, pH do meio reacional, alcalinidade, concentração de produtos da própria hidrólise e seus subprodutos, como a amônia (MAIA, 2020).

Algumas das principais são detalhadas a seguir:

### 2.2.2.1 Temperatura

Nos processos biodegradáveis a temperatura é um parâmetro que implica balanços energéticos e, em geral, dentro de determinados limites, menor temperatura significa menor atividade e menor taxa de conversão do material orgânico presente nos RSU através da ação bioquímica dos micro-organismos (ALCÂNTARA, 2007).

Os microrganismos podem crescer em faixa de temperaturas mínima, ótima e máxima. As arqueias metanogênicas, por exemplo, são bastante sensíveis às bruscas mudanças de temperatura e se desenvolvem naturalmente, sob temperaturas mesofílicas, de 30°C a 40°C e termofílicas, de 50°C a 60°C, cujas temperaturas ótimas são, 35°C e 55°C, respectivamente (AZEVEDO SILVA, 2012; CORRÊA *et al*, 2020).

### 2.2.2.2 pH

Dentro da pesquisa de Azevedo Silva (2012), autores como Gadelha (2005) e Kayahanian (1971) comentam que o pH do meio anaeróbio está diretamente relacionado com as concentrações dos álcalis e dos ácidos no sistema. Bruscas alterações do pH afetam consideravelmente a atividade dos organismos metanogênicos. Os organismos metanogênicos costumam ser mais sensíveis ao pH, possuindo uma faixa ótima entre 6,6 e 7,4.

### 2.2.2.3 Alcalinidade

A Alcalinidade Total (AT) é um parâmetro que atribui capacidade de tamponamento de um sistema, ou seja, a capacidade de evitar alterações bruscas de pH, causadas pelo aumento de ácidos orgânicos voláteis no meio, durante as etapas de hidrólise e acidogênese. A AT é composta pela soma da concentração de íons hidroxila

(OH<sup>-</sup>), carbonato (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) e bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) e é expressa na forma de concentração de carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) (MAIA, 2020).

A degradação dos ácidos não ocorre com a mesma rapidez como são formados, podendo gerar acúmulo no meio e promover problemas no processo devido à diminuição da alcalinidade. Entre as complicações geradas está a inibição da etapa fermentativa e acetogênese no qual os ácidos penetram a membrana dos microrganismos, dissociam-se e reduzem o pH intracelular. (MAIA, 2020 ; TOMASINI, 2020)

### **2.2.3 Biogás e Biofertilizante**

O biogás e o biofertilizante são subprodutos do processo de digestão anaeróbia sendo, respectivamente, uma mistura de gases e uma lama sólida (digerido) consistente dos resíduos não tratados da digestão (SILVA, 2019).

O Biogás possui concentrações de metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), além de pequenas quantidades de sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S), amônia (NH<sub>3</sub>), hidrogênio (H<sub>2</sub>), nitrogênio (N<sub>2</sub>), oxigênio (O<sub>2</sub>), siloxanos e vapor de água. A sua composição e proporção é influenciada principalmente pelos substratos utilizados, pela técnica de fermentação e pelas diferentes tecnologias de construção dos biodigestores (MAIA, 2020).

Biofertilizante é o subproduto da digestão anaeróbia, que pode ser utilizado como coproduto da geração de biogás. Trata-se de um adubo orgânico, líquido ou sólido, dependendo do substrato, produzido em meio anaeróbio a partir de uma mistura de materiais orgânicos. A presença de minerais e outros nutrientes na matéria orgânica dá a este subproduto alto valor agregado agrícola (DAROLT, 2006). A qualidade do resíduo dependerá da matéria orgânica utilizada no processo e do próprio processo de digestão anaeróbia (GIZ, 2010).

## 2.3 BIOGÁS

### 2.3.1 Composição Química

A Tabela 2.1 apresenta uma visão geral da composição média do biogás do processo de tratamento anaeróbio.

**Tabela 2.1 – Composição típica do biogás gerado no processo de tratamento anaeróbio.**

<b>Composto</b>	<b>Faixa Típica (% em volume)</b>
Metano (CH <sub>4</sub> )	50-75
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	25-50
Nitrogênio (N <sub>2</sub> )	0-10
Hidrogênio (H <sub>2</sub> )	0,01-5
Oxigênio (O <sub>2</sub> )	0,1-2
Vapor de água	0-10
Amônia (NH <sub>3</sub> )	Menos de 1%
Sulfeto de Hidrogênio (H <sub>2</sub> )	0,01-3
Siloxanos	0-0,00002

Fonte: TABATABAEI E GHAVANATI, 2018.

### 2.3.2 Aplicações e Tratamento do Biogás

O biogás possui muitas aplicações de aproveitamento energético, podendo citar algumas mais difundidas industrialmente como:

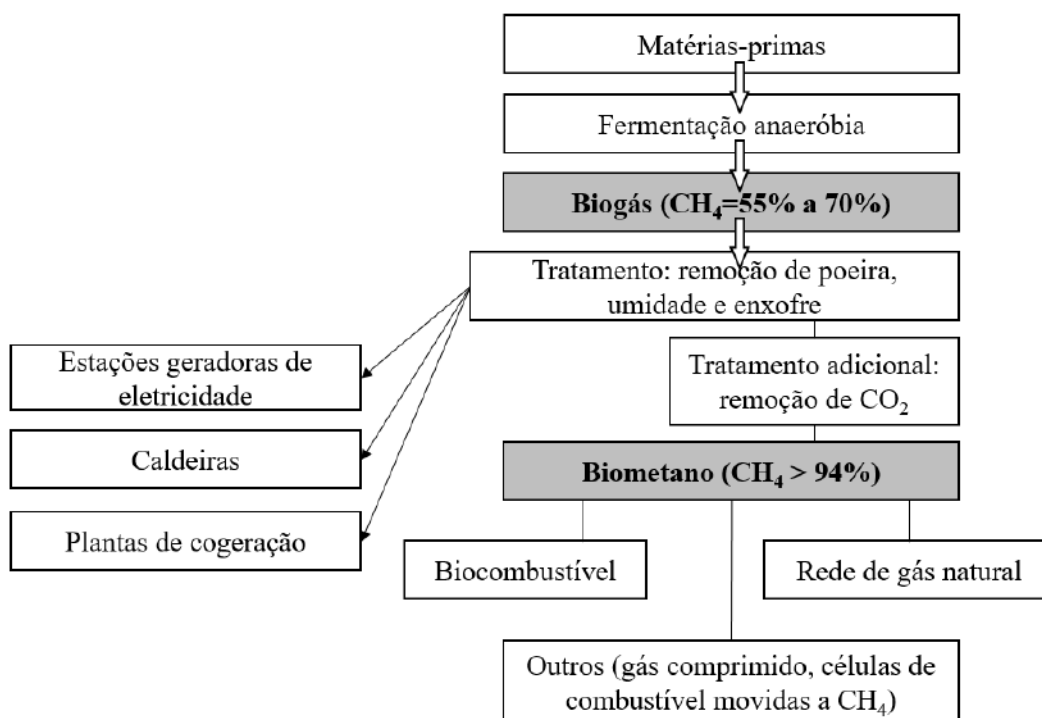
- Caldeiras a gás para geração de energia térmica;
- Motores a gás estacionários para cogeração de energia elétrica e térmica;
- Injeção na rede de gás natural, possibilitando posterior aproveitamento como energia elétrica, térmica e energia veicular, após a purificação do biogás a biometano. (PROBIOGÁS, 2015).

Para determinados usos, não é possível aproveitar diretamente o biogás bruto produzido em virtude de contaminantes, em especial os compostos de ácido sulfídrico (H<sub>2</sub>S), umidade e gás carbônico. Essas impurezas podem diminuir o potencial calorífico do biogás, ocasionando queima por combustão incompleta e perda de potência, causar

problemas de corrosão e desgaste mecânico nos equipamentos e aumentar a emissão de poluentes quando o biogás é queimado. Para cada fonte que for utilizar o biogás, será selecionado o tipo de tratamento a ser realizado, podendo ser mais ou menos exigente.

Na Figura 2.6, consta um fluxograma contendo as principais etapas de purificação do biogás a partir de sua aplicação final.

**Figura 2.6 – Purificação do biogás conforme uso final.**



Fonte: Adaptado de BNDS, 2018.

Para a geração local de calor e/ou eletricidade, em motores de acionamento direto, cogeração, ou combustão em caldeira, basta a retirada de umidade e  $H_2S$ , não sendo necessária a etapa de retirada do  $CO_2$ , chamada de *upgrading* (ASSUNÇÃO, 2022).

A etapa de *upgrading* leva ao processamento e transformação do biogás em biometano - combustível gasoso com elevado teor de metano em sua composição - e ser injetado na rede de gás natural. Essa forma de uso eleva o potencial calorífico e pode ser vista como um potencial ilimitado de armazenamento e distribuição, uma vez que propicia ao biometano as mesmas formas de utilização do gás natural, incluindo utilizações domésticas, industrial em termoeletricas e como combustível veicular. A qualidade do biometano é regulamentada no Brasil por meio da Resolução ANP nº 8/2015 e da Resolução ANP nº 685/2017 (ASSUNÇÃO, 2022).



### 2.3.3 Poder Calorífico

A característica mais importante de um combustível é sua capacidade de gerar calor, ou seja, seu poder calorífico, que representa a quantidade de energia química liberada na reação de combustão (SILVA, 2019 ; RIBEIRO, 1993).

O poder calorífico do biogás ditará sua qualidade para o uso em geração de energia, sendo importante buscar processos mais eficientes de geração do gás e de sua purificação. A concentração de metano presente na mistura afetará diretamente a capacidade do gás de gerar calor e energia, como pode ser visto na Tabela 2.2. Maiores quantidades de metano resultam em um maior poder calorífico inferior do biogás, ou seja, à quantidade de calor libertado quando um material entra em combustão e os gases de descarga são resfriados até ao ponto de ebulição da água. (SILVA, 2019 ; LIMA e PASSAMANI, 2012).

**Tabela 2.2 - Poder calorífico inferior para concentrações de metano no biogás.**

Composição Química do Biogás	Peso Específico (Kg/Nm <sup>3</sup> )	Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)	Poder Calorífico Inferior (kcal/Nm <sup>3</sup> )
10% CH <sub>4</sub> , 90% CO <sub>2</sub>	1,8393	465,43	856,06
40% CH <sub>4</sub> , 60% CO <sub>2</sub>	1,4643	2338,52	3424,29
60% CH <sub>4</sub> , 40% CO <sub>2</sub>	1,2143	4229,98	5136,46
65% CH <sub>4</sub> , 35% CO <sub>2</sub>	1,1518	4831,14	5564,5
75% CH <sub>4</sub> , 25% CO <sub>2</sub>	1,0268	6253,01	6420,59
95% CH <sub>4</sub> , 5% CO <sub>2</sub>	0,7768	10469,6	8132,78
99% CH <sub>4</sub> , 1% CO <sub>2</sub>	0,7268	11661,02	8475,23

Fonte: Adaptado de SILVA 2019 ; LIMA e PASSAMANI, 2012

### 2.4 BIODIGESTORES

A utilização da biodigestão anaeróbia através de biodigestores para estabilização de diferentes substratos é bastante antiga. No Brasil, esta tecnologia teve um forte impulso nas décadas de 70 e 80 caindo posteriormente em descrédito devido, principalmente, à falta de conhecimento e acompanhamento técnico desta tecnologia. Na década de 90, a biodigestão anaeróbia novamente ganhou força, colocando-se como alternativa para agregação de valor ao dejetos além de propiciar uma degradação parcial da fração líquida

podendo ser utilizado como biofertilizante dentro dos preceitos das boas práticas agronômicas (Kunz, 2004).

### **2.4.1 Tipos e Modelos de Biodigestores**

A configuração ótima dos reatores de biodigestão é função das características da matéria-prima, como conteúdo de sólidos dissolvidos, volatilidade dos sólidos, biodegradabilidade, densidade e tamanho de partícula (ASSUNÇÃO, 2022).

Os biodigestores são classificados em dois tipos: biodigestores de alimentação contínua e biodigestores de batelada ou de fluxo não contínuo (GONÇALVES, 2012).

Alguns dos principais modelos, seguindo a classificação citada, serão apresentados a seguir:

#### **2.4.1.1 Biodigestores de alimentação contínua**

Há uma carga contínua de resíduos e também uma produção constante de biofertilizante e biogás. Este modelo possui uma caixa de entrada de resíduos e uma caixa de saída do biofertilizante e o próprio substrato contido no biodigestor é responsável por parte da vedação do sistema.

É indicado quando se possui uma quantidade de resíduos produzida de forma mais constante na propriedade e também mão-de-obra para a realização das cargas diárias (ALVES, 2014).

Os sistemas de biodigestores contínuos mais difundidos são: modelo indiano e modelo canadense.

##### **2.4.1.1.1 Modelo indiano**

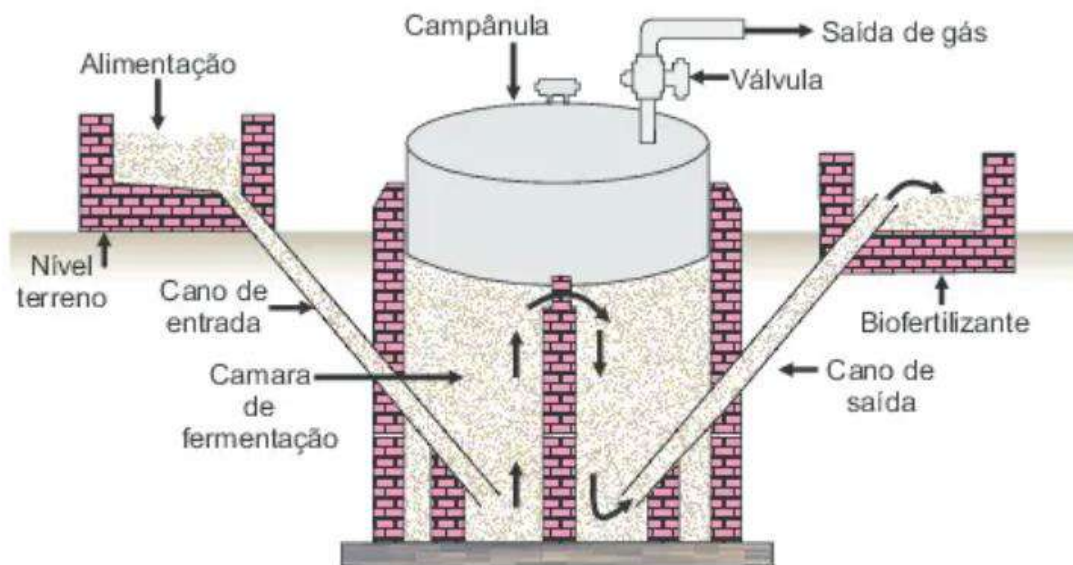
Este modelo apresenta uma campânula móvel. É uma espécie de redoma, como medidor de gás. Ela pode estar mergulhada na biomassa ou em um selo d'água externo, promovendo a redução das perdas durante o processo de produção do gás. Além disso, é responsável pela manutenção da pressão interna do sistema, expandindo quando não se consome o biogás produzido. Há também uma parede no meio, com o objetivo de dividir o tanque do biodigestor em duas câmaras. Essa disposição proporciona a movimentação do substrato por todo o biodigestor.

