

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**ENGENHARIA QUÍMICA**

**LETÍCIA BARTOLOMEU DE SOUZA**  
**LORENE PECCI**

**PROJETO DE IMPLANTAÇÃO DE UM BIODIGESTOR MODELO  
FLUXO TUBULAR PARA A PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE  
RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS DO RESTAURANTE  
UNIVERSITÁRIO DA UTFPR– CAMPUS PONTA GROSSA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO 2**

**PONTA GROSSA**

**2021**

**LETÍCIA BARTOLOMEU DE SOUZA**

**LORENE PECCI**

**PROJETO DE IMPLANTAÇÃO DE UM BIODIGESTOR MODELO  
FLUXO TUBULAR PARA A PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE  
RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS DO RESTAURANTE  
UNIVERSITÁRIO DA UTFPR– CAMPUS PONTA GROSSA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química, do Departamento de Engenharia Química, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Bittencourt Sydney

**PONTA GROSSA**

**2021**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos.

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

### **PROJETO DE IMPLANTAÇÃO DE UM BIODIGESTRO MODELO FLUXO TUBULAR PARA A PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS DO RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO DA UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ – CAMPUS PONTA GROSSA**

por

Letícia Bartolomeu de Souza e Lorene Pecci

Monografia apresentada no dia 18 de agosto de 2021 ao Curso de Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Ponta Grossa. As candidatas foram arguidas pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Dr. Cassiano Moro Piekarski  
(UTFPR)

---

Prof. Dr. Daniel Poletto Tesser  
(UTFPR)

---

Profa. Dr. Eduardo Bittencourt Sydney  
(UTFPR)  
Orientador

---

Profa. Dra. Juliana de Paula Martins  
Responsável pelo TCC do Curso de Engenharia Química

**O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso.**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos primeiramente às nossas famílias, que nos apoiaram durante esses anos e forneceram condições para estudarmos.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Ponta Grossa, pela estrutura fornecida e pelos docentes ao longo desta trajetória.

Gostaríamos de deixar registrado também, o reconhecimento ao nosso orientador Prof. Dr. Eduardo Bittencourt Sydney, por todo suporte e ensinamentos, tornando possível a realização do projeto.

Enfim, agradecemos a todos que por algum motivo contribuíram para o desenvolvimento e realização deste trabalho.

“Coragem é ir de falha em falha sem  
perder o entusiasmo”.

(CHURCHILL, Winston)

## RESUMO

SOUZA, Letícia Bartolomeu de; PECCI, Lorene. **Projeto de implantação de um biodigestor modelo fluxo tubular para a produção de biogás a partir de resíduos sólidos orgânicos do restaurante universitário da UTFPR– Campus Ponta Grossa.** 2021. 81 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2021.

A biodigestão é uma técnica eficiente no tratamento e valorização dos resíduos orgânicos que visa seu aproveitamento energético. O biogás é uma mistura de gases combustíveis, obtido pela biodigestão e que possui grande aplicabilidade, como a queima e a geração de energia elétrica. Em relação ao seu aproveitamento energético, a produção de biogás apresenta-se como um processo viável economicamente, além de benéfico ao meio ambiente. A pesquisa terá por objetivo apresentar um projeto de instalação de um biodigestor tipo fluxo tubular para produção de biogás a partir de resíduos sólidos orgânicos do restaurante universitário da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, do município de Ponta Grossa. Diante disso, se estabelecerá as condições operacionais necessárias para a biodigestão e a quantificação teórica da capacidade de produção de energia elétrica.

**Palavras-chave:** Biogás. Resíduos Orgânicos. Dimensionamento Biodigestor Tubular. Energia Renovável.

## ABSTRACT

SOUZA, Letícia Bartolomeu de; PECCI, Lorene. **Project to implement a tubular flow model biodigester for the production of biogas from organic solid waste at the university restaurant of the Federal Technological University of Paraná – Ponta Grossa Campus.** 2021. 81 p. Work of Conclusion Course (Graduation in Chemical Engineering) - Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2021.

Biodigestion is a very efficient technique of treatment and valorization of organic waste, with objective its energy utilization. The biogas is a mixture of gases highly combustible, obtained by biodigestion and has great applicability, such as burning and as electric energy generation. Given the possibility of using biogas, the biodigestion has shown to be a viable process economically, as well as beneficial to the environment. The research aims to present a project to install a plug-flow type biodigester for the production of biogas from organic solid waste at the university restaurant of the Federal Technological University of Paraná, in the municipality of Ponta Grossa. Therefore, the necessary operational conditions for biodigestion and the theoretical quantification of the electric energy production capacity will be established.

**Keywords:** Biogas. Organic Waste. Plug-Flow Biodigester Sizing. Renewable energy.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo de biodigestor fluxo tubular que será utilizado no projeto. ....	34
Figura 2 - Vista frontal e lateral de um biodigestor Fluxo Tubular. ....	36
Figura 3 - Alternativa de aquecimento para biodigestores. ....	43
Figura 4 - Área de implantação do biodigestor no campus da UTFPR – PG. ....	50
Figura 5 - Exemplo de lixeira para a destinação dos resíduos orgânicos do RU. ....	51
Figura 6 - Triturador para resíduos orgânicos. ....	52
Figura 7 - Exemplificação do formato do biodigestor fluxo tubular. ....	53
Figura 8 - Exemplificação do formato das caixas de entrada e saída do biodigestor. .....	57
Figura 9 - Vista frontal do biodigestor para dimensionamento da lona de impermeabilização. ....	57
Figura 10 - Vista lateral do biodigestor para dimensionamento da lona de impermeabilização. ....	58
Figura 11 - Exemplo do arco e ângulo formado no biodigestor para o cálculo do gasômetro. ....	59
Figura 12 - Exemplo de dreno. ....	61
Figura 13 - Vista superior do biodigestor e as respectivas dimensões. ....	69
Figura 14 - Dimensões reais do biodigestor e das caixas de entrada e saída. ....	69
Figura 15 – Corte da seção transversal e da seção longitudinal do biodigestor. ....	70



## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Geração de RSU total (t/ano) e per capita (kg/hab/ano) nos anos de 2010 e 2019, no Brasil. ....	21
Gráfico 2 - Gravimetria dos resíduos sólidos urbanos no Brasil em 2020.....	21
Gráfico 3 - Demanda máxima energética da UTFPR entre 2016 e 2019. ....	65
Gráfico 4 - Potências de geradores ERMAC® x Consumo de biogás.....	65
Gráfico 5 - Consumo de energia da UTFPR-PG no ano de 2019. ....	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos biodigestores quanto ao empreendimento. ....	38
Tabela 2 - Variação do poder calorífico em relação à composição do biogás. ....	46
Tabela 3 – Equivalência de 1 m <sup>3</sup> de biogás com outras fontes de energia. ....	47
Tabela 4 - Composição de SV dos resíduos alimentares.....	49
Tabela 5 - Altura ideal para cada faixa de volume do biodigestor fluxo tubular.....	56

## LISTA DE ABREVIATURAS

a.a	Ao Ano
°C	Grau Celsius
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de Cálcio
CH <sub>4</sub>	Metano
CO <sub>2</sub>	Gás Carbônico
CO	Monóxido de Carbono
hab	Habitante
H <sub>2</sub>	Hidrogênio
H <sub>2</sub> S	Sulfeto de Hidrogênio
H <sub>2</sub> O	Água
K	Potássio
Kcal	Quilocaloria
Kg	Quilograma
KOH	Hidróxido de Potássio
kW	Quilowatt
kWh	Quilowatt-hora
L	Litro
m	Metro
m <sup>2</sup>	Metro Quadrado
m <sup>3</sup>	Metro Cúbico
mg	Miligrama
mL	Mililitro
mm	Milímetro
N <sub>2</sub>	Nitrogênio
NH <sub>3</sub>	Amônia
NaOH	Hidróxido de Sódio
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Íon Amônio

Nm <sup>3</sup>	Normal Metro Cúbico
O <sub>2</sub>	Oxigênio
ppm	Partes por Milhão
t	Tonelada
$\pi$	Número PI

## LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
AI	Alcalinidade Intermediária
AP	Alcalinidade Parcial
ART	Anotação de Responsabilidade Técnica.
BLC	Biodigestor Lagoa Coberta
CIBIOGÁS	Centro Internacional de Energias Renováveis
COV	Carga Orgânica Volumétrica
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
GEE	Gases do Efeito Estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
ICLEI	<i>International Council for Local Environmental Initiatives</i> / Conselho Internacional para Iniciativas Ambientais Locais
IEA	<i>International Energy Agency</i> / Agência Internacional de Energia
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> / Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
NBR	Norma Técnica Brasileira
PCI	Potencial Calorífico Inferior
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
pH	Potencial Hidrogeniônico
PROBIOGÁS	Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil
PVC	Policloreto de Vinila
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos

RU	Restaurante Universitário
SEDEST	Secretaria do Desenvolvimento Sustentável e do Turismo
ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis
TC	Tempo de Carregamento
TRH	Tempo de Retenção Hidráulica
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket / Reator Anaeróbico de Manta de Lodo de Fluxo Ascendente
UTFPR-PG	Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Ponta Grossa

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA	17
1.2 OBJETIVO GERAL	17
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.4 JUSTIFICATIVA	18
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>20</b>
2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS E ENERGIA NO BRASIL	20
2.2 FUNDAMENTOS DO BIOGÁS	22
2.2.1 Biodigestão	22
2.2.2 Etapas da Biodigestão	24
2.3 PARÂMETROS QUE AFETAM A PRODUÇÃO DE BIOGÁS	24
2.3.1 Temperatura	25
2.3.2 pH e Alcalinidade	26
2.3.3 Carga Orgânica Volumétrica e Retenção Hidráulica	27
2.4 ETAPAS DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS	29
2.4.1 Armazenamento	29
2.4.2 Sistemas de Pré-Tratamento	30
2.4.3 Unidade de Biodigestão	31
2.4.4 Condicionamento e Aproveitamento Energético do Biogás	34
2.4.5 Tratamento e Disposição Final do Digestato	34
2.5 BIODIGESTOR FLUXO TUBULAR	35
2.5.1 Construção do Biodigestor	37
2.6 QUESTÕES OPERACIONAIS	38
2.6.1 Legislação	38
2.6.2 Seguranças na Operação de Biodigestores	39
2.6.3 Partida do Biodigestor	41
2.6.4 Sistemas de Aquecimento	42
2.6.5 Gerenciamento do Digestato e do Lodo	43
2.6.6 Técnicas de Remoção de Impurezas do Biogás	45
2.7 CONVERSÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS	46
2.7.1 Geração de Energia Elétrica	47
<b>3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b>	<b>49</b>
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO SUBSTRATO	49
3.2 PROPOSIÇÃO DO MODELO A SER IMPLANTADO NA UNIVERSIDADE	50
3.2.1 Área de Estudo	50
3.2.2 Armazenamento	51
3.2.3 Pré-Tratamento	52
3.2.4 Dimensionamento do Biodigestor Fluxo Tubular	53

3.2.5	Captação e Purificação do Biogás .....	59
3.2.6	Disposição do Digestato e do Lodo do Biodigestor.....	61
3.3	PRODUÇÃO TEÓRICA DE BIOGÁS .....	62
3.4	CONVERSÃO TEÓRICA DE ENERGIA .....	63
3.4.1	Escolha do Moto-Gerador .....	64
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>67</b>
4.1	GERAÇÃO ESTIMADA DE RESÍDUOS DA UNIVERSIDADE .....	67
4.2	DIMENSIONAMENTO DA PLANTA DO BIODIGESTOR FLUXO TUBULAR...	67
4.3	PRODUÇÃO ESTIMADA DE BIOGÁS .....	70
4.4	DIMENSIONAMENTO DO GASÔMETRO .....	71
4.5	PRODUÇÃO ESTIMADA DE ENERGIA .....	72
4.6	COMPARATIVO ENERGÉTICO NA UNIVERSIDADE .....	73
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>74</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>75</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>76</b>



## 1 INTRODUÇÃO

O biogás foi descoberto em 1667, no Reino Unido, pelo cientista Thomas Shirley, o qual observou que a decomposição da matéria orgânica dos pântanos gerava um gás. Naquela época não se tinha ideia de como era realizada essa transformação da matéria e de qual gás gerado se tratava. Apenas a partir de 1859, que a produção de biogás passou a ser explorada para fins energéticos e que países, como a Alemanha e a França, estabeleceram as bases teóricas e experimentais da biodigestão anaeróbia (CIBIOGÁS, 2020).