O resíduo a ser utilizado para alimentar o biodigestor indiano deverá apresentar uma concentração de sólidos totais (ST) não superior a 8%, para facilitar a circulação do

resíduo pelo interior da câmara de digestão e evitar entupimentos dos canos de entrada e saída do material (DEGANUTTI, ROBERTO et al., 2002).

Do ponto de vista construtivo, apresenta-se de fácil construção, contudo o gasômetro de metal pode encarecer o custo final, e também à distância da propriedade pode dificultar e encarecer o transporte inviabilizando a implantação deste modelo de biodigestor (DEGANUTTI, ROBERTO et al., 2002).

**Figura 2.7 Esquema de funcionamento do biodigestor de modelo indiano.**



Fonte: FONSECA, et al., 2009

#### 2.4.1.1.2 Modelo chinês

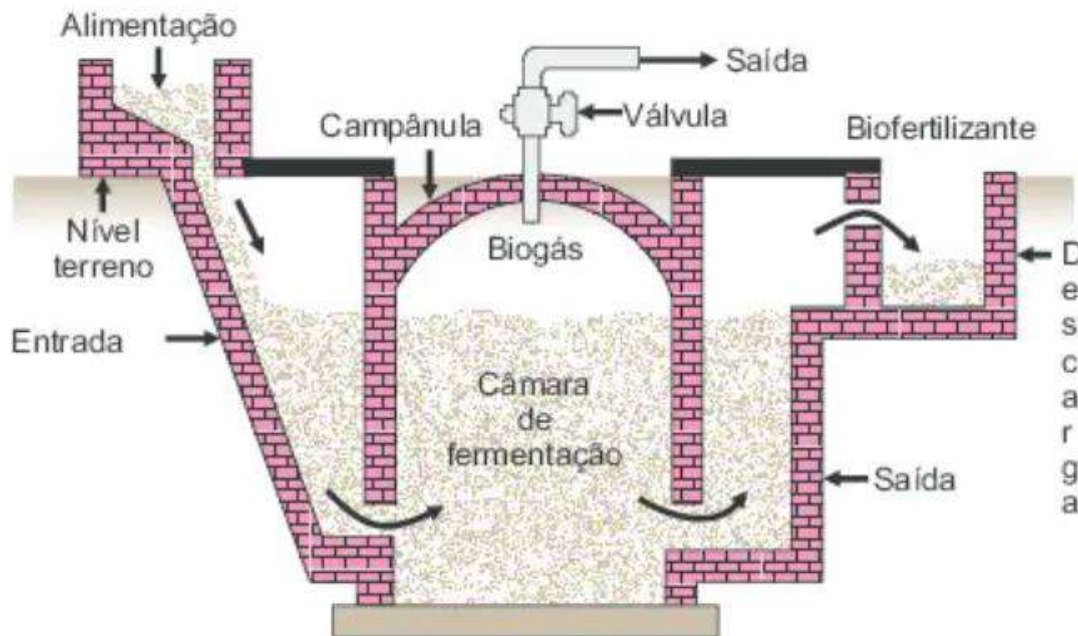
Representa um modelo de peça única, inspirado no modelo indiano, construído em alvenaria e enterrado no solo para ocupar menos espaço. Possui baixo custo em relação aos outros digestores, pois sua campânula fixa é quase toda feita em alvenaria e seu teto é impermeável com o objetivo de armazenar o biogás.

Sua construção não possui corrosão atrelada, podendo ter um tempo de uso de aproximadamente 35 anos, porém requer grande esforço para construção e supervisão por profissionais com experiência (SILVA, 2019).

Apesar de ser mais barato do que o modelo indiano, caso a vedação da estrutura desse sistema não seja boa, pode vazar biogás. Além disso, como uma parte do gás gerado na caixa de saída é liberado, o biodigestor do tipo chinês não é utilizado em casos de

instalações de grande porte. A Figura 2.8 ilustra um biodigestor de modelo chinês e seus principais componentes.

**Figura 2.8 Esquema de funcionamento do biodigestor de modelo chinês.**



Fonte: FONSECA, et al., 2009.

#### 2.4.1.1.3 Modelo canadense, *plug-flow* ou da Marinha

Este modelo tem uma estrutura de um reator tubular com manta polimérica, sendo ele comprido, horizontal e em seção transversal trapezoidal.

Com uma grande área de exposição ao sol, esse biodigestor possibilita uma maior produção de biogás que outros modelos comumente usados por atuar como uma espécie de estufa. A temperatura é um dos fatores que mais afeta a produção do biogás. Por sua cúpula ser de plástico maleável, usualmente em PVC, que, pelas suas propriedades físicas de flexibilidade, pode inflar com a produção de gás. Porém, mesmo ganhando força no mercado, este tipo de digestor tem um problema no que concerne ao custo da cúpula, podendo ser um fator de inviabilização do projeto (GRANDO, 2017).

Recomenda-se uma maior restrição quanto à quantidade de sólidos totais presentes na carga do biodigestor para que não haja entupimento da tubulação. O excesso de sólidos pode provocar a formação de uma crosta espessa no tanque, o que dificulta a ação dos microrganismos na produção do biogás. Para que esse problema não afete o desempenho do biodigestor, sugere-se a utilização de agitação no tanque (BARROS, 2021).

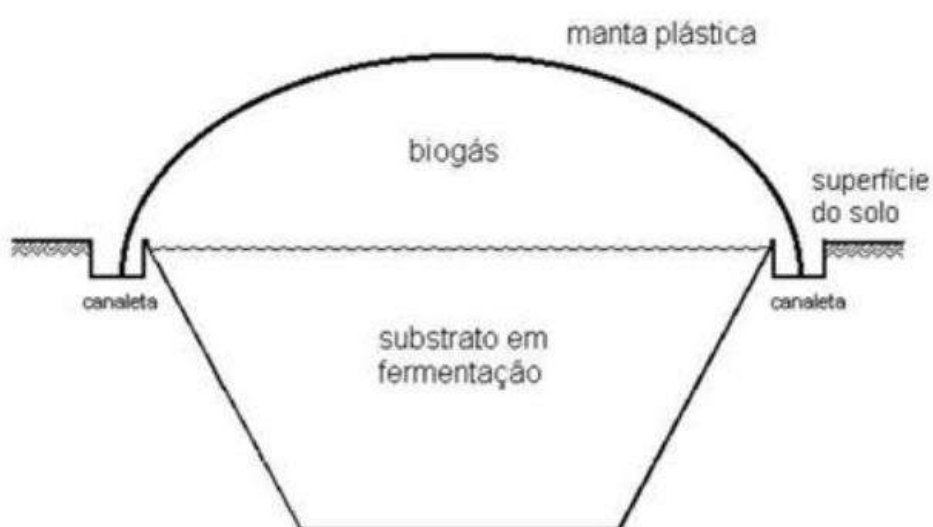
As Figuras 2.9 e 2.10 apresentam, respectivamente, um modelo real de biodigestor implementado e uma ilustração da vista transversal com a representação de seus componentes.

**Figura 2.9 Biodigestor canadense em fazenda brasileira.**



Fonte: EMBRAPA, 2018.

**Figura 2.10 Seção transversal de Biodigestor canadense.**



Fonte: MOURA, 2012

#### 2.4.1.2 Biodigestores de batelada

Sua característica consiste na adição de todo o resíduo orgânico de uma só vez na câmara digestora. Posteriormente, fecha-se hermeticamente o biodigestor, favorecendo a digestão anaeróbia. O gás produzido é armazenado na câmara digestora ou em um gasômetro acoplado a esta. Após ter completado todo o processo de biodigestão, retira-se o biofertilizante gerado e adiciona-se uma nova carga de resíduos. É um modelo indicado quando se tem resíduos em grandes quantidades em um curto espaço de tempo (ALVES, 2014).

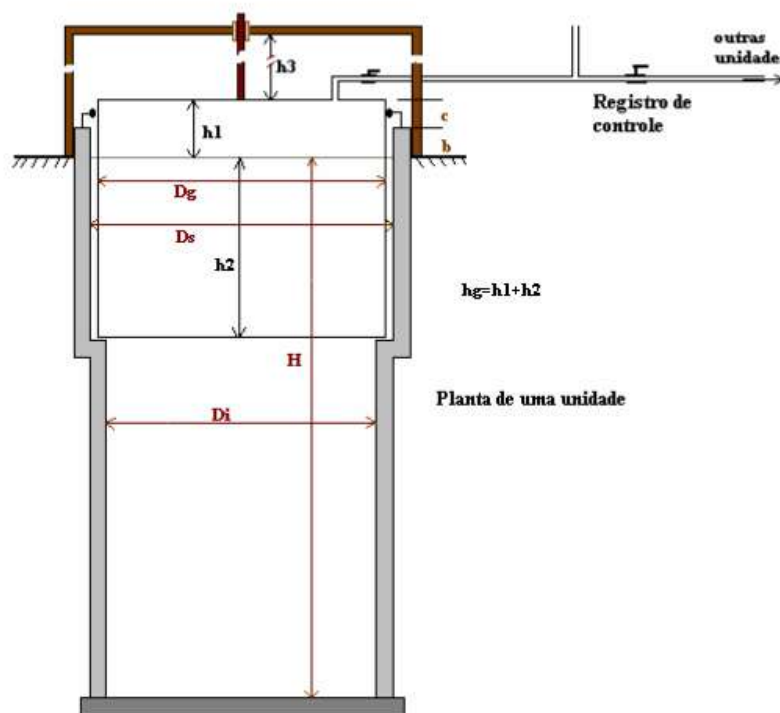
Os sistemas de biodigestores de batelada mais difundidos são: modelo tubular e MESB (Metanização em Estado Sólido por Bateladas).

##### 2.4.1.2.1 Modelo tubular ou batelada

Trata-se de um sistema bastante simples e de pequena exigência operacional. Sua instalação poderá ser apenas um tanque anaeróbio, ou vários tanques em série tubulares e verticais. Esse tipo de biodigestor é abastecido de uma única vez, portanto não é um biodigestor contínuo, mantendo-se em fermentação por um período conveniente, sendo o material descarregado posteriormente após o término do período efetivo de produção de biogás (DEGANUTTI, ROBERTO et al., 2002).

Este modelo é mais adaptado para uma disponibilidade de biomassa por períodos mais longos e alto volume, cujo esquema simplificado de funcionamento é apresentado na Figura 2.11.

**Figura 2.11 Esquema de funcionamento do biodigestor de modelo tubular.**



Legenda - descrição dos elementos:  $D_i$  – diâmetro interno do biodigestor;  $D_s$  – diâmetro interno da parede superior;  $D_g$  – diâmetro do gasômetro;  $h_1$  – altura ociosa do gasômetro;  $h_2$  – altura útil do gasômetro;  $h_3$  – altura útil para deslocamento do gasômetro;  $b$  – altura da parede do biodigestor acima do nível do substrato;  $c$  – altura do gasômetro acima da parede do biodigestor.

Fonte: (DEGANUTTI, ROBERTO et al., 2002)

#### 2.4.1.2.2 Metanização em Estado Sólido em Batelada (MESB)

Consiste em uma tecnologia para a realização da biodigestão anaeróbia a partir do teor de sólidos voláteis no interior do bioreator. Ela foi desenvolvida justamente para o tratamento de resíduos orgânicos com alto teor de sólidos (acima de 20%), sendo ideal para o tratamento da fração orgânica de resíduos sólidos (FORSU) em um estado mais natural, não exigindo tantos pré-tratamentos para condicionamento do substrato (VIEIRA, 2022).

A MESB usualmente é promovida em reatores retangulares (câmaras de digestão), com portas para estanqueidade, nos quais o substrato é empilhado para a digestão (VIEIRA, 2022; FERREIRA, 2019).

De forma geral, o processo MESB é o que apresenta maior variedade de tecnologias para sua condução, de acordo com seu design, estratégias de inoculação e

recirculação de lixiviado, pré-tratamentos do resíduo, pós-tratamentos do digestato e do biogás e estratégias de armazenamento. Apesar disso, devido ao seu teor maior de sólidos, é um processo mais suscetível a acúmulos de intermediários inibitórios e, conseqüentemente, mais instável. De forma a contornar isso, é fundamental controlar certos parâmetros operacionais como umidade, temperatura, pressão, pH e alcalinidade, de forma a garantir estabilidade do processo e boa eficiência de tratamento e produção de metano (VIEIRA, 2022; FERREIRA, 2019).

Outra questão a se considerar no processo MESB é a vazão de biogás e o teor de metano, variáveis ao longo da batelada, que pode ser contornada através da utilização de vários biorreatores de forma a resultar em produção semi-contínua (VIEIRA, 2022; FERREIRA, 2019). A Figura 2.12 mostra as visões externas e internas de um biodigestor compatível a esta tecnologia

**Figura 2.12 (A) Vista Externa do Biodigestor MESB; (B) Vista Interna de Biodigestor sem Resíduos Sólidos Orgânicos.**



Fonte: Adaptado de JUNIOR, 2021.



### **2.4.2 Comparativo entre Modelos**

O quadro 2.1 foi adaptado de SILVA (2019), com o intuito de facilitar a disponibilidade dos fatores positivos e negativos de cada modelo de biodigestor. A escolha do melhor modelo deve levar em conta características como, tipo de terreno, clima da região, investimento inicial disponível e a disponibilidade de mão de obra para a construção e manutenção do biodigestor.