Até 2020, a geração de biogás representou cerca de 0,3% do total de energia no mundo (IEA, 2020). Entretanto, a tendência de crescimento dessa energia renovável é cada vez maior, em virtude da diversidade de substratos que podem ser utilizados para a geração e das recentes preocupações com sustentabilidade e descarbonização da matriz energética. Segundo o IEA (2020), a perspectiva é de que até 2040 a disponibilidade de matérias primas sustentáveis para a geração de biogás aumente cerca de 40%.

O alto potencial de produção de biogás no momento se dá pela sua variedade de benefícios. Essa fonte de energia não só beneficia a correta destinação e tratamento de resíduos urbanos, industriais e da agropecuária, como também a sua queima evita que o gás metano seja lançado na atmosfera. Ou seja, o biogás além de ser uma fonte limpa e renovável de geração de energia, contribui para o meio ambiente, minimizando a emissão de gases do efeito estufa, para o saneamento ambiental, evitando a disposição inadequada de resíduos orgânicos e ainda contribui para o desenvolvimento das regiões próximas da planta instalada através da oferta de empregos e da redução de custos com a energia elétrica.

Assim, este trabalho tem como objetivo principal desenvolvimento de um projeto de implantação de um sistema de biodigestão para a produção de biogás a partir dos resíduos sólidos orgânicos gerados pelo restaurante universitário da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Ponta Grossa para fins energéticos. A base metodológica deste trabalho foi realizada através de pesquisas bibliográficas sobre o assunto, por meio da leitura de artigos científicos e textos acadêmicos com a finalidade de dimensionar o biodigestor e estabelecer as condições operacionais ideais que garantam a eficiência do processo.

O atual capítulo aborda as considerações iniciais do tema deste trabalho, apresentando a proposta de trabalho e sua relevância atual. O capítulo seguinte abordará a revisão bibliográfica, permitindo um aprofundamento dos temas necessários para o entendimento deste trabalho. No capítulo três estará apresentada a metodologia adequada para o dimensionamento e implantação da planta. No capítulo quatro será evidenciado os resultados, com o volume do biodigestor necessário para a quantidade de resíduos gerados pelo RU e a estimativa de biogás gerado. E o último capítulo apresentará as considerações finais em relação aos resultados, as sugestões para trabalhos futuros e a possível contribuição deste trabalho para a área de estudo e para a Universidade Tecnológica Federal do Paraná – campus Ponta Grossa (UTFPR-PG).

### 1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Dada as inúmeras vantagens de se produzir biogás a partir de resíduos sólidos orgânicos e a possibilidade de utilização dos resíduos orgânicos do restaurante universitário da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Ponta Grossa, este projeto estará delimitado principalmente ao estudo de dimensionamento de um biodigestor fluxo tubular que atenda a demanda de resíduos gerados pelo RU da universidade.

Assim, essa futura implantação de uma unidade de produção de biogás dentro da universidade colaborará para o desenvolvimento socioambiental da comunidade acadêmica, e para a minimização dos impactos ambientais e custos energéticos da instituição. Porém, outros temas como a quantificação do investimento e retorno financeiro não serão objeto de estudo.

### 1.2 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como principal objetivo o desenvolvimento de um projeto de instalação de um sistema de biodigestão para a valoração dos resíduos orgânicos crus de preparação e de sobras de alimentos dos pratos do restaurante universitário da Universidade Tecnológica Federal do Paraná de Ponta Grossa.

### 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Levantar os dados quantitativos de geração de resíduos alimentares do restaurante universitário da Universidade Tecnológica Federal do Paraná de Ponta Grossa;
- Estabelecer as dimensões da unidade de biodigestão adequada à quantidade de resíduos gerados no restaurante universitário;
- Estimar a quantidade de biogás a ser produzida, assim como sua conversão energética;

### 1.4 JUSTIFICATIVA

A utilização do biogás como combustível para geração de energia elétrica não apenas o aproveita de forma sustentável como também evita que o gás metano nele contido seja emitido na atmosfera. Segundo o Relatório Especial Sobre Mudanças Climáticas (IPCC) de 2019, o metano tem um potencial de aquecimento global 28 vezes maior que o do dióxido de carbono, ou seja, deixar o biogás em decomposição significa emitir metano que é 28 vezes mais poluente que a emissão de CO<sub>2</sub> caso o biogás fosse queimado (IPCC, 2019).

Além disso, a biodigestão evita o descarte dos resíduos em lixões e aterros e possibilita a geração de lucro através da produção de biogás e de biofertilizantes. Dessa forma, os biodigestores podem ser considerados uma solução viável para o tratamento de resíduos sólidos tanto de pequenas propriedades como de grandes cidades, em função da simplicidade operacional, investimento e custos reduzidos e possibilidade de obtenção de receita.

Portanto, o presente trabalho torna-se relevante em razão dos inúmeros benefícios da utilização do biogás em âmbitos energéticos, sociais, econômicos e ambientais. Nesse contexto, buscou-se neste trabalho, realizar um levantamento dos resíduos orgânicos gerados pelo restaurante universitário da UTFPR-PG, visando a

implantação de um biodigestor de fluxo tubular para a produção de biogás e geração de energia para atender uma parte da demanda energética local.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

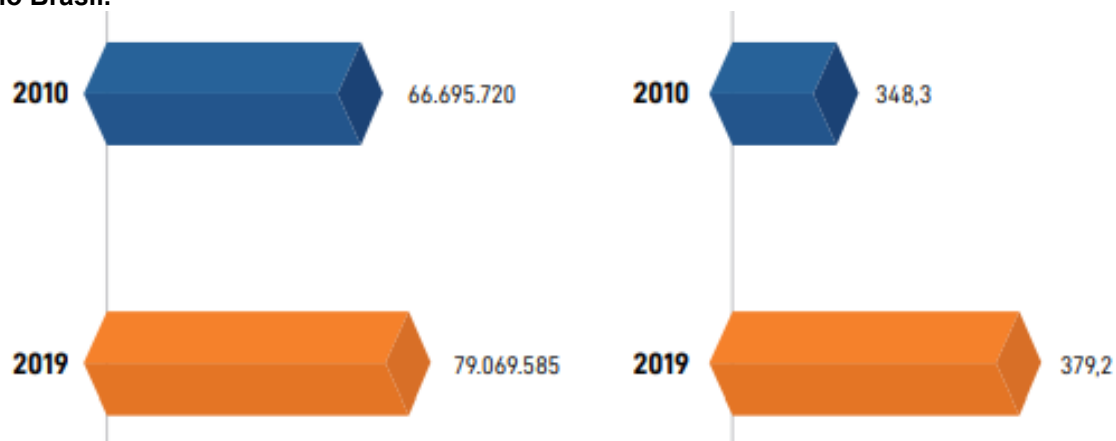
Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica do trabalho e aborda os temas que são considerados fundamentais para o entendimento do assunto: projeto de implantação de um biodigestor de fluxo tubular para a produção de biogás a partir dos resíduos sólidos orgânicos do restaurante universitário. Dessa forma, o capítulo está dividido nas seguintes seções: resíduos sólidos orgânicos e energia no Brasil, fundamentos do biogás, parâmetros que afetam a produção de biogás, etapas da produção de biogás, biodigestor fluxo tubular, conversão energética de biogás, geração de energia elétrica e questões operacionais.