**Quadro 2.1 – Comparação entre diferentes modelos de biodigestor.**

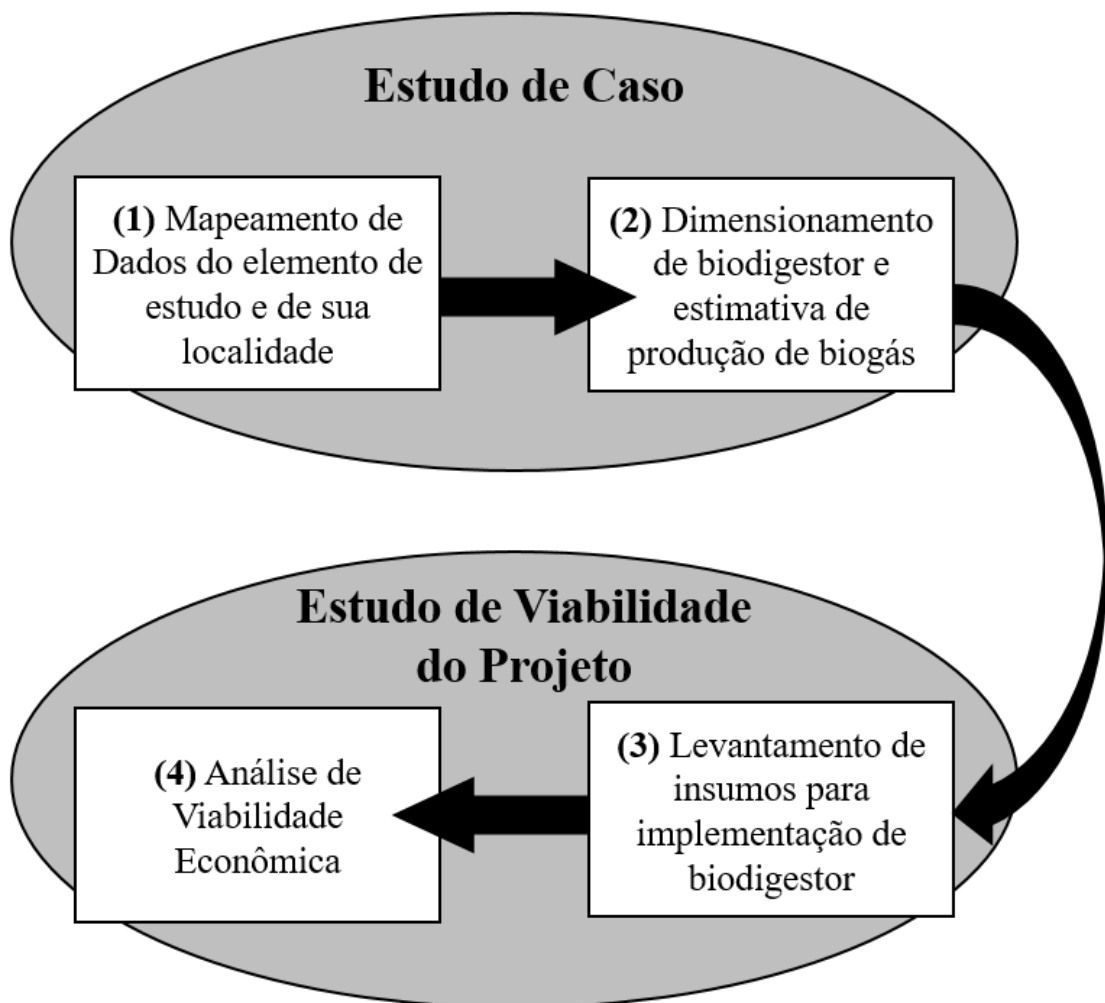
<b>Fatores</b>	<b>Modelo</b>	<b>Indiano</b>	<b>Chinês</b>	<b>Marinha</b>	<b>Batelada</b>	<b>MESB</b>	<b>Fonte</b>
<b>Alimentação</b>		Contínua	Contínua	Contínua	Batelada	Batelada	(NAZARO, 2016; COSTA, 2014; FERREIRA, 2019)
<b>Isolamento térmico</b>		Perdas de calor pelo casco metálico.	Isolação térmica devida instalação subterrânea.	Perdas parciais de calor pela manta em dias não ensolarados.	Pode ser isolado caso construído abaixo do solo, ou sem isolamento em modelos mais rudimentares.	Não levantado	(STACHISSINI, 2014; VERSIANI, 2005; VON SPERLING, 1996;)
<b>Pressão de gás</b>		Constante	Variável	Variável	Variável	Variável	(NAZARO, 2016; COSTA, 2014; GOMES, 2014; SAKUMA, 2013; FERREIRA, 2019)
<b>Espaço requerido</b>		Pouco espaço requerido.	Pouco espaço requerido.	Muito espaço requerido devido à disposição horizontal.	Pouco espaço requerido.	Depende do modelo escolhido	(BEZERRA, 2016; RODRIGUES et al., 2010; STACHISSINI, 2014; FERREIRA, 2019)
<b>Construção</b>		Médio grau de dificuldade da estrutura. Cúpula metálica deve ser feito em uma metalúrgica	Construção simples, mas necessária mão de obra experiente.	Pode ser construído pelo usuário	Pode variar de construções simples de alvenaria a modelos mais rudimentares.	Depende do modelo escolhido	(STACHISSINI, 2014; VERSIANI, 2005; FERREIRA, 2019)
<b>Custo</b>		Maior custo em relação aos outros biodigestores tradicionais. Maior impacto pela cúpula metálica.	Custo intermediário. Maior impacto na construção.	Menor Custo.	Baixo custo de implementação.	Depende do modelo escolhido	(CALZA et al., 2015; RODRIGUES et al., 2010; FERREIRA, 2019)
<b>Vantagens</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pressão do gás constante;</li> <li>• Possui duas câmaras de digestão;</li> <li>• Fácil operação.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor custo em relação ao indiano;</li> <li>• Bom isolamento térmico;</li> <li>• Maior durabilidade.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta superfície de exposição ao sol;</li> <li>• Menor custo de construção e implantação.</li> <li>• Facilidade de construção</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possibilidade de construção de modelos simples;</li> <li>• Versatilidade;</li> <li>• Fácil implementação.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maior número de tecnologias para condução;</li> <li>• Versatilidade;</li> <li>• Fácil implementação.</li> </ul>	(ÁGUAS CLARAS, 2017; DEGANUTTI and TAVARES, 2002; RODRIGUES et al., 2010; ZHANG et al., 2013; FERREIRA, 2019)
<b>Desvantagens</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto custo de construção e implantação;</li> <li>• Baixa durabilidade do gasómetro;</li> <li>• Isolamento térmico ineficiente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto risco de vazamentos;</li> <li>• Pressão do gás variável;</li> <li>• Dificuldade de construção.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixa durabilidade da manta;</li> <li>• Isolamento térmico ineficiente;</li> <li>• Pressão do gás variável.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixo rendimento;</li> <li>• Deve ser limpo a cada utilização.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mais suscetível ao acúmulo de subprodutos indesejados;</li> <li>• Mais manutenção;</li> <li>• Maior flutuação de variáveis do processo</li> </ul>	(ÁGUAS CLARAS, 2017; DEGANUTTI and TAVARES, 2002; RODRIGUES et al., 2010; ZHANG et al., 2013; FERREIRA, 2019)

Fonte: Adaptado de SILVA, 2019.

### 3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho foi dividida em um Estudo de Caso e um Estudo de Viabilidade do Projeto. A Figura 3.1 destrincha as etapas que compõem cada um dos estudos, que foram seguidas sequencialmente, de modo que gerassem insumos para a avaliação final de viabilidade econômica da implementação do processo de um biodigestor.

**Figura 3.1 Diagrama de blocos metodologia aplicada**



Fonte: Autoria própria, 2023.

A etapa (1) segue procedimento adotado por SILVA (2019) no que tange o mapeamento geográfico e socioeconômico da localidade a qual a Escola de estudo está inserida, baseado em dados locais e do Censo promovido pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Esta fase também englobou a coleta presencial de dados gerais da Escola a serem usados no

dimensionamento do biodigestor na etapa (2), bem como um estudo de terreno e da gestão de resíduos sólidos da instituição.

A etapa (2) fez uso dos métodos propostos por QUEIROZ (2017) e ROCHA (2016) para a definição dos parâmetros de dimensionamento do biodigestor, cálculo de seu volume útil e a estimativa de produção do biogás. Todos os parâmetros cujos valores foram inviáveis de serem coletados na etapa (1) são estimados baseados em correlações encontradas em referências bibliográficas explicitadas no capítulo 4. Houve também o uso do volume útil do biodigestor para dimensionar o restante do sistema de biodigestão baseado em procedimentos seguidos por MARTINS e FILHO (2020) e DE MATOS, DOS SANTOS e BATISTA (2017).

Na etapa (3) realizou-se um levantamento de insumos requeridos para a implementação do sistema de biodigestão, abrangendo quantidades estimadas e preço médio a partir de pesquisa de mercado para cálculo de receita estimada para investimento.

A etapa (4) consistiu em uma análise da viabilidade econômica a partir de modelos propostos por BRUNI, FAMÁ e SIQUEIRA (1998), englobando conceitos de Fluxo de Caixa, *Payback* simples e com desconto, Taxa Mínima de Atratividade, Valor Presente Líquido e Taxa Interna de Retorno. Todos os dados obtidos nas etapas anteriores serão necessários para a presente avaliação. A análise de viabilidade econômica foi realizada na ferramenta Excel® em cenário de detalhamento mensal.

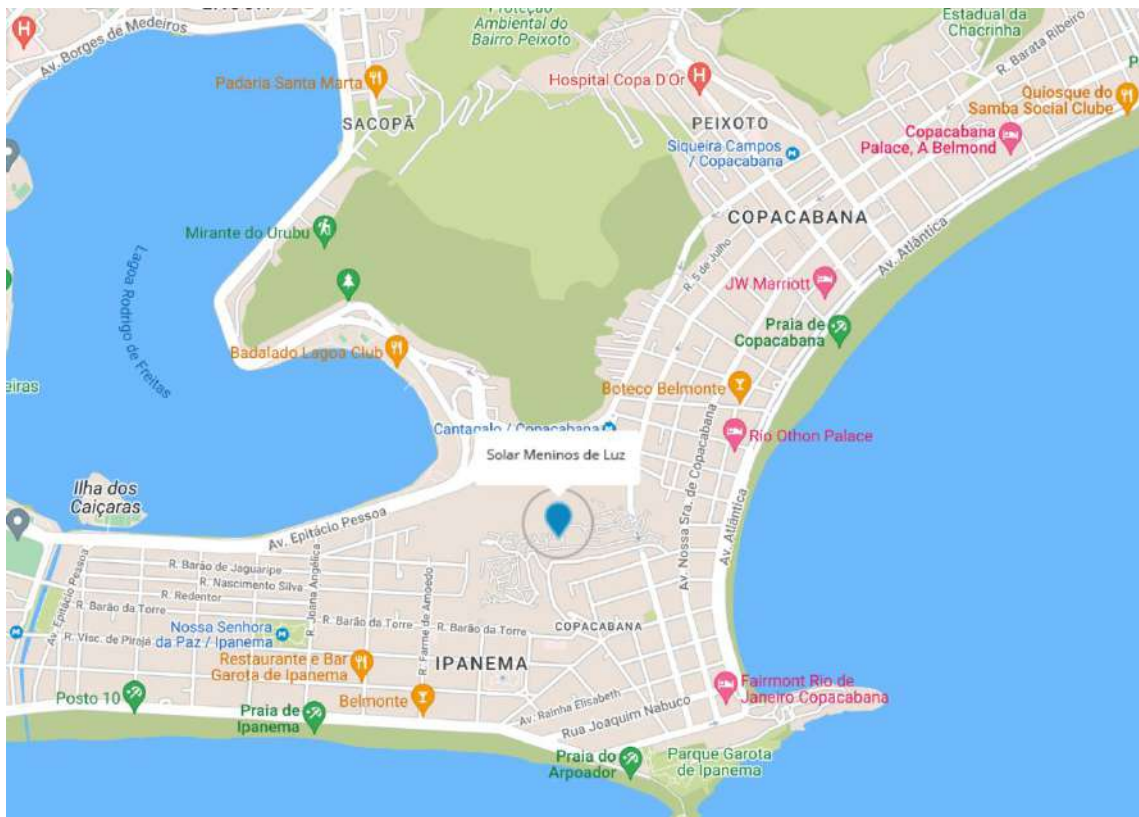
## 4 ESTUDO DE CASO

### 4.1 MAPEAMENTO DE DADOS DO ELEMENTO DE ESTUDO E DE SUA LOCALIDADE

#### 4.1.1 Localidade e perfil demográfico da comunidade local

Para a avaliação da aplicação de um biodigestor, realizada previamente por SILVA (2019), a Escola Integral Solar Meninos de Luz foi escolhida como objeto de estudo. Seu endereço está localizado no bairro de Copacabana, cuja região compreende proximidade com as comunidades do Cantagalo e Pavão-Pavãozinho, ilustrado na Figura 4.1.

**Figura 4.1** Localização da Escola Integral Solar Meninos de Luz.



Fonte: Google Maps, 2023.

O conjunto de favelas Cantagalo-Pavão-Pavãozinho está localizado na Área de Planejamento 2 (AP2) da cidade do Rio de Janeiro, na zona sul do Rio de Janeiro, entre Copacabana, Ipanema e Lagoa, todos bairros de classe média alta e concentração majoritária da rede hoteleira da cidade. Segundo o Censo IBGE do ano de 2010, sua população era de 10.338 habitantes, tendo sua distribuição a partir da Tabela 4.1.

**Tabela 4.1 – Dados da geografia das comunidades Pavão-Pavãozinho e Cantagalo.**

Dados	Pavão-Pavãozinho	Cantagalo
População (hab)	5.567	4.771
Área (m <sup>2</sup> )	63.980	63.974
Habitantes por domicílio	3,03	3,34
Densidade demográfica (hab/ha)	870,116	745,772

Fonte: IBGE, 2010. Adaptado de SILVA, 2019.

Até a presente conclusão deste trabalho, o Censo 2022 apresentou detalhamentos de dados limitados ao nível municipal. A partir da tabela 4.2, observa-se a variação da densidade populacional no Município (M) e Estado (E) do Rio de Janeiro por pesquisa divulgada.

**Tabela 4.2 – Variação da Densidade Populacional no Município e Estado do Rio de Janeiro.**

Ano Censo	Rio de Janeiro (M)	Var. Censo/Censo-1 (M)	Rio de Janeiro (E)	Var. Censo/Censo-1 (E)
1970	4.251.918	-	9.110.324	-
1980	5.090.723	19,7%	11.489.797	26,1%
1991	5.480.768	7,7%	12.783.761	11,3%
2000	5.857.904	6,9%	14.367.083	12,4%
2010	6.320.446	7,9%	15.989.929	11,3%
2022	6.211.423	-1,7%	16.054.524	0,4%

Fonte: IBGE, 2022

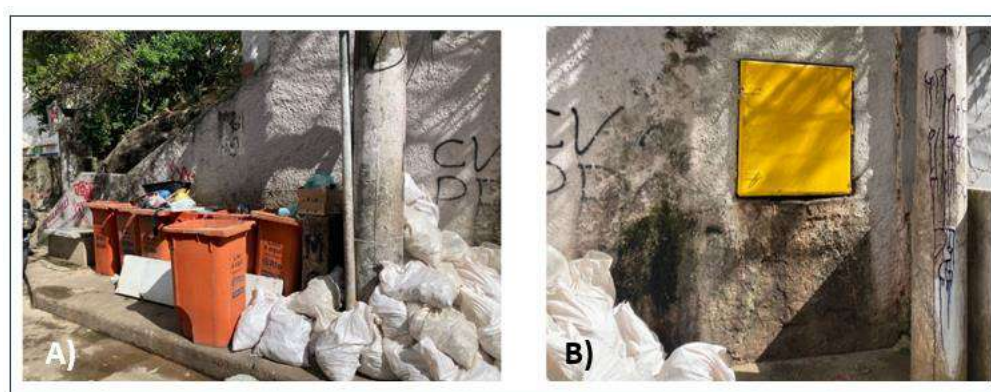
Analisando o perfil de variação do Censo de 2022 e comparado ao levantamento do Censo 2010, levando em consideração apenas a variação de crescimento populacional, os dados para as comunidades Cantagalo e Pavão-Pavãozinho não aparentam ter tido uma variação substancial.

A densidade demográfica das regiões de estudo chega a ser oito vezes maior que a média no restante da cidade, que é de 110 hab/ha (IBGE, 2010; IPP, 2017).

Entretanto, estes números podem apresentar uma distorção que aponta para deficiências na coleta de dados em regiões de vulnerabilidade social como as favelas cariocas: uma estimativa da Associação de Moradores Pavão-Pavãozinho e a Clínica da Família local aponta para um quantitativo acima de 35.000 habitantes no complexo Cantagalo-Pavão-Pavãozinho. A discrepância destes números escancara uma realidade envolvendo a falta de acesso desta população em âmbitos que variam desde o cenário estatístico ao social. Esta perspectiva é fruto de diversas variáveis envolvendo a deficiência do planejamento habitacional da população carioca ao longo de décadas, o que resulta em locais com escassez de serviços públicos, como a própria limpeza pública, que levam a problemas sanitários e de saúde pública.

Atualmente, a comunidade Pavão-Pavãozinho possui dois pontos de coleta de resíduos sólidos urbanos, enquanto a do Cantagalo possui apenas um. Eles estão localizados nas partes mais baixas dos morros, visto que são as regiões que receberam pavimentação adequada para movimentação dos caminhões da Companhia Municipal de Limpeza Urbana, a COMLURB. Estes são os únicos locais oferecidos à comunidade para recolhimento dos RSU, vistos nas Figuras 4.2 e 4.3.

**Figura 4.2 A) Posto de coleta de Resíduos Sólidos Urbanos na comunidade do Cantagalo e B) Rampa do ciclo de lixo.**



Fonte: Autoria própria (2023)

**Figura 4.3 Postos de coleta na comunidade Pavão-Pavãozinho. (A) Plano Inclinado Local, (B) Posto de coleta proximo ao plano inclinado e (C) Posto de coleta próximo à ladeira principal da comunidade.**



Fonte: Autoria própria (2023)

Além disto, caçambas públicas estão disponíveis apenas em regiões de alta concentração e comércio ativo, como nas redondezas do Plano Inclinado do Pavão-Pavãozinho; em compensação, foram encontrados alguns pontos de concentração de resíduos, provenientes de entulho de obras que se misturaram a resíduos orgânicos em locais de acesso dificultado. Conforme a subida ao morro aumenta, maior a concentração de vielas e menor a ventilação das residências. Uma vez que haja acúmulo de RSUs nestas condições, causados pela falta de conscientização da população e pela distância dos pontos públicos de coleta, a propensão de disseminação de doenças respiratórias e provocadas por vetores aumenta substancialmente.

#### **4.1.2 Dados da atual propriedade de implementação**

A Escola Integral Solar Meninos de Luz é uma organização civil e filantrópica, atuando como uma instituição de educação integral, promovendo ações e projetos integrados às comunidades locais de Cantagalo e Pavão-Pavãozinho.

Com 39 anos de serviços de assistência à famílias e 32 anos de ações de educação integral, a organização possui três frentes de trabalho em sua sede: Programa Educação Integral, Programa Família/Escola e Programa Família/Comunidade, promovendo ações assistenciais, culturais e educacionais à rede de alunos e suas famílias.



**Figura 4.4 Vista alta da Escola Solar Meninos de Luz.**



Fonte: Wikiwand

Foi realizada uma visita à sede principal da instituição no dia 04 de Julho de 2023, com o objetivo de atualizar alguns dados previamente coletados por SILVA (2019) e reunir insumos para realização do estudo de viabilidade da instalação do biodigestor dentro das instalações internas. A atualização citada servirá para avaliar se as dimensões do biodigestor, calculadas por SILVA (2019), ainda se aplicam no período de publicação do presente trabalho, precedido por um período pandêmico que trouxe impactos socioeconômicos a diferentes regiões do país. Assim, foram captadas informações a respeito da abrangência dos serviços oferecidos à comunidade, bem como dados a respeito da propriedade, consumo de recursos e ações de sustentabilidade. A sintetização e detalhamento das informações levantadas podem ser encontradas, respectivamente, no quadro 4.1 e no Apêndice A.

**Quadro 4.1 – Informações levantadas na Escola Integral Solar de Luz.**

<b>Abrangência dos serviços à comunidade local</b>	
Total de Alunos	426
Faixa etária dos Alunos	3 meses a 18 anos
Total de Funcionários	155 (125 CLT e 30 MEI)
Total de Turmas	19 (1 por série escolar)
Tipos de Turmas	Creche, maternal, ensino fundamental e ensino médio
Atividades extracurriculares e oficinas oferecidas	- Esportes; - Cursos de Línguas; - Aulas de Informática e Robótica; - Treinamentos e palestras; - Monitoria (Horta e Laboratório); - Teatro; - Dança; - Yoga e Meditação; - Aulas de Empreendedorismo, Educação Socioemocional e “Projeto de Vida”.
<b>Dados da propriedade</b>	
Área total	Não informado
Área não construída	Não informado
Número de instalações	5
Terreno com desnível?	Não
Tipo de solo	húmico
<b>Dados de consumo</b>	
Consumo de Alimentos/mês	5 toneladas
Geração de Resíduos Orgânicos/mês	-
Consumo de Gás/mês	275m <sup>3</sup>
Finalidade do consumo de gás	- Cozinha da cantina; - Aquecimento de banhos dos bebês;

<b>Sustentabilidade</b>	
Horta orgânica	1
Composteiras	1
Painéis fotovoltaicos	Quantidade não levantada
Coletores de água da chuva	3

Fonte: Autoria própria, 2023.

Comparado aos dados anteriormente obtidos por SILVA (2019), houve um crescimento de 3,9% com relação ao corpo discente e 40,9% ao total de funcionários, proveniente do maior número de profissionais em atividades extracurriculares disponibilizadas aos alunos. Conseqüentemente, houve também um aumento de aproximadamente 10%, baseado no aumento do corpo total da instituição, nos consumos de alimentos e gás. Para os gastos com gás, considerando a tarifa atual por m<sup>3</sup> e o aumento médio de 10% no consumo, os valores mensais poderão ultrapassar R\$3.000,00.

No que tange os projetos de sustentabilidade da Escola, a horta, além de fomentar o cultivo de vegetais, é fonte de conhecimento para alunos de todas as idades com relação ao papel de atuação do ser humano dentro do meio ambiente e, em conjunto com a compostagem, à aplicação do conceito dos 3R's. Também englobando a natureza dos projetos citados, existem, neste mesmo terreno, estruturas de captação da água da chuva, que é armazenada dentro de reservatórios, oferecendo a opção do reaproveitamento da água para atividades de limpeza. Por último, as instalações contêm painéis fotovoltaicos solares que suprem parte da demanda da Escola, gerando uma economia nos custos com eletricidade.

#### **4.1.3 Perfil de terreno da localidade**

Foram mapeados locais em potencial para a construção do biodigestor, chegando-se à instalação que contém a horta, os sistemas de compostagem e captação da água da chuva, por possuir uma maior área não construída disponível. O terreno é plano, previamente nivelado, com características de solo húmico (EMBRAPA, 2001) e parcialmente concretado. Também não existem cursos d'água, dutos ou instalações subterrâneas que comprometam a escavação para construção do reservatório do biodigestor.

A Figura 4.5 ilustra as localidades candidatas à implementação do biodigestor dimensionado, onde ambas localizam-se lado a lado no terreno, que ficam a uma distância e altura distantes da circulação comum de alunos e funcionários da Escola.

**Figura 4.5** Terrenos candidatos à implementação do sistema de biodigestão na Escola Solar Meninos de Luz. (A) Terrenos nivelado sem construções e (B) Terreno contendo horta e composteira.



Fonte: Autoria própria (2023)

A distância entre o terreno para construção do biodigestor e a cozinha da instituição, principal área beneficiada pela utilização do biogás, é de cerca de 30 metros, conforme ilustrado na Figura 4.6.

Entretanto, é recomendado, pelo Manual de Treinamento em Biodigestão, que o biodigestor fique situado à uma distância de, no mínimo, 15 metros de qualquer edificação, como medida de segurança (REZENDE, 2017). Isto proporciona uma maior restrição ao terreno citado, visto que a escavação para o biodigestor não deverá ser realizada nas extremidades do terreno.

**Figura 4.6** Mapa em satélite das instalações da Escola Solar Meninos de Luz.



Fonte: Google Maps, 2023.

#### 4.1.4 Geração e gestão dos resíduos urbanos

Durante a visitação à localidade Cantagalo-Pavão-Pavãozinho, foi possível detectar uma relevante disparidade com relação à disposição e gestão dos resíduos sólidos entre a Escola Integral Solar Meninos de Luz e as áreas externas que compõem a comunidade. Além de possuírem apenas três pontos oficiais da prefeitura para coleta de RSU, as comunidades não possuem serviço de coleta seletiva, o que dificulta a separação dos resíduos orgânicos potencialmente utilizáveis para alimentação de um biodigestor.

A lixo gerado na Escola é submetido a uma coleta seletiva interna e posteriormente coletado diariamente pelo serviço público de limpeza. A matéria orgânica usada na compostagem faz com que o total de resíduos alimentares descartados seja minimizado; tal ação é benéfica pois além de promover disseminação de conhecimento e reaproveitamento do descarte de alimentos para utilização como adubo, conseqüentemente, reduz a quantidade de lixo enviado aos aterros sanitários.

Com relação à quantidade mensal de resíduos orgânicos gerados, não foi encontrada na literatura dados para estimação ou quantificação da geração per capita em locais de características semelhantes aos das comunidades Cantagalo-Pavão-Pavãozinho. As condições de coleta e a falta de informações a respeito da quantidade de lixo gerado nas favelas deste estudo são fatores dificultosos para a implementação de um biodigestor como instrumento a favor de seus moradores; a má separação do lixo pode afetar o rendimento do biogás produzido e gerar subprodutos indesejados, além da falta de conhecimento do total de matéria orgânica produzida afetar o cálculo de dimensionamento do biodigestor.

A Solar Meninos de Luz também não possui estimativas a respeito do total de resíduos orgânicos produzidos, porém SILVA (2019) levantou estudos realizados em outras escolas municipais cujas métricas de geração de resíduos orgânicos totais e per capita foram divulgados. Com isso, foram utilizados valores médios como forma de aproximação no intuito de viabilizar o dimensionamento do biodigestor na Escola mapeada.

#### 4.2 DIMENSIONAMENTO DO BIODIGESTOR E ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Para a condução do presente trabalho, os estudos foram pautados no modelo de biodigestor proposto por SILVA (2019), em queo Biodigestor da Marinha (ou canadense) mostrou-se como o mais adequado em seus apontamentos. Esta decisão foi tomada baseada na comparação entre os modelos disponíveis na literatura, cujas principais características foram apresentadas previamente no Quadro 4.1.

No caso da Escola Solar Meninos de Luz, os requisitos mais importantes a serem considerados foram custo, tamanho, facilidade de implementação e transporte do gás produzido, cuja escolha apresenta construção simples e poderá ser implementado no terreno disponível nos fundos do terreno (SILVA, 2019).

Atualmente, esse é um dos modelos mais utilizados no país principalmente por conta da simplicidade no processo de instalação,impulsionado pelo mercado de crédito de carbono. Porém, é indicado que o sistema seja alimentado com um substrato com teor de sólidos totais de no máximo 2% (PIGOSSO et al., 2019). Para o caso de resíduos alimentícios, pode-se adotar um percentual próximo a 8% (RODRIGUES et al., 2014).

Para a instalação do biodigestor pré dimensionado é necessário a escavação do solo em formato piramidal e realizar a impermeabilização deste local que receberá o substrato. Essa

estrutura então é coberta por uma lona de PVC e suas pontas presas junto ao solo para que essa lona sirva como reservatório para o gás(MARTINS; FILHO, 2020).

Objetivando a obtenção das dimensões de construção de um biodigestor, se faz necessário o desenvolvimento em duas etapas: I – Identificação e quantificação de parâmetros; II – Determinação de volume do biodigestor e da produção de biogás.

#### **4.2.1 Identificação e quantificação dos parâmetros**

A seguir, será apresentada a determinação obtida por SILVA (2019) seguindo as metodologias propostas por QUEIROZ (2017) e ROCHA (2016) para quantificação dos parâmetros.

No Quadro 4.2 são apresentadas as fórmulas para cálculo do volume de biodigestor a partir dos requisitos de determinação do volume de carga de alimentação.

**Quadro 4.2 – Fórmulas para cálculo de volume de biodigestor.**

<b>Equação</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Unidades</b>
(1) $V_{biodigestor} = TRH \times VC$	$V_{biodigestor}$ = Volume do biodigestor TRH = Tempo de Retenção Hidráulica VC = Volume de Carga	m <sup>3</sup> dia m <sup>3</sup> /dia
(2) $VC = V_{MO} + V_{\acute{a}gua}$	VC = Volume de Carga $V_{MO}$ = Volume de Matéria Orgânica $V_{\acute{a}gua}$ = Volume de Água	m <sup>3</sup> /dia m <sup>3</sup> /dia m <sup>3</sup> /dia
(3) $V_{MO} = \frac{Pd}{\rho_R}$	$V_{MO}$ = Volume de Matéria Orgânica Pd = Quantidade de Resíduos Gerada $\rho_R$ = Densidade de Resíduos Alimentícios	m <sup>3</sup> /dia kg/dia kg/m <sup>3</sup>
(4) $C_{ST} = \frac{(Pd \times ST_I)}{100}$	$C_{ST}$ = Carga de Sólidos Totais $ST_I$ = Porcentagem inicial de sólidos presentes em resíduos alimentícios	kg/dia %
(5) $M_T = (C_{ST} \times 100) / ST_F$	$M_T$ = Massa Total de Alimentação $C_{ST}$ = Carga de Sólidos Totais $ST_F$ = Porcentagem final requerida de sólidos presentes na alimentação do biodigestor	kg/dia kg/dia %
(6) $M_{\acute{a}gua} = V_{\acute{a}gua} \times \rho_{\acute{a}gua} = M_T - Pd$	$M_{\acute{a}gua}$ = Massa total de água $V_{\acute{a}gua}$ = Volume de Água $\rho_{\acute{a}gua}$ = Densidade de Água $M_T$ = Massa Total de Alimentação Pd = Quantidade de Resíduos Gerada	kg m <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> kg/dia kg/dia

Fonte: Adaptado de SILVA, 2019.

Para que os cálculos fossem adequadamente aplicados, realizou-se algumas considerações para obtenção de alguns dos parâmetros requeridos a partir de material bibliográfico.



#### 4.2.1.1 Volume de Matéria Orgânica ( $V_{MO}$ )

Para a determinação do Volume diário de Matéria Orgânica usada na alimentação do biodigestor, será necessário levantar a quantidade diária de resíduos gerada (Pd), em quilogramas. Pelo fato de a Escola Solar Meninos de Luz não possuir levantamentos a respeito do total de resíduos orgânicos produzido, formulou-se uma correlação a partir de estudos contendo a informação de resíduos per capita em escolas municipais, conforme visto na Tabela 4.3.

Na definição de Pd, utilizou-se a média dos resíduos per capita das escolas e multiplicou-se pela quantidade total de integrantes da Solar Meninos de Luz.

**Tabela 4.3 – Comparação da geração de lixo em escolas brasileiras.**

Dados	Escola Municipal João Adão da Silva (PR)	Ponta-Porã (MS)	Escola Estadual Cardeal Roncalli (RS)	Solar Meninos de Luz (* dados reais, informados pela escola)
Quantidade de alunos	700	1475	1006	426*
Quantidade de funcionários	45	81	68	155*
Turnos	Manhã e tarde	Não mencionado	Não mencionado	Integral*
Resíduos orgânicos gerados - Pd (kg/dia)	50,4	15,5	15,3	17,8
Resíduos orgânicos per capita - (kg/pessoa x dia)	0,0677	0,01	0,0143	0,0307 (média)
Fonte	(KLIPPEL, 2015)	(CHAVES MAIA e MOLINA, 2014)	(TAGLIAPIETR A, n.d.)	-

Fonte: Adaptado de SILVA (2019)

O valor de referência adotado para a geração diária de resíduos orgânicos foi de 20kg, considerando eventuais resíduos de jardinagem, alimentos vencidos e resíduos gerados na cozinha no momento de preparo dos alimentos como insumos para alimentação do biodigestor.