### 2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS E ENERGIA NO BRASIL

Considerando o crescimento econômico ilimitado e a cultura do consumo, a gestão dos resíduos sólidos vem se tornando um assunto cada vez mais complexo no mundo todo ao longo da última década, principalmente por causa da disposição final desses resíduos que muitas vezes é inadequada.

Segundo o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, entre 2010 e 2019 a geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) obteve um aumento de aproximadamente 67 para 79 milhões de toneladas por ano, em 2019 (Gráfico 1). Isso significa que, em média, cada brasileiro gerou cerca de 379 Kg de RSU por ano no Brasil, sendo 170 Kg apenas de matéria orgânica (ABRELPE, 2020). Os dados demonstram a tendência de crescimento na geração de resíduos sólidos urbanos no país, que deve ser mantida nos próximos anos. E conforme estimativas realizadas com base na série histórica, o Brasil alcançará uma geração anual de 100 milhões de toneladas por volta de 2030 (ABRELPE, 2019).

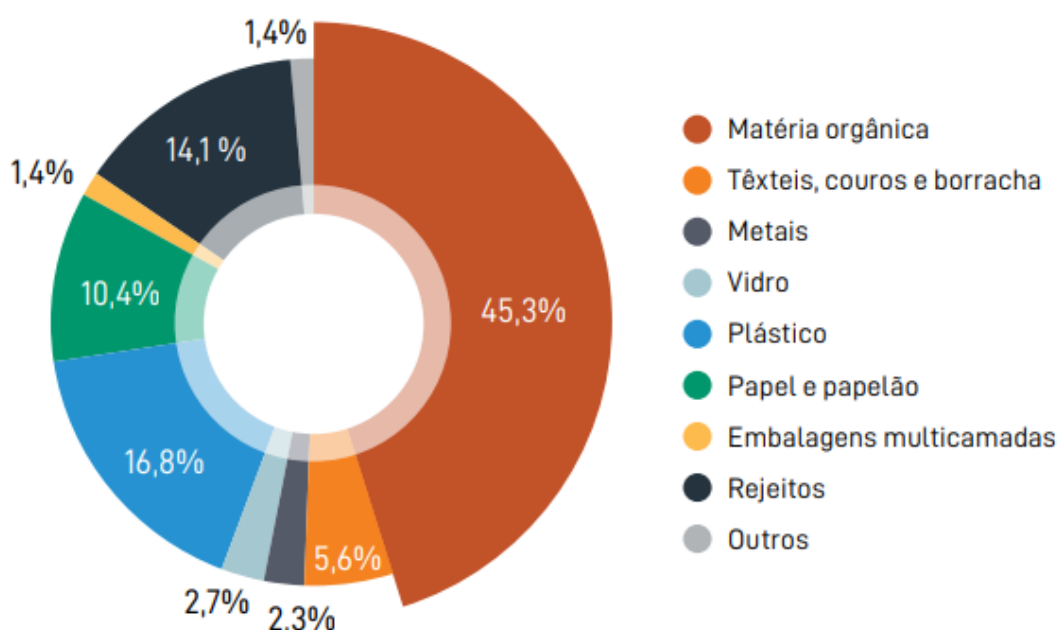
**Gráfico 1 – Geração de RSU total (t/ano) e per capita (kg/hab/ano) nos anos de 2010 e 2019, no Brasil.**



Fonte : Abrelpe (2020).

De acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, da Abrelpe (2020), a maior parte da composição gravimétrica dos RSU gerados no Brasil correspondem a matéria orgânica, totalizando 45,3% (Gráfico 2). Ainda, segundo a Abrelpe (2020), 40,5% da disposição final dos resíduos sólidos urbanos no Brasil é inadequada, em aterros e lixões.

**Gráfico 2 - Gravimetria dos resíduos sólidos urbanos no Brasil em 2020.**



Fonte : Abrelpe (2020).

Assim, tendo em vista a alta parcela de resíduos orgânicos e a disposição inadequada desses resíduos, a disposição dos resíduos sólidos no Brasil é uma das grandes causas da poluição atmosférica, do solo e dos recursos hídricos. O que indica

a necessidade de tratamentos e destinações alternativas que minimizem os impactos negativos ao meio ambiente.

Outro fator relevante, cuja utilização de biogás pode beneficiar, é a insegurança energética e o risco de um racionamento de energia no Brasil, devido a períodos de baixa estação chuvosa para as usinas hidrelétricas, que são a maior fonte de energia elétrica do país.

Dessa maneira, a tecnologia do biogás vem se destacando como uma alternativa de reciclagem dos resíduos orgânicos, minimização de impactos ambientais, geração de energia descentralizada e fonte de renda para pequenos e grandes produtores.

## 2.2 FUNDAMENTOS DO BIOGÁS

Biogás é um gás inflamável obtido a partir da digestão anaeróbia de matéria orgânica (CIBIOGÁS,2020). É composto principalmente de metano e gás carbônico, segundo Deublein e Steinhauser (2008), 55-70% corresponde a metano ( $\text{CH}_4$ ), 30-45% de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e o restante corresponde a traços de outros gases como: sulfetos de hidrogênio, amônia ( $\text{NH}_3$ ), nitrogênio ( $\text{N}_2$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) e oxigênio ( $\text{O}_2$ ).