Conforme estudo ROCHA (2016), para o cálculo do volume de matéria orgânica, é utilizada a massa específica do resíduo orgânico. Para resíduos alimentares, foi adotado o valor de 430,0 kg/m<sup>3</sup>.

Para determinação de  $V_{MO}$  tem-se, a partir da Equação (3):

$$V_{MO} = \frac{20 \left( \frac{kg}{dia} \right)}{430,0 \left( \frac{kg}{m^3} \right)} = 0,0465 (m^3/dia)$$

#### 4.2.1.2 Carga de Sólidos Totais ( $C_{ST}$ )

Inicialmente, deve-se estimar porcentagem inicial de sólidos contida nos resíduos alimentícios ( $ST_I$ ). O Quadro 4.3, proposto por Rocha (ROCHA, 2016) reúne informações de diversos autores onde a porcentagem de sólidos totais costuma variar entre a faixa aproximada de 18 a 31%:

**Quadro 4.3 – Percentual de sólidos totais em Resíduos Alimentares (RA) a partir de referências bibliográficas.**

Autor	(Zhang et al., 2007)	(ZHANG et al., 2013)	(LIEW et al., 2012)	(BROWNE and Murphy, 2013)	(ZHANG et al., 2011)
$ST_I$ (%)	18,1	23,1	24	29,4	30,9

Fonte: ROCHA, 2016.

Para a determinação da carga de sólidos totais ( $C_{ST}$ ) presente nos resíduos alimentares totais, serão aplicados na Equação (4) o valor de  $P_d$  encontrado anteriormente juntamente com a média dos valores do Quadro 4.3 em 25:

$$C_{ST} = \frac{20 \left( \frac{kg}{dia} \right) \times 25(\%)}{100} = 5 \left( \frac{kg}{dia} \right)$$

#### 4.2.1.3 Massa Total de Alimentação ( $M_T$ )

De acordo com RODRIGUES et al.(2014), a obtenção de rendimentos satisfatórios para alimentação de biodigestor com resíduos alimentícios deverá conter um percentual de sólidos final nos resíduos alimentícios ( $ST_F$ ) de aproximadamente 8%. Para alcance deste valor, deve-se realizar a diluição do substrato com água.

A Massa Total de Alimentação ( $M_T$ ) leva em consideração a massa de matéria orgânica acrescida da água de diluição a servir como fonte energética, calculada pela Equação (5):

$$M_T = \frac{5 \left( \frac{kg}{dia} \right) \times 100}{8(\%)} = 62,5 \left( \frac{kg}{dia} \right)$$

#### 4.2.1.4 Volume de Carga (VC)

O cálculo de volume de carga diária (VC) representa um parâmetro importante no dimensionamento de um biodigestor, pois determina a quantidade alimentada, diariamente, no reator (SILVA, 2019). Ele correlaciona o volume de matéria orgânica ( $V_{MO}$ ) com a quantidade de água de diluição ( $V_{\text{água}}$ ) utilizada para obtenção dos parâmetros ótimos de sólidos totais.

Para obtenção do Volume de água, a Equação (6) será utilizada, descontando a Massa de Resíduos Orgânicos ( $P_d$ ) da Massa Total de Alimentação ( $M_T$ ):

$$M_{\text{água}} = 62,5 \left( \frac{kg}{dia} \right) - 20 \left( \frac{kg}{dia} \right) = 42,5 \left( \frac{kg}{dia} \right)$$

Considerando a densidade da água como aproximadamente 1000kg/m<sup>3</sup>, então:

$$M_{\text{água}} = V_{\text{água}} = 0,0425 \left( \frac{m^3}{dia} \right)$$

Com isso, para cálculo de Volume Total de Carga a partir da Equação (2), tem-se:

$$VC = 0,0465 \left( \frac{m^3}{dia} \right) + 0,0425 \left( \frac{m^3}{dia} \right) = 0,0890 \left( \frac{m^3}{dia} \right)$$

#### 4.2.1.5 Tempo de Retenção Hidráulica (TRH)

Segundo QUEIROZ (2017), o TRH é um fator muito importante no dimensionamento de biodigestor, pois trata-se do tempo necessário, em dias, para os microrganismos realizarem o processo de digestão anaeróbia, com o intuito de forma a digerir todo o substrato. O valor de TRH pode variar substancialmente em diferentes temperaturas está diretamente atrelado a velocidade de crescimento bacteriano. Em climas tropicais o TRH, por exemplo, a variação

costuma ser de 30 a 50 dias, enquanto em climas mais frios ao redor do planeta pode chegar a 100 dias.

A decisão do valor de Tempo de Retenção Hidráulica por SILVA (2019) levou em consideração uma faixa de temperatura de digestão de 20 a 35°C, que segundo SASSE (1998), deverá adotar um valor de TRH acima de 20 dias. Entendendo que a aplicação do biodigestor se dará em região de alta incidência solar em clima tropical e considerando um tempo adicional para as reações adicionais de hidrólise (ROCHA, 2016), instaurou-se o valor de TRH em 34 dias, que será também utilizado neste estudo.

A Tabela 4.4 destaca um resumo de todos os parâmetros calculados na presente seção.

**Tabela 4.4 – Parâmetros calculados para dimensionamento de biodigestor**

Nome do Parâmetro	Sigla	Valor	Unidade
Carga de Sólidos	C <sub>ST</sub>	5	kg/dia
Quantidade de Resíduos Sólidos	P <sub>d</sub>	20	kg/dia
Quantidade de Sólidos Totais em Resíduos Alimentares	ST <sub>I</sub>	25	%
Quantidade ideal de sólidos para a carga	ST <sub>F</sub>	8	%
Tempo de Retenção Hidráulica	TRH	34	dias
Volume de água	V <sub>água</sub>	0,042	m <sup>3</sup> /dia
Volume de carga	VC	0,0890	m <sup>3</sup> /dia
Volume de matéria orgânica	V <sub>MO</sub>	0,0465	m <sup>3</sup> /dia

Fonte: Adaptado de SILVA, 2019.

#### 4.2.2 Dimensionamento do biodigestor e da produção de biogás

A metodologia proposta por QUEIROZ (2017) também será seguida neste tópico. Com isso, correlaciona-se o Tempo de Retenção Hidráulica (TRH) e o Volume de Carga (VC) para encontrar o Volume do Biodigestor a partir da Equação (1):

$$V_{biodigestor} = TRH \times VC = 34(dias) \times 0,0890 \left( \frac{m^3}{dia} \right) = 3,026m^3$$

Considerando possíveis flutuações no Volume de Carga, toma-se como margem de segurança um acréscimo em 10%. Com isso:

$$V_{biodigestor(seguran\c{c}a)} = TRH \times VC = 34(dias) \times 0,0979 \left( \frac{m^3}{dia} \right) = 3,329m^3$$

Ao levar em consideração que houve um acréscimo prévio ao valor de Quantidade de Resíduos Gerada (Pd), o resultado do dimensionamento do biodigestor permanece próximo  $3\text{m}^3$ . Com isto, SILVA (2019) aplicou a proposta de ALMEIDA, FRANÇA e JÚNIOR (2008) para a construção de um biodigestor por volume útil total, que será replicada a seguir.

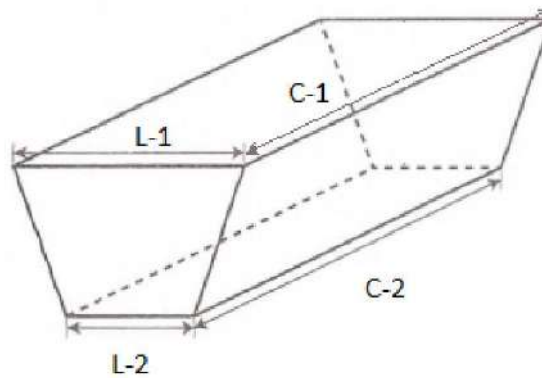
Para  $3\text{m}^3$ , o valor de cada dimensão é explicitado no quadro 4.4:

**Quadro 4.4 – Dimensões de biodigestor recomendadas por volume útil.**

Volume (m <sup>3</sup> )	Profundidade (m)	C-1 (m)	L-1 (m)	C-2 (m)	L-2 (m)
3,0	1,0	3,5	1,2	3,0	0,7

Fonte: Adaptado de ALMEIDA, FRANÇA & JUNIOR, 2008

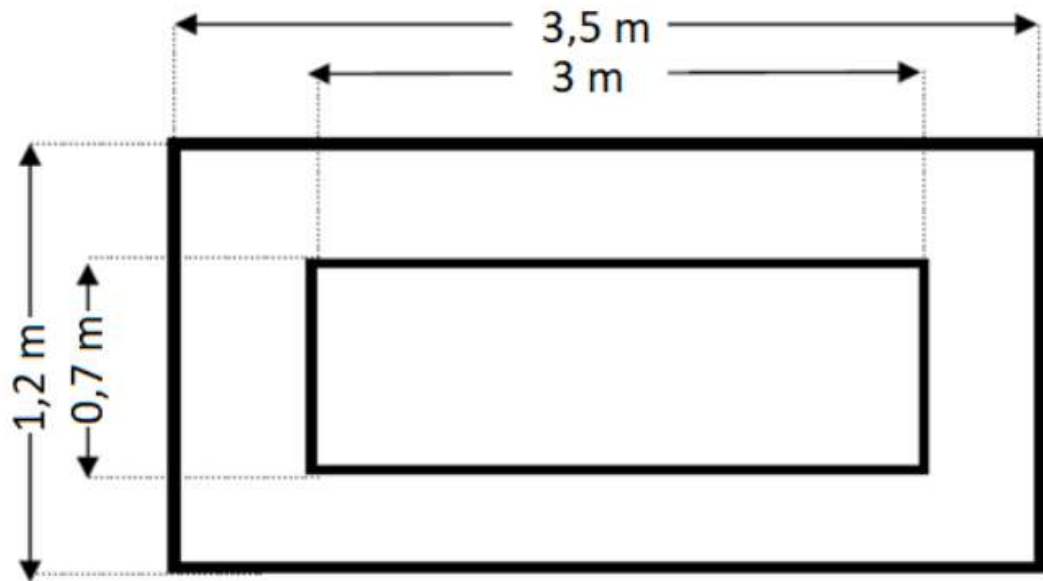
**Figura 4.7 Ilustração de biodigestor dimensionado.**



Fonte: REZENDE, 2017.

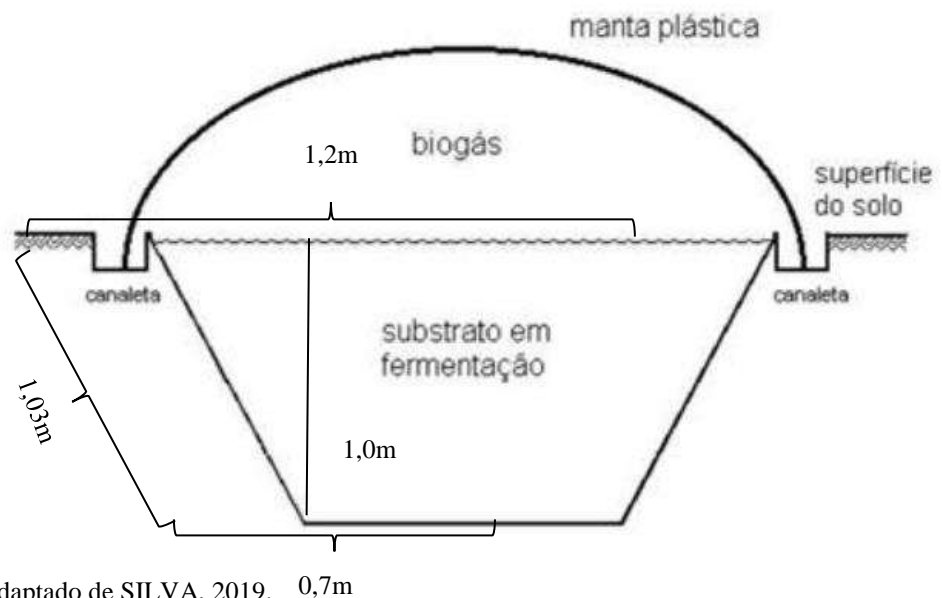
As Figuras 4.8 e 4.9 mostram, respectivamente, as visões de topo da escavação do biodigestor e seu corte da vista frontal.

**Figura 4.8 Ilustração de topo do biodigestor dimensionado.**



Fonte: SILVA, 2019.

**Figura 4.9 Ilustração lateral do biodigestor dimensionado.**



Fonte: Adaptado de SILVA, 2019. 0,7m

Ao estimar de produção de biogás, utilizou-se metodologia proposta por ROCHA (2016), considerando a conversão de sólidos voláteis (SV) em biogás.

A partir de estudos levantados por SILVA (2019), onde foi constatado que o porcentual de sólidos voláteis alimentícios varia na faixa aproximada de 17% a 28%, adotou-se a faixa de trabalho de 23% a partir da média dos valores encontrados na literatura.

Segundo estudos dos mesmos autores, o rendimento de biogás para este tipo de substrato varia entre 0,396 a 0,64 m<sup>3</sup>/kg de SV, sendo 0,4 m<sup>3</sup>/kg de SV um valor comum (SILVA, 2019; FERREIRA, 2015; ZHANG et al., 2013, 2011, 2006).

Assim, a estimativa de produção de biogás segue a equação (7):

$$Estimativa_{biogás} = Pd \left( \frac{kg}{dia} \right) \times \frac{SV(\%)}{100} \times Rendimento \left( \frac{m^3}{kg SV} \right) \quad (7)$$

$$Estimativa_{biogás} = 20 \left( \frac{kg}{dia} \right) \times \frac{23(\%)}{100} \times 0,4 \left( \frac{m^3}{kg SV} \right) = 1,84 \left( \frac{m^3}{dia} \right)$$

A Tabela 4.5 destaca um resumo de todos valores de dimensionamento e estimativa de volume de produção de biogás para o sistema de biodigestão eleito.

**Tabela 4.5 – Valores calculados de dimensionamento e produção de biogás**

Nome do Parâmetro	Valor	Unidade
Volume calculado para o biodigestor	3,026	m <sup>3</sup>
Volume considerado para o biodigestor	3,3329	m <sup>3</sup>
Volume do tanque de alimentação	0,0890	m <sup>3</sup>
Volume diário de biogás	1,84	m <sup>3</sup> /dia
Volume do gasômetro	1,84	m <sup>3</sup>
Largura (inferior e superior)	0,7 e 1,2	m
Comprimento (inferior e superior)	3 e 3,5	m
Altura	1	m

Fonte: Adaptado de SILVA, 2019.

## **5 ESTUDO DE VIABILIDADE DO PROJETO**

### **5.1 INSUMOS PARA IMPLEMENTAÇÃO DO BIODIGESTOR ESCOLHIDO**

Após a realização do dimensionamento do biodigestor, será necessário levantar todos os procedimentos e materiais necessários para a construção do sistema de biodigestão, composto por: (i) caixa de carga; (ii) biodigestor; (iii) caixa de descarga ou reservatório de digestato; (iv) conexões e válvulas.

#### **5.1.1 Caixa de Carga**

A caixa de carga é o módulo de entrada dos resíduos alimentares diluídos ao sistema, por isso deverá conter um volume maior ou igual ao volume de carga diária, levando em consideração sua variação. Com relação ao tipo de reservatório utilizado, recomenda-se um tonel de plástico ou um tanque de concreto com tampa. O uso de tonéis metálicos não é recomendado pois sua exposição ao ambiente e à mistura orgânica possui um potencial altamente corrosivo (OLIVER et al., 2008).