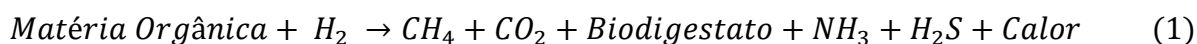
O real teor da composição do biogás depende do substrato que foi utilizado na sua produção, como também do biodigestor e das condições de operação. De modo geral, podem ser considerados substratos para a produção de biogás: resíduos da colheita de milho, silo de milho, dejetos de bovinos e suínos, esterco de galinhas, vinhaça de cana, efluente de cervejaria, fábrica de laticínios e abatedouros, resíduos orgânicos urbanos, restos de alimentos, resíduos de caixa de gordura e esgoto.

### 2.2.1 Biodigestão

A digestão anaeróbia ou biodigestão é um conjunto de reações químicas e bioquímicas, realizadas por microrganismos que degradam a matéria orgânica na ausência de oxigênio (CIBIOGÁS, 2020). Essas reações ocorrem de maneira sequencial em etapas denominadas hidrólise, acidogênese, acetogênese e

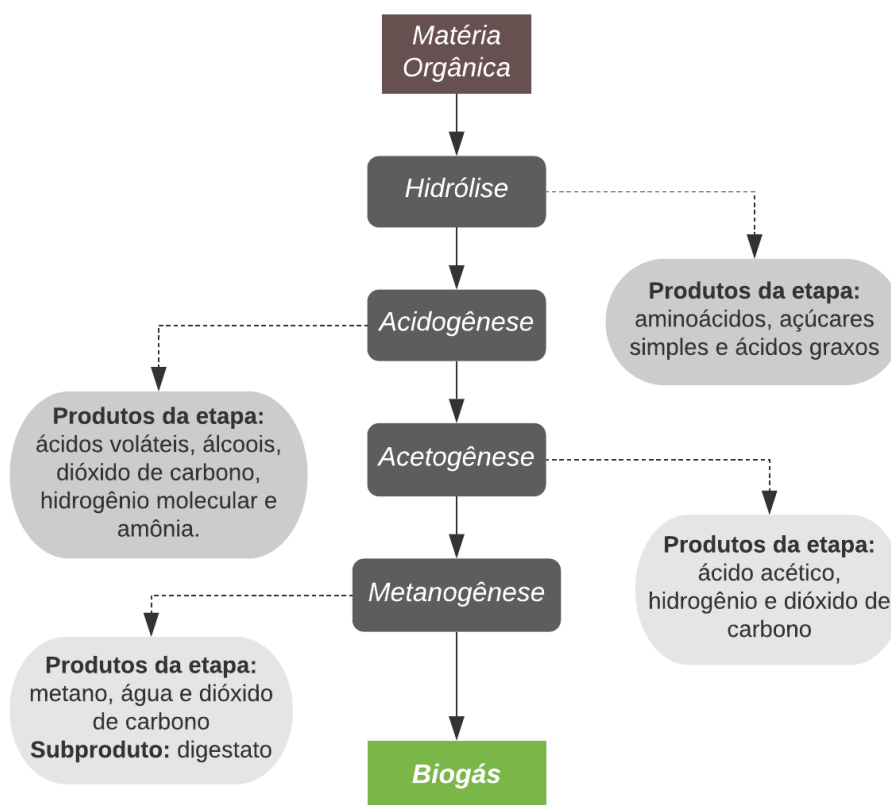
metanogênese. Durante as primeiras fases há a formação de produtos intermediários, e na última fase (metanogênese) ocorre a formação do biogás (Fluxograma 1).

Através de associações simbióticas entre diferentes grupos de microrganismos, a biodigestão converte a matéria orgânica complexa, ou substrato, em biogás e digestato. De acordo com Kelleher et al. (2002), a representação da biodigestão anaeróbica pode ser feita através Equação 1.



O subproduto da biodigestão é o digestato, efluente de reator anaeróbio, obtido após a finalização da biodigestão. Esse efluente tem grande quantidade de nutrientes e pode ser utilizado como fertilizante orgânico ou complementar a aplicação de fertilizante químico (OLIVEIRA, 2004).

**Fluxograma 1 - Fases da biodigestão.**



**Fonte: Autoria própria (2020).**



### 2.2.2 Etapas da Biodigestão

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

A segunda etapa da biodigestão é a acidogênese, na qual as bactérias acidogênicas convertem os compostos gerados na hidrólise em ácidos voláteis, álcoois, dióxido de carbono, hidrogênio molecular e amônia (PINTO, 1999).

A acetogênese é a terceira etapa da biodigestão, na qual as bactérias acetogênicas convertem o material degradado das etapas anteriores em ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono (KARLSSON et al., 2014). Nessa fase a sobrevivência e crescimento de bactérias acetogênicas assim como a formação de ácido acético só são possíveis em baixas concentrações de hidrogênio (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2008).

E a quarta e última etapa é a metanogênese, onde ocorre a formação do metano que é o componente do biogás mais esperado pela biodigestão, por ser o único composto de valor energético. Por esse motivo, a reação da metanogênese é a que mais interessa no processo. As bactérias *Arqueas metanogênicas* são divididas em dois grupos principais, as metanogênicas acetoclásticas que formam metano a partir de ácido acético, e as metanogênicas hidrogenotróficas que produzem metano a partir de hidrogênio e dióxido de carbono. Os microrganismos metanogênicos são mais sensíveis a interferências pois não são resistentes a alterações de pH e substâncias tóxicas (KARLSSON et al., 2014).

## 2.3 PARÂMETROS QUE AFETAM A PRODUÇÃO DE BIOGÁS

A relação entre as bactérias na biodigestão é de interdependência e sinergia. Assim, o metabolismo dos microrganismos anaeróbios depende de alguns fatores,

que precisam ser controlados, para que o processo de biodigestão aconteça de maneira eficiente.

### 2.3.1 Temperatura

No processo de biodigestão a temperatura influencia na velocidade de crescimento e no metabolismo dos microrganismos, como também afeta as propriedades físico-químicas dos componentes presentes no substrato (KUNZ et al., 2019). Como existe uma variedade de grupos de microrganismos, as faixas de temperatura para a melhor eficiência também diferem entre os microrganismos. As bactérias metanogênicas são os microrganismos mais sensíveis às variações de temperatura no processo de biodigestão, e por isso, recomenda-se que as bruscas elevações de temperatura sejam evitadas (SOUZA, 1984).