Para o estudo em questão, é requerida uma estrutura com capacidade entre 100 e 200L, cuja disponibilidade comercial é ampla.

#### **5.1.2 Biodigestor**

Para o biodigestor de modelo da Marinha (ou canadense), será necessária a confecção de estrutura de um reservatório, basicamente consistida em formato de tronco de pirâmide, com a base maior ao nível do chão e a base inferior na profundidade previamente dimensionada. Com isso, o primeiro passo é a escavação e nivelamento do terreno nas dimensões estimadas permitindo que o sistema trabalhe com um TRH dentro de uma faixa próxima à estabelecida nos cálculos do capítulo 4.

As tubulações de entrada do substrato e de saída do digestato devem ser instaladas de ambos os lados do reservatório antes da aplicação da impermeabilização do biodigestor, sendo estendidas até as caixas de entrada e saída.

Após o nivelamento da vala, é realizada a aplicação de uma geomembrana de PVC de 0,5 a 0,8mm ancorada no nível do terreno. Esta etapa evita a infiltração dos sólidos dissolvidos no solo. É importante que a geomembrana não esteja totalmente tensionada para que o polímero possa dilatar e contrair de acordo com a variação de temperatura sem que ocorra ruptura em sua estrutura (MARTINS; FILHO, 2020).



As geomembranas quando submetidas a um ambiente de 25°C e submersas por água podem chegar a uma vida útil de até 40 anos o que é uma boa estimativa para o projeto em questão (MARTINS; FILHO, 2020).

Para determinar a quantidade de geomembrana utilizada, é necessário realizar o cálculo da área total da vala, considerando a distância para ancoragem da manta, posteriormente adicionando uma margem de segurança para evitar tensionamento relatado.

O cálculo da área da vala pode ser descrito pela Equação (8):

$$A_{total\ vala} = 2 \times \left( \frac{(L_1 + L_2)}{2} \times h \right) + 2 \times \left( \frac{(C_1 + C_2)}{2} \times h \right) + (L_2 \times C_2) \quad (8)$$

$$A_{total\ vala} = 2 \times \left( \frac{(1,2 + 0,7)}{2} \times 1,0 \right) + 2 \times \left( \frac{(3,5 + 3,0)}{2} \times 1,0 \right) + (0,7 \times 3) = 10,5m^2$$

Ao considerar a distância para ancoragem da manta, determinou-se um acréscimo de 0,3m em L1 e C2. Assim:

$$A_{total\ manta} = 2 \times \left( \frac{(1,5 + 0,7)}{2} \times 1,0 \right) + 2 \times \left( \frac{(3,8 + 3,0)}{2} \times 1,0 \right) + (0,7 \times 3) = 11,1m^2$$

Após adição de 10% para margem de segurança, a Área requerida para manta será de aproximadamente 12,2m<sup>2</sup>, com dimensões aproximadas de 4m de comprimento e 3m de largura.

**Figura 5.1 Exemplo de aplicação de camada de impermeabilização em vala com tubulação instalada.**

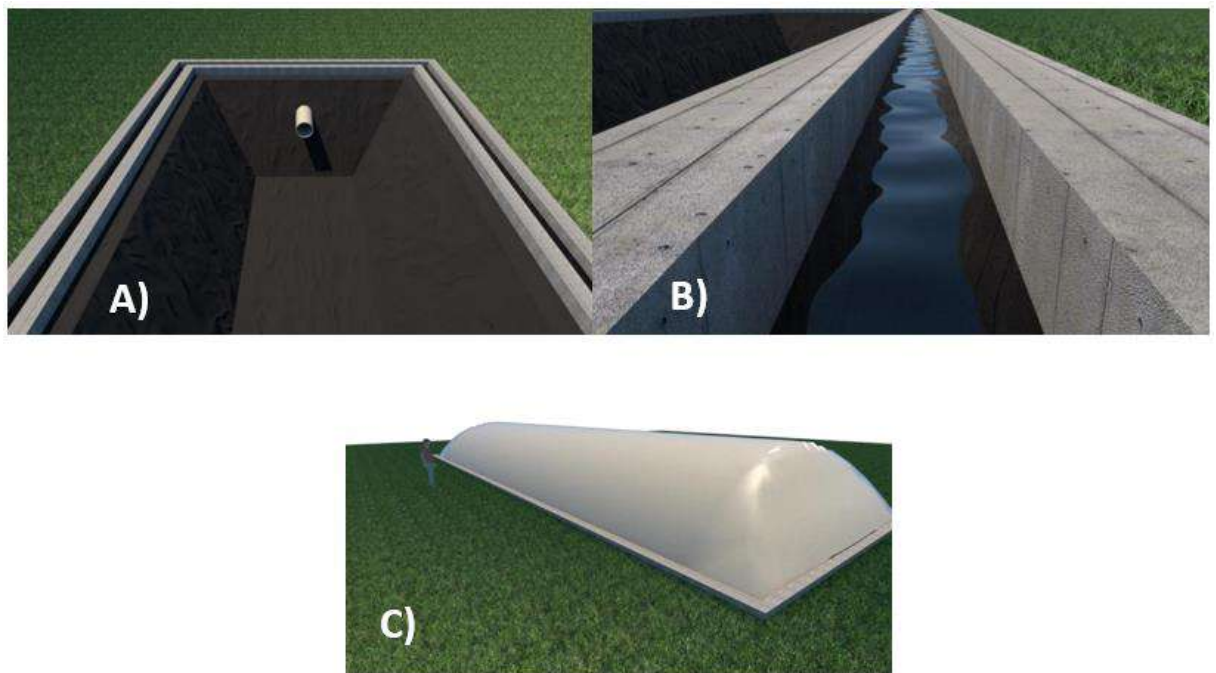


Fonte: Soluções Industriais.

Posteriormente, o sistema deverá ser fechado com uma manta plástica de cobertura em Policloreto de vinila (PVC) ou Polietileno de Alta Densidade (PEAD) com 1,0mm de espessura. Este material, cujo tempo de vida útil é 5 anos, em média, é o mais sensível do sistema por funcionar como reservatório do biogás produzido, por isso deverá ser cuidadosamente escolhido para resistir a fenômenos naturais e ter manutenção periódica (DE MATOS; DOS SANTOS; BATISTA, 2017).

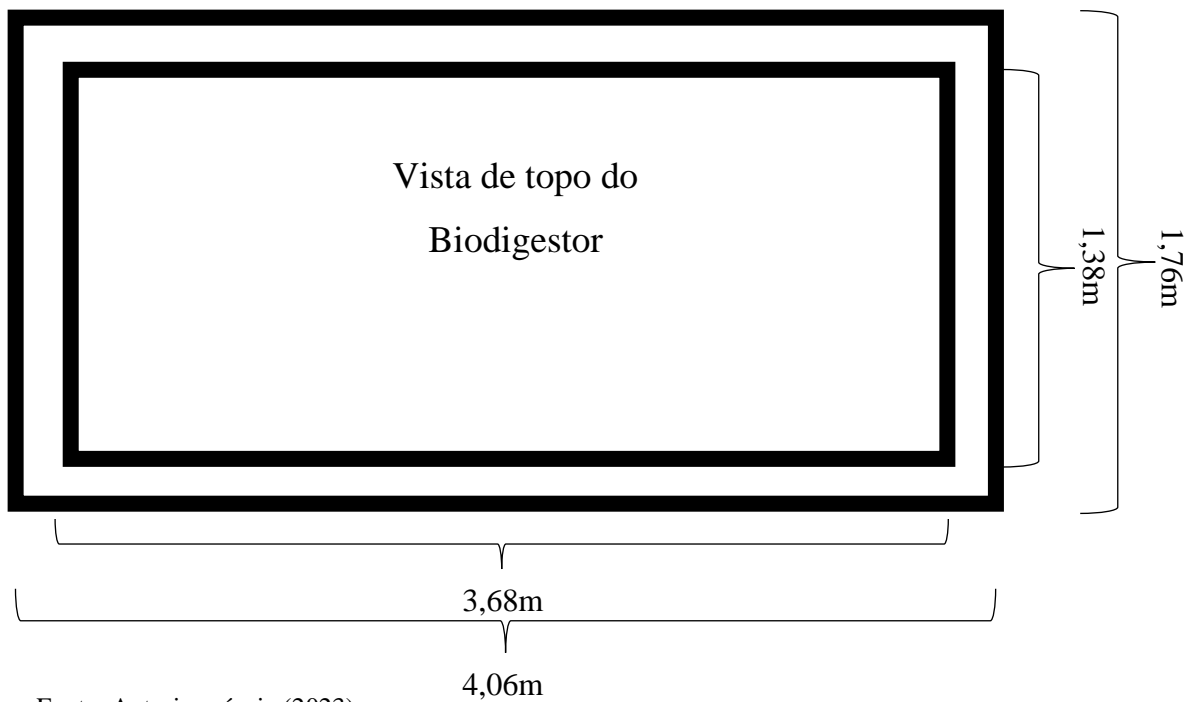
Para que ela seja propriamente selada, é necessário a instalação de uma estrutura onde a membrana do gasômetro é fixada. Essa estrutura consiste em uma canaleta de concreto por toda a volta do biodigestor, onde a geomembrana do gasômetro é presa ao fundo da canaleta e uma coluna d'água de cerca de 15 cm de altura é adicionada para garantir a estanqueidade do sistema e evitar que haja vazamento de gás (MARTINS; FILHO, 2020).

**Figura 5.2 Ilustração digital de canaleta de concreto e sistema fechado com membrana de cobertura em Policloreto de vinil fixada. (A) Vista frontal, (B) Vista aproximada da canaleta e (C) Vista do biodigestor revestido com manta de cobertura.**



Para a construção da canaleta, serão utilizados tijolos de concreto dispostos em duas fileiras com uma distância de aproximadamente 10cm para inclusão da coluna d'água. Tendo um tijolo de concreto medidas de 9x19x39cm, o comprimento e largura de cada fileira, bem como a quantidade estimada de material necessário para construção são ilustrados, respectivamente nas Figuras 5.3 e 5.4.

**Figura 5.3 Vista de topo contendo dimensões para canaleta.**



Fonte: Autoria própria (2023).

**Figura 5.4 Vista de topo contendo número estimado de tijolos para canaleta.**



Fonte: Autoria própria (2023).

11

A base da canaleta poderá ser impermeabilizada por massa de concreto de espessura desprezível, feita com uma mistura de cimento, areia, cascalhos de pedra e água. Após o concreto secar, será possível adicionar a coluna d'água.

A determinação da quantidade necessária da manta de cobertura segue a metodologia de Martins e Filho (2020), onde leva-se em conta o cálculo da seção transversal (TS, do inglês, *Transverse Section*) da lona, aproximando-a a um semicírculo de 140° de mesmo diâmetro (D) do biodigestor, cujo valor é 1,2m.

Utilizando a Equação (9) pode-se encontrar o comprimento de arco da seção de corte da lona.

$$TS = D * \pi * \left(\frac{140}{360}\right) \quad (9)$$

$$TS = 1,2 * \pi * \left(\frac{140}{360}\right) = 1,47m$$

Às dimensões finais da lona de cobertura, determinou-se uma folga para fixação nas laterais de 0,5m.

Assim, as dimensões da manta de cobertura serão 2,47m de largura e 4,5m de comprimento. Comercialmente, os valores representam uma membrana retangular 4,5 x 2,5m, com área de 11,25m<sup>2</sup>.

Pode-se realizar o cálculo da quantidade total de gás armazenado a partir da Equação (10), que calcula a área aproximada do gasômetro:

$$\text{Área}_{\text{seção transversal}} = \left( \pi \times \left( \frac{D}{2} \right)^2 \times \frac{140}{360} \right) = 0,44m^2 \quad (10)$$

Multiplicando a Área da seção transversal pelo comprimento da membrana de cobertura, tem-se o volume aproximado de biogás armazenado de 1,98m<sup>3</sup>.

### 5.1.3 Caixa de Saída

A caixa de saída será dimensionada com volume igual a três vezes o volume da caixa de entrada, a fim de conseguir conter possíveis acúmulos de digestato, que contém alto potencial para uso como biofertilizante (DE MATOS; DOS SANTOS; BATISTA, 2017). Recomenda-se uso de caixa de alvernaria ou fibra para armazenamento do digestado.

Admitindo a faixa de volume para a caixa de entrada, a caixa de saída deverá conter capacidade na faixa entre 300 a 600L.

### 5.1.4 Conexões e Válvulas

Com o objetivo de realizar a conexões entre os módulos de Entrada, Biodigestão e Saída, recomenda-se o uso de Tubulação e Conexões de PVC 150mm para garantir circulação de entrada dos resíduos alimentares bem como a saída do digestato.

Para a condução do gás, recomenda-se Tubulação e Conexões de PVC 40mm ou Tubos de Polietileno reticulado (PEX Multicamadas), por apresentarem baixo custo, alta resistência e fácil instalação. Além disso, conexões podem ser adicionadas para garantia da estanqueidade e entre os pontos de consumo e a tubulação (MARTINS; FILHO, 2020; REZENDE, 2017).

Por último, a instalação de válvula de segurança pode ser um adicional a agregar valor ao projeto quando localizado no gasômetro do biodigestor, permitindo o monitoramento e controle da pressão ótima de trabalho.

## 5.2 MODELO DE CÁLCULO DE VIABILIDADE ECONÔMICA

A etapa prévia da avaliação de Viabilidade Econômica é realizar o levantamento de custos e receitas, construindo o fluxo de caixa do projeto ao longo do tempo.

Para a definição do modelo de Viabilidade Econômica da implementação do biodigestor canadense serão seguidos três critérios econômicos escolhidos: *Payback*, VPL e TIR.

### 5.2.1 Payback

Métrica que relaciona o tempo de retorno do capital investido. É a correlação entre os custos de investimento na tecnologia e o lucro obtido a partir do tipo de geração a ser analisado. O *Payback* é utilizado de forma preliminar. Estipula-se um período máximo em que os fluxos de caixa devem cobrir o investimento inicial, caso seja maior que esse período estabelecido, o projeto não deve ser aceito (BRUNI; FAMÁ; SIQUEIRA, 1998).

### 5.2.2 Valor Presente Líquido

O Valor Presente líquido (VPL) é a diferença entre os fluxos de caixa futuros trazidos a valor presente pelo custo de oportunidade do capital e o investimento inicial (BRUNI; FAMÁ; SIQUEIRA, 1998). Se positivo indica que o capital investido será recuperado, remunerado na taxa de juros que mede o custo de capital de projeto; caso ele seja negativo o projeto é considerado economicamente inviável. O VPL depende do valor de uma métrica chamada Taxa Mínima de Atratividade (TMA), que é a taxa que representa o mínimo que um investimento deve remunerar para que seja considerado viável economicamente. Esta taxa costuma ser definida pelo mercado investidor porém aqui será considerado o valor de 10% anual para fins de simulação.