Segundo Kunz et al. (2019), os microrganismos podem ser classificados em três classes: termofílicos, mesofílicos e psicrófilicos. A faixa de crescimento microbiano de cada uma dessas classes são: maior que 40°C para os termofílicos, entre 20°C e 40°C para os mesofílicos e menor que 20°C para os psicrófilicos (PROBIOGÁS, 2015). E cada uma dessas classes possui uma temperatura ótima de crescimento: 60°C, 37°C e 15°C, respectivamente.

O processo de biodigestão na faixa termofílica é indicado para grandes vazões, substratos complexos ou que apresentam riscos biológicos. É um processo mais rápido, devido ao aumento na solubilidade dos compostos orgânicos, e gera também um lodo mais desidratável, com maior remoção de patógenos. Entretanto, os custos para o aquecimento não são viáveis e o aumento da temperatura pode influenciar na dissociação da amônia gerando um processo inibitório. Ou seja, com o aumento da temperatura, o equilíbrio químico se desloca de  $NH_4^+$  para  $NH_3$  (aquoso), facilmente absorvido pela membrana celular das *Arqueas metanogênicas* causando um desequilíbrio iônico ou uma deficiência de potássio nesses microrganismos, inibindo o processo (SOUZA, 1984; KUNZ e MUKHTAR, 2016; PROBIOGÁS, 2015).

Para o processo de biodigestão na faixa mesofílica também é necessário o aquecimento adicional do reator ou então do afluente, assim como de isolamento térmico do reator, mesmo se o reator estiver localizado em países com condições climáticas semelhantes às do Brasil. Com exceção da indústria alimentícia, onde os

substratos já são utilizados em altas temperaturas e pode-se dispensar o aquecimento (PROBIOGÁS, 2015).

Os biodigestores de lodo, lagoas de tratamento e UASB, que tratam esgotos sanitários operam normalmente na faixa psicofílica, não necessitando de aquecimento. Entretanto, necessitam de um maior tempo para a biodigestão e apresentam menor eficiência de decomposição, gerando menos gás (PROBIOGÁS, 2015).

Para a biodigestão o mais importante é que o processo ocorra sem variações significativas de temperatura do que opere nas temperaturas ótimas, o que justifica o comprometimento da produção de biogás em regiões com grande amplitude térmica. Para que sejam evitados problemas relacionados a temperatura se recomenda que a temperatura do biodigestor não varie bruscamente mais do que 2°C e que a temperatura do substrato seja constantemente controlada durante todo o processo (SOUZA, 1984; KUNZ et al., 2019).

### 2.3.2 pH e Alcalinidade

A biodigestão é um complexo processo que envolve uma variedade de microrganismos, com diferentes características e adaptabilidade ao meio. Para um maior rendimento da biodigestão, os meios de cultura devem apresentar pH neutro ou na faixa entre 7,0 e 8,5 (KARLSSON et al., 2014).

A maioria dos problemas na digestão anaeróbia pode ser atribuída ao acúmulo de ácidos voláteis e, conseqüentemente, a queda do pH. O pH abaixo de 6,6 implica na inibição do crescimento das *Arqueas metanogênicas*, porém, as bactérias acidogênicas continuam suas funções até pH 4,5, o que resulta num rápido acúmulo de ácidos voláteis (KUNZ et al., 2019). Em casos de acumulação de ácidos voláteis, pode indicar principalmente sobrecarga ou inibição microbiológica.

Por este motivo, costuma-se utilizar substâncias que garantirão a estabilidade do pH durante o processo, como por exemplo o bicarbonato de sódio. Dessa maneira, é comum inocular o substrato com a alcalinidade do meio relativamente elevada, pois com uma maior alcalinidade, a capacidade tampão do processo também será maior e promoverá a estabilidade do pH (KARLSSON et al., 2014; KUNZ et al., 2019).

Além dessa substância estabilizadora, as atividades das *Arqueas metanogênicas* também possuem a função de regular a alcalinidade do meio ao

produzirem dióxido de carbono, amônia e bicarbonato. Hobson e Wheatley (1993) citam que uma das grandes causas de falência de um biodigestor ocorre durante a sua partida, pois a flora metanogênica, que geralmente leva um tempo maior que a acidogênica para se reproduzir, não consegue metabolizar todo o ácido orgânico produzido, causando queda do pH.

Assim, o grande problema da acidificação do meio é a inibição das atividades das bactérias. Por isso, recomenda-se o monitoramento da alcalinidade do sistema, pois se trata da medida da sua capacidade de neutralizar ácidos devido à presença de sais de ácidos inorgânicos fracos (bicarbonato, borato, silicato e fosfato) e de sais de ácidos voláteis (acetato, propionato, butirato, entre outros).

O monitoramento da alcalinidade do sistema é feito através da relação de alcalinidade intermediária/ alcalinidade parcial (AI/AP), em que AI fornece os valores da alcalinidade referente aos ácidos voláteis e AP à alcalinidade do bicarbonato do sistema ou carbono inorgânico total. Para a relação menor que 0,3 indica que o reator está em subcarga, maiores que 0,4 em sobrecarga e entre 0,3 e 0,4 seria uma faixa ótima para o processo de biodigestão (KUNZ et al., 2019).

Segundo Deublein e Steinhauser (2008), existem algumas maneiras de se prevenir a acidificação excessiva do meio, como por exemplo: interrupção do substrato para que as bactérias metanogênicas sejam capazes de degradar o ácido; redução da carga espacial orgânica através do aumento do tempo de residência, adição de substâncias alcalinas no substrato para aumentarem o efeito do tamponamento; remoção contínua dos ácidos; adição de substâncias neutralizantes como carbonato de sódio e soda caustica; adição de água diluída; e em último caso, quando a acidificação do meio não tiver mais solução será necessário esvaziar e reiniciar o biodigestor.