A presente métrica é calculada a partir da equação (11):

$$VPL = \sum_{n=1}^{n=N} \frac{F_c t}{(1+i)^n} \quad (11)$$

Onde:

- VPL = Valor Presente Líquido
- Fc = Fluxo de Caixa
- t = período de tempo do levantamento do fluxo de caixa
- i = Taxa Mínima de Atratividade – TMA (ou Taxa de Desconto)
- n = período de tempo total (em anos ou meses)

### **5.2.3 Taxa Interna de Retorno**

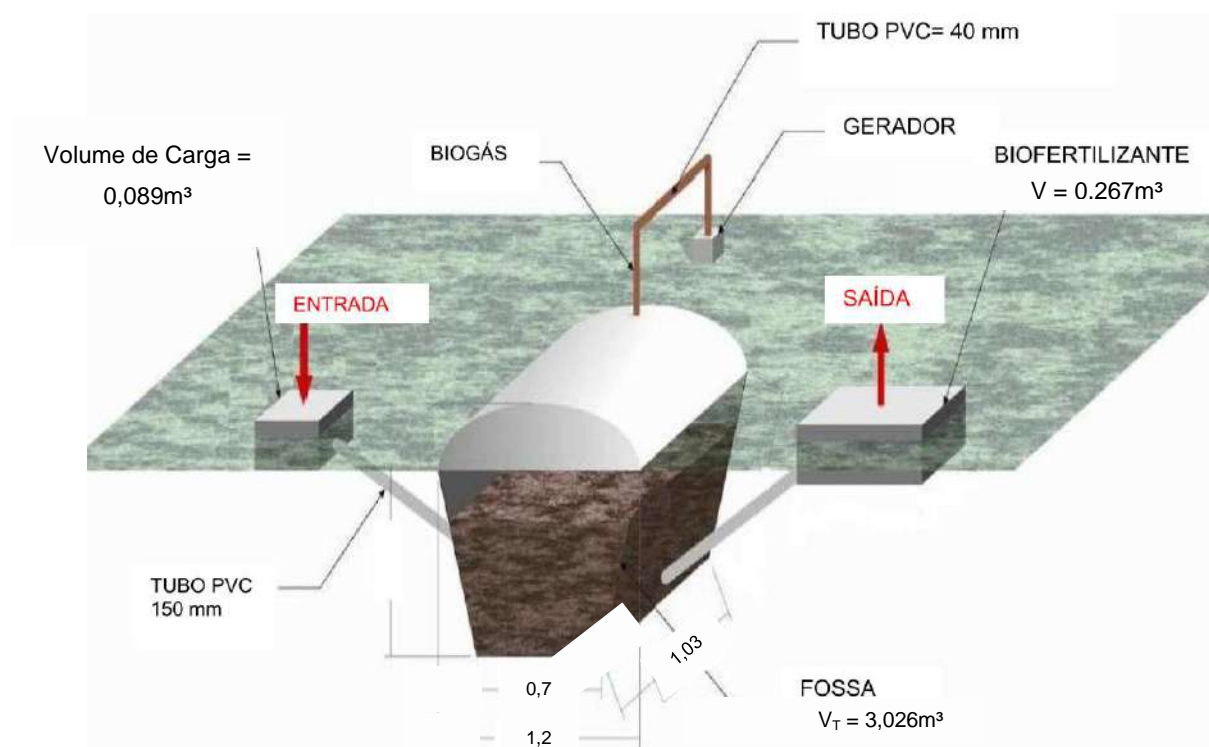
A Taxa Interna de Retorno (TIR) representa o valor do custo de capital que torna o VPL nulo, sendo então uma taxa que remunera o valor investido no projeto (BRUNI; FAMÁ; SIQUEIRA, 1998).

Ela representa uma métrica adicional de tomada de decisão, diretamente atrelada ao VPL, onde se a TIR for maior que a taxa mínima de atratividade (TMA), o investimento no projeto deverá ser realizado, pois gerará valor. Caso seja menor do que a taxa mínima de atratividade, o investimento não deverá ser realizado.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 6.1 ilustra o sistema de biodigestão projetado. A partir do levantamento dos materiais e dimensionamento de cada módulo do sistema, é possível realizar o cálculo da quantidade de material utilizado na implementação bem como estimar o custo total para garantir insumos para a análise de viabilidade econômica, validando as análises realizadas no escopo do presente projeto.

**Figura 6.1 Sistema de biodigestão dimensionado.**



Fonte: Adaptado de (DE MATOS; DOS SANTOS; BATISTA, 2017).

### 6.1 QUANTIDADES E CUSTO TOTAL

Após o cálculo da quantidade necessária de cada material para construção do sistema de biodigestão, realizou-se uma pesquisa online de cada produto com suas especificações detalhadas. O levantamento foi feito em triplicata com lojas localizadas em território nacional, sendo o Valor Unitário exposto na Tabela 6.1 fruto da média dos preços de venda dos produtos disponíveis. Pode-se citar lojas de materiais de construção e produtos agrícola, como Cikala®, Leroy Merlin® e Obramax®.

Foram estimados 3 dias para realização do trabalho de mão de obra, além de considerar um acréscimo de 10% no valor total para despesas não contabilizadas.



**Tabela 6.1 – Detalhamento de materiais receita total para implementação do sistema de biodigestão.**

Módulo	Material	Tamanho requerido	Unidade de venda	Quantidade	Valor unitário	Valor Total
Caixa de entrada	Tonel de PEAD	200L	L	1	R\$307,62	R\$307,62
Sistema de biodigestão	Tubo PVC 150mm	6m	3m	2	R\$116,40	R\$232,80
Sistema de biodigestão	Joelho PVC 40mm	-	-	3	R\$8,65	R\$25,90
Sistema de biodigestão	Mão de obra	-	-	3	R\$200,00	R\$600,00
Biodigestor	Tubo PVC soldável marrom 40mm	30m	6m	5	R\$81,13	R\$405,65
Biodigestor	Geomembrana PVC 0,8mm	4x3m	Unitário	1	R\$362,80	R\$362,80
Biodigestor	Membrana de cobertura em PVC 1,0mm	4,5x2,5m	m <sup>2</sup>	11,25	R\$36,15	R\$406,70
Biodigestor	Válvula reguladora de gás	-	Unitário	1	R\$39,30	R\$39,30
Biodigestor	Blocos de concreto 9x19x39cm	-	Unitário	60	R\$3,14	R\$188,20
Biodigestor	Cimento	-	50kg	1	R\$34,60	R\$34,60
Biodigestor	Areia	-	Saco de 20kg	9	R\$4,85	R\$43,65
Biogiestor	Pedras em cascalho	-	Saco de 20kg	10	R\$4,64	R\$46,40
Caixa de saída	Fossa septica em Polietileno	600L	L	1	R\$416,00	R\$416,00
<b>Receita Total</b>					<b>R\$ 3109,62</b>	
<b>Receita Total + 10%</b>					<b>R\$ 3420,58</b>	

Fonte: Autoria própria (2023).

A depreciação da geomembrana e da manta de cobertura foram ser levadas em conta pois elas determinam a necessidade de manutenção ou troca do biodigestor em execução. Considerando o tempo de vida estimada de ambas as membramas, utiliza-se a Equação (12) para cálculo da depreciação anual, expostos na Tabela 6.2:

$$Depreciação_{ano} = \frac{1}{VUE} \quad (12)$$

Onde:

- VUE = Vida útil estimada do material/equipamento.

Assim,

**Tabela 6.2 – Depreciação Anual de Materiais do sistema de biodigestão.**

Material	VUE (anos)	Valor	Depreciação a.a.(%)	Depreciação a.a.(R\$)
Geomembrana PVC 0,8mm	40	R\$362,80	2,5%	R\$9,07
Membrana de cobertura em PVC 1,0mm	5	R\$406,70	20%	R\$81,34
<b>Total</b>				<b>R\$90,41</b>

Fonte: Adaptado de (MARTINS; FILHO, 2020)

## 6.2 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

O Fluxo de Caixa será montado considerando os custos totais no investimento de implementação do sistema de biodigestão e assumindo como receita o valor médio de economia nos gastos do serviço de gás na Escola Integral Solar Meninos de Luz. Em outras palavras, a economia monetária no consumo de gás custeará, num primeiro momento, o investimento de instalação do biodigestor.

Acolhendo como base de cálculo a cobrança por metragem cúbica em imóveis residenciais pela prestadora de serviços de gás encanado Naturgy®, estima-se que o consumo médio de 275m<sup>3</sup> gerará uma conta no valor de R\$3.345,06.

Assumindo que a produção diária de biogás de 1,84m<sup>3</sup> será integralmente direcionada para a redução do uso de gás encanado, estima-se que este consumo caia de 275m<sup>3</sup> para 220m<sup>3</sup>, gerando uma economia mensal de cerca de R\$670,00.

É importante frisar que, sendo o Tempo de Retenção Hidráulica de 34 dias, entende-se que a economia de gás só começará a ser aproveitada a partir do mês subsequente à instalação do biodigestor.

**Tabela 6.3 Resultados da Análise de Viabilidade Econômica calculada via Excel®.**

ENTRADAS E SAÍDAS			SIMPLES				DESCONTADO		
Mês	Custos	Retorno	Fluxo de Caixa	Saldo	TIR	Fluxo de Caixa	Saldo	TIR	
0	-R\$ 3.420,58	R\$ -	-R\$ 3.420,58	-R\$ 3.420,58	-	R\$ 3.420,58	-R\$ 3.420,58	-	
1	R\$ -	R\$ 670,00	R\$ 670,00	-R\$ 2.750,58	80%	R\$ 664,46	-R\$ 2.756,12	81%	
2	R\$ -	R\$ 670,00	R\$ 670,00	-R\$ 2.080,58	45%	R\$ 658,97	-R\$ 2.097,15	45%	
3	R\$ -	R\$ 670,00	R\$ 670,00	-R\$ 1.410,58	23%	R\$ 653,53	-R\$ 1.443,62	23%	
4	R\$ -	R\$ 670,00	R\$ 670,00	-R\$ 740,58	-9%	R\$ 648,12	-R\$ 795,50	10%	
5	R\$ -	R\$ 670,00	R\$ 670,00	-R\$ 70,58	-1%	R\$ 642,77	-R\$ 152,73	-2%	
6	R\$ -	R\$ 670,00	R\$ 670,00	R\$ 599,42	5%	R\$ 637,46	R\$ 484,73	4%	
7	R\$ -	R\$ 670,00	R\$ 670,00	R\$ 1.269,42	9%	R\$ 632,19	R\$ 1.116,92	8%	
8	R\$ -	R\$ 670,00	R\$ 670,00	R\$ 1.939,42	11%	R\$ 626,96	R\$ 1.743,88	10%	
9	R\$ -	R\$ 670,00	R\$ 670,00	R\$ 2.609,42	13%	R\$ 621,78	R\$ 2.365,66	12%	
10	R\$ -	R\$ 670,00	R\$ 670,00	R\$ 3.279,42	15%	R\$ 616,64	R\$ 2.982,30	14%	
11	R\$ -	R\$ 670,00	R\$ 670,00	R\$ 3.949,42	16%	R\$ 611,55	R\$ 3.593,85	15%	
TMA Anual	<b>10%</b>		TIR (Simples)	<b>16%</b>		TIR (Descontado)	<b>15%</b>		
TMA Mensal	<b>0,8%</b>		Payback simples (Meses)	<b>5,11</b>		Payback descontado (Meses)	<b>5,23</b>		
VP Entradas	<b>R\$ 7.014,43</b>								
VPL	<b>R\$ 3.593,85</b>								

Fonte: Autoria própria (2023).

O resultados foram inteiramente calculados em Excel®, onde foi observado que o fluxo de caixa mensal apresentava um retorno satisfatório a ponto de não haver necessidade de uma análise anual.

É possível verificar também que todas as métricas de mensuração de viabilidade econômica mostraram valores favoráveis ao prosseguimento do projeto de implementação do biodigestor:

- O Valor Presente Líquido após 12 meses apresentou o valor de R\$3.593,85, positivo e maior que o investimento inicial, de R\$3.420,58. O projeto não seria viável caso este valor fosse negativo;
- A Taxa Interna de Retorno é superior ao valor da Taxa Mínima de Atratividade, cujos valores representam 16% e 10%, respectivamente, indicando que o projeto compensa o investimento recebido;
- O valor de *Payback* é inferior a 6 meses, indicando um fluxo de caixa positivo em menos de 1 semestre após o início de atuação do biodigestor. No caso da Escola Solar Meninos de Luz, após o tempo de *Payback*, haverá um impacto positivo em seu caixa pela economia direta com gasto de gás encanado.

Foram estimados cenários envolvendo de *Payback* simples e com desconto, onde a TMA mensal é diretamente aplicada no Fluxo de Caixa. Apesar do percentual de TIR ser menor e do valor de *Payback* ser maior, indicando uma tímida adição de tempo para o projeto se pagar, ele continua sendo quase que igualmente viável economicamente.

## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 7.1 CONCLUSÕES

A necessidade de realizar uma ação de redução de custos em uma Instituição como a Solar Meninos de Luz, cujo propósito há quase 40 anos é transformar positivamente a vida dos moradores do complexo Cantagalo-Pavão-Pavãozinho, proporciona meios para que o trabalho realizado possa impactar ainda mais pessoas.

A partir do estudo de caso, é possível concluir que tecnicamente a implementação de um biodigestor diretamente na comunidade é inviável. Isto é justificado pela deficiência na gestão de resíduos sólidos, somada ao pouco espaço disponível dentro da comunidade e ao fato de não haver nenhum sistema de tubulação para distribuição do biogás aos moradores, visto que praticamente todos os estabelecimentos residenciais utilizam gás em butijões.

Ao restringir o espaço de estudo à Escola Solar Meninos de Luz, é possível encontrar algumas restrições que inviabilizam a implementação imediata do biodigestor:

- O espaço mais promissor para a instalação do biodigestor canadense não é próprio da instituição, havendo uma proibição de qualquer alteração física do local;
- As margens de segurança para funcionamento do biodigestor, que deverá ter uma distância de 15m de edificações, restringem sua localização a um espaço de interesse da Instituição. A longo prazo, existe a possibilidade de construção de um prédio neste terreno de forma a dobrar a capacidade da Escola de absorção de novos alunos.

Contudo, existem outros diversos panoramas que viabilizam tecnicamente o uso de um biodigestor:

- Existe coleta seletiva interna na Escola, permitindo acesso direto a resíduos orgânicos como substrato;
- O dimensionamento do biodigestor concluiu que ele não necessita de uma extensa área de ocupação direta.

Além disto, o projeto se provou viável economicamente por ter baixo custo de implementação, proporcionar satisfatória economia no consumo total de gás encanado e, conseqüentemente, um retorno rápido de investimento comprovado através das métricas de *Payback*, TIR e VPL.

É importante frisar que, apesar de uma satisfatória viabilidade econômica, alguns parâmetros foram de natureza teórica ou levantados a partir de considerações, devido a dificuldade na coleta de algumas informações. Com isso, no próximo tópico serão pontuadas algumas recomendações para trabalhos complementares a este realizado.

## 7.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se, a seguir, algumas ações que deverão otimizar os resultados obtidos neste trabalho e promover uma maior segurança nas conclusões apresentadas.

Para que o cálculo de dimensionamento do biodigestor seja mais preciso, faz-se necessário analisar a natureza dos resíduos alimentares gerados pela Escola. Idealmente, obter dados como o total de resíduos gerados diariamente, sua massa específica bem como outras características físico-químicas.

Além disto, para se ter uma maior precisão com relação ao percentual de obtenção de biogás, é recomendada a realização em amostras de resíduos alimentares o de Potencial Bioquímico de Metano, BMP, que mensura a capacidade de geração de metano em amostras.

Propondo otimizar o aproveitamento do biogás e aumentar a segurança, recomenda-se realizar um estudo a respeito do envasamento do produto gasoso do sistema de biodigestão, de forma a evitar perdas em caso de vazamento ou manutenção.

Dado todo sistema de digestão aplicado, a comercialização do biofertilizante gerado como um dos produtos finais poderá ser outro meio gerador de receita para a Escola. Entretanto, para isto ser possível é necessário realizar um estudo da composição e volume do biofertilizante gerado para entendimento da viabilidade de comercialização.

## 8 REFERÊNCIAS

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2022**. [s.l.: s.n.].

ÁGUAS CLARAS, 2017. **Reator UASB: o que é, como funciona, suas vantagens e desvantagens**. Águas Claras. Disponível em: <<https://aguasclarasengenharia.com.br/como-funciona-reator-uasb/>> Acesso em 16 Jun. 2023.

ALCÂNTARA, P. B. (2007). **Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados**. Tese de Doutorado – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife/PE.

ALMEIDA, B. D. **Gerenciamento de Resíduos Sólidos em Comunidade de Baixa Renda**. [s.l.] Universidade Federal Fluminense, 2019.

ALVES, E. E. N. **Biodigestores : construção , operação e usos do biogás e do biofertilizante visando a sustentabilidade das propriedades rurais**. n. Maio, 2014.

ASSUNÇÃO, L. DA R. C. **GESTÃO TECNOLÓGICA E INOVAÇÃO SOCIAL: Roadmap tecnológico do biometano e análise das incertezas da produção de biometano a partir de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro: UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2022.

AZEVEDO SILVA, G. **ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE BIOGÁS NO ATERRO SANITÁRIO METROPOLITANO DE JOÃO PESSOA ATRAVÉS DO TESTE BMP**. João Pessoa: [s.n.].

BARROS, T.D. **Biodigestores – Tubular**. Embrapa, 2021. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agroenergia/residuos/biogas/biodigestores/tubular>> Acesso em: 16 Jun. 2023.

BEZERRA, G.P.F. **AVALIAÇÃO DE DIFERENTES MODELOS DE BIODIGESTORES PARA TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS GERADOS NO**

**RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO DA UFPB** 63, Paraíba, 2016.

BRUNI, A. L.; FAMÁ, R.; SIQUEIRA, J. d. O. **Análise do risco na avaliação de projetos de investimento: uma aplicação do método de monte carlo.** Caderno de pesquisas em Administração, v. 1, n. 6, p. 1, 1998. 31, 33

BOSTON CONSULTING GROUP. **Closing the Wood Waste Gap.** BCG, 2023. Disponível em: <<https://www.bcg.com/featured-insights/closing-the-gap/food-waste>> Acesso em 23 março 2023.

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

CORRÊA, A. G. et al. **Influência da Temperatura na produção de biogás através da codigestão anaeróbia de resíduos orgânicos alimentares e industriais.** 3º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade, Universidade Federal de Pelotas, 2020.

DA SILVA, J. M. **Plataformas Digitais no combate ao desperdício de alimentos: principais modelos de negócio, arquétipos e desafios.** Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

DE MATOS, C. A.; DOS SANTOS, N. R.; BATISTA, T. P. N. **ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE UM BIODIGESTOR NA FAZENDA BOA VISTA NO MUNICÍPIO DE CARAÍ - MG.** [s.l.] Faculdades Unificadas de Teófilo Otoni, 2017.

DE MOURA, J.P. **Fundamentos de Implantação de Biodigestores em Propriedades Rurais.** Revista Educação Ambiental em Ação, Universidade Federal de Pernambuco, 2012.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from Waste and Renewable Resources - An Introduction.** 2nd. ed. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010.

DEGANUTTI, Roberto, PALHACI, Maria do Carmo Jampaulo Plácido, ROSSI, Marco et al. **Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada.** In: ENCONTRO DE ENERGIA



NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. Disponível em: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022002000100031&lng=en&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000100031&lng=en&nrm=abn)>. Acesso em: 17 Jun. 2023.

DEGANUTTI, ROBERTO, D. et al. **BIODIGESTORES RURAIS: MODELO INDIANO, CHINÊS E BATELADA**. Scielo, 2002.

DE LIMA, A.A.; SCAL, M.L.W. **Produção de energia a partir do biogás obtido pela biodigestão de resíduos sólidos domiciliares**. Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

DOS SANTOS, G.M.D. **Análise e Perspectivas de alternativas de destinação dos Resíduos Sólidos Urbanos: o caso da incineração e da disposição em aterros**. COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

Embrapa. **Brasil e Suécia ampliam parceria para diminuir desperdício de alimentos. Maceió, Alagoas, 2020**. Disponível em <[https://www.embrapa.br/agropensa/parcerias/busca-de-noticias/-/noticia/57279220/brasil-e-suecia-ampliam-parceria-para-diminuir-desperdicio-de-alimentos?p\\_auth=C2yNkeXF](https://www.embrapa.br/agropensa/parcerias/busca-de-noticias/-/noticia/57279220/brasil-e-suecia-ampliam-parceria-para-diminuir-desperdicio-de-alimentos?p_auth=C2yNkeXF)> Acesso em 24 março 2023.

FAO. **The State of Food and Agriculture 2019. Moving forward on food loss and waste reduction**. Rome, 2019.

FAO. **The State of Food Insecurity in the World 2013. The multiple dimensions of food security**. Rome, 2013.

FERREIRA, B. O. **Estratégias Operacionais para o Incremento da Metanização em Estado Sólido de Resíduos Orgânicos Urbanos com Vistas ao Aproveitamento Energético do Biogás**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2019.

GONÇALVES, G. L. F. **BIODIGESTORES: UMA ALTERNATIVA PARA REDUZIR A CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS PELO ESGOTO**. [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

GRANDO, R. L. **Mapeamento tecnológico da cadeia produtiva do biogás.** [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

HOCKENOS, Paul. **Waste to Energy – Controversial power generation by incineration.** Clean Energy Wire, 2021. Disponível em: <<https://www.cleanenergywire.org/factsheets/waste-energy-controversial-power-generation-incineration>> Acesso em 17 jun. 2023.

KUNZ, A.; PERDOMO, C. C.; OLIVEIRA, P. A. V. **Biodigestores: Avanços e Retrocessos.** Embrapa Aves e Suínos, 2004.

KUNZ, A. **Energias Renováveis: Processos de biodigestão.** Embrapa, 2017. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/documents/1355242/0/Curso-Dia0310-1.pdf>> Acesso em 16 Jun. 2023.

LIMA, A.C.G., PASSAMANI, F.C., 2012. **AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS PRODUZIDO NO REATOR UASB DA ETE-UFES 106**  
MAIA, D. R. DA S. **DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DE BIODIGESTORES ANAERÓBIOS COM SISTEMA DE CONTROLE, MONITORAMENTO E AUTOMAÇÃO PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS.** Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

MARTINS, P. P. G. L.; FILHO, E. J. B. L. **Viabilidade econômica de um biodigestor em uma propriedade rural no município de Leopoldina (MG).** [s.l.] Universidade Federal Fluminense, 2020.

MOURA *et al.* **Processos para produção de Biometano.** Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

NAZARO, M.S. **Trabalho de Conclusão de Curso 105,** 2016.

OLIVEIRA, A. **A importância da descontaminação do solo a saúde.** 2020. Disponível em <<https://www.linkedin.com/pulse/import%C3%A2ncia-da->

descontamina% C3%A7%C3%A3o-do-solo-sa% C3%BAde-alexandre-oliveira-  
le/?originalSubdomain=pt> Acesso em: 28 Abril 2023.

OLIVER, A. d. P. M. et al. **Manual de treinamento em biodigestão**. Instituto de Estudos Del Hambre. Bahia, p. 23, 2008. 23, 24, 25, 35

PIGOSSO, A. et al. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2019.

PRATES, L. et al. **GERMAN EXPERIENCE WITH MECHANICAL BIOLOGICAL TREATMENT**. Fórum Internacional de Resíduos Sólidos, p. 10, 2016.

PROBIOGÁS. **Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil: substratos, digestores e uso de biogás**. 1ª. ed. Brasília: Ministério das Cidades, 2015.

QUEIROZ, I.P. **Avaliação Das Formas de Tratamento De Resíduos da Bovinocultura Leiteira Visando O Dimensionamento De Um Biodigestor** , p.74, 2017.

REZENDE, B. X. **Estudo Da Viabilidade Da Utilização De Biomassa Para Geração De Energia Elétrica**. [s.l.] Univesidade Federal de Ouro Preto, 2017.

ROCHA, C.M. da. **PROPOSTA DE IMPLANTAÇÃO DE UM BIODIGESTOR ANAERÓBIO DE RESÍDUOS ALIMENTARES**, 2016.

RODRIGUES, A.D.T., Arroyo, P.A., Botton, J.P., Samek, R., Zank, J.C.C. **OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM BIODIGESTORES COM A ADIÇÃO EM LABORATÓRIO DE RESÍDUO SÓLIDO ORGÂNICO E EFLUENTE LÍQUIDO**, 8, 2014.

RODRIGUES, L.S., Silva, I.J. da, Zocrato, M.C. de O., Papa, D.N., Sperling, M.V., Oliveira, P.R. de. **Avaliação de desempenho de reator UASB no tratamento de águas residuárias de suinocultura**. Rev. Bras. Eng. Agríc. E Ambient. 14, p.94–100 , 2010. Disponível em:<<https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000100013>>, Acesso em 15 de Jun. 2023.

SILVA, G. A. **Estimativa da geração de biogás no aterro sanitário metropolitano de João Pessoa através do Teste BMP.** Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012.

SILVA, G. M. **Estudo de caso e avaliação da aplicação de biodigestor em escola de tempo integral em comunidade carente no Rio de Janeiro.** Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

SNIS. **Sistema Nacional de informações sobre Saneamento.** Painel de informações sobre saneamento. 2019. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/snis/painel>> Acesso em 17 jun. 2023.

TABATABAEI, M.; GHANAVATI, H. **Biogas: Fundamentals, Process, and Operation.** Cham: Springer International Publishing AG, 2018.

TOMASINI, M. C. **PRODUÇÃO SEQUENCIAL DE HIDROGÊNIO E METANO VIA DIGESTÃO ANAERÓBIA A PARTIR DA FRAÇÃO HEMICELULÓSICA DA PALHA DE CANA-DE- AÇÚCAR.** [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2020.

VIEIRA, G.M. **Desenvolvimento de Ferramenta para Simulação Anaeróbia de RSU.** Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

ZANDONADI, H. S.; MAURÍCIO, A. A. **Avaliação do índice de restrição, de refeições consumidas por trabalhadores da construção civil no município de Cuiabá, MT.** Revista Higiene Alimentar, v. 26, n. 206/207, p. 64-70, 2012.

ZHANG, C.; SU, H.; BAEYENS, J.; TAN, T. **Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 38, p. 383-392, 2014.

## APÊNDICE A – Visita à Escola Solar Meninos de Luz

Em uma manhã do dia 04 de Julho de 2023, foi realizada uma visita à Escola Solar Meninos de Luz, que fica localizada na Rua Saint Roman, 194, no complexo do Cantagalo-Pavão-Pavãozinho.

Com a recepção da presidente da Instituição, Isabella Maltarollo, ocorreu uma visita guiada às cinco instalações, que apresentam as seguintes divisões:

Lado par da Rua Saint Roman:

Instalação 1:

- Ensino médio (3 turmas);
- Salas administrativas;
- Pátio externo.

Lado ímpar da Rua Saint Roman:

Instalação 2:

- Ensino Fundamental I;
- Sala de música;
- Laboratório de Informática;
- Sala de dança;
- Quadra do Pavão-Pavãozinho (aberta à comunidade);
- Sala de línguas.

Instalação 3:

- Berçário;
- Maternal;
- Cozinha.

Instalação 4:

- Ensino Fundamental II;
- Horta;
- Composteira.

Instalação 5:

- Auditório;
- Espaço para teatro;
- Espaço para yoga e meditação.

Além de detalhar os projetos em execução, muitos deles em parceria com outras instituições e pessoas físicas, Isabella também detalhou o propósito da Solar Meninos de Luz, que surgiu há quase 40 anos com o objetivo de promover assistência às famílias de uma tragédia envolvendo o desabamento de casas dentro da comunidade.

Durante a conversa, foi relatado pela diretora que o levantamento do número de moradores realizado pelo IBGE provavelmente apresenta distorções e que o número total, segundo a Associação de Moradores Pavão-Pavãozinho e a Clínica da Família local, é cerca de 3 vezes maior do que o divulgado no último Censo (2010). Segundo ela, atualmente o complexo de comunidades vem sofrendo um crescimento vertical, com o aumento de construções irregulares e retorno de ex-moradores que foram impactados por obras do PAC na última década.

A escola, atualmente, atende 426 alunos com idades variando de 3 meses a 18 anos, e conta com um quadro de 155 funcionários, com contratos firmados via CLT e MEI. O critério de seleção dos alunos se dá por meio de avaliação de vulnerabilidade social das famílias, sendo aplicado somente aos moradores locais do Cantagalo-Pavão-Pavãozinho. Contudo, para o ano de 2023, a prefeitura do Rio de Janeiro estenderá a seleção para uma área mais abrangente, cujo detalhamento ainda não foi passado à instituição. Desta parceria com a prefeitura, a Solar Meninos de Luz recebe uma ajuda de 600 reais de custo por aluno, porém o custo com eles é cerca de duas vezes maior. Assim, o caixa é suprido a partir de doações de apoiadores e parcerias privadas.

Ao detalhar a temática dos resíduos gerados, foi exposto que a escola realiza coleta seletiva do lixo interno e que existe um recolhimento diário dos resíduos secos e molhados pela Comlurb. Projetos ambientais como a horta e a compostagem são realizados na Instalação 4. A horta possui a finalidade exclusivamente educativa, tendo alunos monitores como responsáveis pela manutenção, com a pretensão de uso futuro dos legumes e hortaliças cultivados na alimentação do corpo institucional. A composteira é mantida por um funcionário de serviços gerais porém existe dificuldade de sua manutenção, atualmente. Ao visitar a cantina, localizada na Instalação 3, foi estimado o total de alimento consumido mensalmente bem como o consumo médio de gás, que é encanado, diferentemente do restante da comunidade, que utiliza butijões nas residências.

Um importante ponto falado por Isabella é que a Instalação 4 é o único terreno alugado, cuja relação com o proprietário é sensível a ponto de inviabilizar num primeiro momento qualquer nova construção ou obra. Isto impacta diretamente a implementação do biodigestor nas potenciais áreas internas da escola, porém a diretora segue esperançosa em reverter este cenário a médio prazo. Sua justificativa é que existe a pretensão de utilizar parte da área não

construída para levantar um novo prédio para a escola, além de a confecção de novos andares nas demais instalações de forma a dobrar a capacidade de atendimento de alunos. Por ser um projeto de longo prazo, não afetaria a implementação do biodigestor caso ela ocorra nos próximos anos.

A visita foi finalizada com uma breve caminhada pela comunidade para apontar os três postos de coleta de RSUs disponíveis. No caminho, foi possível observar como a diretora é uma figura querida pelos moradores locais. Além disso, foi notória a presença de concentrações de lixo em regiões mais elevadas da comunidade e distantes dos pontos de coleta, que estavam vazios por contarem com a presença de funcionários da Comlurb naquele período do dia.