### 2.3.3 Carga Orgânica Volumétrica e Retenção Hidráulica

Carga orgânica volumétrica (COV) é a quantidade de matéria orgânica aplicada diariamente ao reator, por unidade de seu volume. É calculada por meio da razão entre a concentração de sólidos voláteis presentes no substrato (SV), em  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , e o tempo de retenção hidráulico (TRH), em dias, conforme mostra a Equação 2 (KUNZ et al., 2019).

$$COV = \frac{SV}{TRH} \quad (2)$$

É importante conhecer o teor de ST e SV presentes no substrato para se fornecer a carga orgânica ideal para o processo de biodigestão (KARLSSON et al., 2014). De forma geral, o teor de ST indica a quantidade de matéria orgânica e mineral do substrato após a evaporação da água, enquanto o teor de SV indica a parte orgânica da matéria seca, responsável pela produção de biogás (CIBIOGÁS, 2020). Para que a digestão úmida ocorra em condições ideais se recomenda uma concentração entre 7% e 10% de ST, dependendo de qual substrato e biodigestor serão utilizados para a biodigestão (KARLSSON et al., 2014).

De acordo com Karlsson et al. (2014), o processo de biodigestão se inicia com uma carga baixa (normalmente  $0,5 \text{ kg.m}^3.\text{dia}^{-1}$ ) de matéria orgânica no biodigestor e aumenta gradualmente conforme o crescimento dos microrganismos, e estabilidade do pH. Até se obter a carga orgânica desejada pode demorar meses, pois irá depender se há quantidade de microrganismos suficientes para degradar a matéria orgânica. Caso, a quantidade de microrganismos não seja suficiente irá resultar no acúmulo de ácidos graxos e instabilidade no processo.

Tempo de retenção hidráulica (TRH) é o tempo que o material permanece no interior do biodigestor, ou seja, tempo entre a entrada do efluente e a saída do afluente do digestor. De acordo com os diferentes substratos utilizados para a alimentação do biodigestor, e os demais fatores, o tempo de retenção varia de 4 a 60 dias (MAZZUCCHI, 1980). Para o substrato composto de resíduos de matéria orgânica o tempo de retenção situa-se na faixa de 20 a 30 dias, sendo que com 30 dias a carga orgânica já sofreu grande redução e, por isso, a produção de biogás já atingiu seu máximo (BEUX, 2005).

Em alimentação contínua, o TRH é medido por meio da razão entre o volume do biodigestor (V), em  $\text{m}^3$ , e a carga de alimentação diária (Q), em  $\text{m}^3.\text{d}^{-1}$  (KUNZ et al., 2019). Porém essa relação (Equação 3), pode variar se a alimentação for descontínua, podendo neste caso, a variável TRH ser substituída pelo tempo de carregamento (TC).

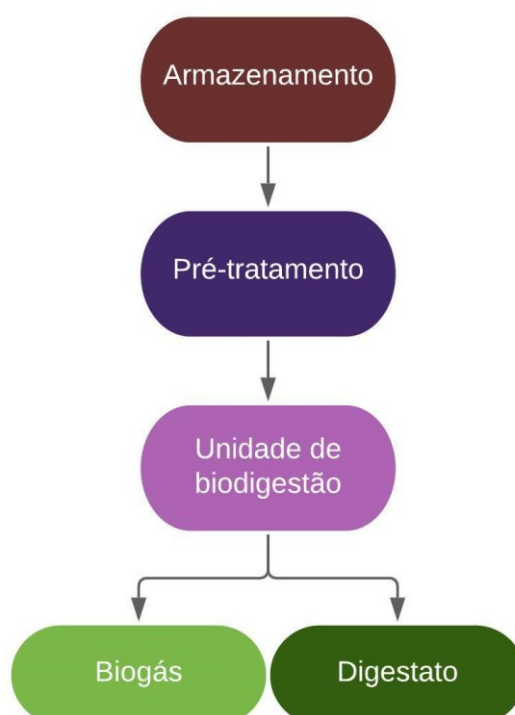
$$TRH = \frac{V}{Q} \quad (3)$$

Para o máximo rendimento de produção de biogás, é necessário o controle do tempo de retenção em relação a carga orgânica. Tempos de retenção maiores exigem carga orgânica elevada. Entretanto, se um processo com curto tempo de retenção apresentar elevada taxa de carga orgânica significa que há o risco do grau de digestão do material se tornar baixo (KARLSSON et al., 2014).

## 2.4 ETAPAS DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Nesta seção serão apresentadas as principais etapas do processo de produção de biogás, desde o armazenamento até o tratamento e disposição final do digestato, como mostra o Fluxograma 2, a seguir.

**Fluxograma 2 – Etapas da produção de biogás**



**Fonte: Autoria própria (2021).**

### 2.4.1 Armazenamento

A primeira etapa para o processo de biodigestão é o armazenamento dos resíduos gerados, os quais serão utilizados como substrato para o sistema. Segundo

Karlsson et al. (2014), o armazenamento dos substratos varia de acordo com o tipo de instalação da planta de biogás e das características do material.

O ideal é que os resíduos fiquem armazenados em recipientes fechados, como tanques, containers ou lixeiras para substratos de resíduos sólidos orgânicos, por exemplo. Dessa maneira, será evitada a contaminação do resíduo que está aguardando o pré-tratamento e a proliferação de doenças e vetores.

O armazenamento feito de maneira incorreta pode ser um problema para o processo de biodigestão. Por exemplo, caso sejam armazenados incorretamente, os substratos úmidos podem começar sua biodegradação antecipadamente levando a fortes emissões de odores, toxinas e esporos que são um risco para a saúde das pessoas ao entorno.

#### 2.4.2 Sistemas de Pré-Tratamento

Uma das vantagens da biodigestão é a sua ampla gama de variedade de sólidos que podem ser usados como substratos. No entanto, dependendo do tipo de substrato, se torna indispensável um pré-tratamento a fim de garantir que as moléculas orgânicas estejam disponíveis para a reação microbológica. Segundo Chernicharo (2007), existem três tipos de pré-tratamento: químico, mecânico e biológico.

Os substratos podem ter vários estados e características, como por exemplo: podem ser líquidos, sólidos, pastosos e com partículas fibrosas ou granulares. Os materiais viscosos ou fibrosos são particularmente difíceis de mover e misturar. E os complexos lignocelulósicos presentes em substratos fibrosos são resistentes à degradação sendo necessário aumentar sua disponibilidade energética (CHERNICHARO, 2007).

O pré-tratamento mecânico é uma forma simples de pré-tratamento que promove o aumento da área de superfície específica e a disponibilidade de biomassa. Além disso, a redução do tamanho das partículas também tem um efeito sobre a viscosidade em biodigestores e reduz a formação de camadas flutuantes e escumas, que causam bloqueios na transferência de massa gás-líquido do biogás produzido.

Já o pré-tratamento alcalino é um dos métodos químicos que tem sido utilizado para melhorar a digestibilidade enzimática de diferentes biomassas lignocelulósicas. Neste método, são utilizadas bases, como hidróxido de sódio

(NaOH), hidróxido de potássio (KOH), amônia (NH<sub>3</sub>) e hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) que atuam majoritariamente na solubilização da fração de lignina presente na biomassa. Entretanto, o tratamento utilizando NaOH é o mais utilizado (XU e SUN, 2016). O pré-tratamento alcalino remove os grupos acetato da hemicelulose, o que permite maior acesso da celulose às enzimas hidrolíticas que promovem a biodegradação.

E o pré-tratamento microbiano, conhecido também como pré-acidificação ou estágio múltiplo de fermentação, é um outro tipo de pré-tratamento em que as primeiras etapas da digestão anaeróbia (hidrólise e acidogênese) são separadas da acetogênese e metanogênese. O valor de pH na etapa de pré-acidificação deve situar-se entre 4 e 6, inibindo assim a produção de metano e fazendo com que os ácidos graxos voláteis se acumulem (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2008). O pré-tratamento microbiológico tem um efeito muito positivo na degradação da celulose e hemicelulose, pois as enzimas hidrolíticas que fazem a hidrólise são produzidas majoritariamente em ambientes de pH ácido (LEBUHN e BAUER, 2008).

#### 2.4.3 Unidade de Biodigestão

A unidade de biodigestão é onde ocorre a atividade microbiana na conversão da matéria orgânica em biogás e digestato. A unidade de biodigestão é composta por um ou vários digestores, incluindo alimentação, sistemas de agitação e aquecimento.

Os biodigestores são estruturas físicas que possibilitam as condições necessárias e controladas para a ocorrência da biodigestão. Segundo Kunz et al. (2019), são caracterizados pelo regime de alimentação (batelada ou contínuo), forma de alimentação (ascendente ou laminar), concentração de sólidos no reator (digestão sólida > 20%, semissólida 10 a 15% e úmida < 10%), sistema de agitação (mistura completa, parcial ou sem mistura), e sistemas de aquecimento.

Os modelos são definidos de acordo com o tipo de substrato a ser tratado, nível de investimento e condições ambientais. Entre os modelos de biodigestores mais utilizados se destacam: indiano, chinês, fluxo tubular, fluxo ascendente e de mistura completa (CIBIOGÁS, 2020).

A alimentação descontínua é a mais simples, feita em biodigestores batelada, em que durante a biodigestão não há entradas nem saídas. O processo descontínuo perde em eficiência na geração de biogás, chegando a ter produção de 20% a 30%



menor se comparado ao processo contínuo, uma vez que há uma menor mistura do substrato e a necessidade da abertura do container após o ciclo da digestão (PROBIOGÁS, 2015).

Os demais modelos são semicontínuos ou contínuos e se diferenciam entre si pelas suas complexidades. Os biorreatores de mistura completa são mais estáveis, porém exigem maiores custos de operação e manutenção se comparados com os demais, como o canadense, indiano e chinês. Uma alternativa para biodigestores contínuos de baixo investimento são os biodigestores de lagoa coberta tubulares (BLC), comumente utilizados no Brasil.

O BLC tem sido amplamente empregado no meio rural no gerenciamento dos efluentes da produção animal. É considerado de baixo nível tecnológico, com facilidade de construção e operação. Em geral, não possuem sistemas de aquecimento nem de agitação. Por isso, em alguns casos também encontramos referência a este modelo como “tubular”, onde as dimensões construtivas e o regime de alimentação semicontínuo acabam por gerar configurações de fluxo que variam entre laminar e pistonado (KUNZ et al., 2019).

Em relação à concentração de sólidos, a digestão úmida apresenta maior taxa de produção de biogás e uma maior estabilidade do processo do que a digestão seca, além de um maior controle das emissões de metano. Para que ocorra a digestão úmida de resíduos sólidos é preciso que esse substrato seja diluído durante o pré-tratamento para uma quantidade inferior a 15% de sólidos totais (PROBIOGÁS, 2015). A umidade é importante no processo metabólico pois contribui com a mobilização de nutrientes e substratos e possibilita o transporte de enzimas por todo o sistema (KUNZ et al., 2019).

A temperatura do biodigestor deve ser termofílica quando há risco de patógenos. Os resíduos alimentares, objeto deste estudo, são classificados, de acordo com o anexo H da NBR 10.004:2004, como não perigosos, desde que não misturados a resíduos perigosos, podendo ser enquadrados na classe dos não inertes devido à sua biodegradabilidade (ABNT, 2004), portanto não há necessidade de operar em altas temperaturas.

As temperaturas mesofílicas são geralmente mais utilizadas, pois necessitam de menos gasto energético que as termofílicas e apresentam maior produtividade que as psicofílicas, porém, projetos de biodigestores de baixo custo, tendem a operarem na faixa psicofílica.

Os estágios do processo podem ser estágio único ou múltiplos estágios e está relacionado com o risco de acidificação do meio. Nos processos de estágio único, todas etapas da metanização (hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese) ocorrem concomitantemente em um único reator. Esse tipo de tecnologia tem como vantagem os menores custos implantação e de operação dos reatores (FERREIRA, 2015).

Entretanto, o sistema de múltiplos estágios promovem a separação das etapas de acidogênese e metanogênese. Assim, a biodigestão se torna mais eficiente, pois evita que o acúmulo de ácidos orgânicos produzidos na etapa da acidogênese iniba a produção de metano através da diminuição do pH. Aproximadamente 90% dos reatores presentes na Europa são em único estágio e a preferência por este tipo de sistema está no fato do seu projeto ser simples e exigir baixo investimento (VIEIRA,2011).

Outro fator importante é a agitação, que pode ser mecânica, hidráulica ou pneumática. A agitação favorece o contato entre a biomassa ativa e o substrato, proporcionando maior uniformidade na formação de produtos intermediários e finais da biodigestão. Porém este processo deve ser analisado para cada sistema em particular, para verificar a maior eficiência do processo (SOARES,2017). Segundo CALDEREIRO (2015), um sistema de agitação excessiva pode perturbar os microrganismos sendo desta forma preferível uma mistura lenta. A tipologia a ser utilizada para o processo pode variar em função do tipo de reator e do teor de sólidos no digestor.

Tendo em vista todos esses parâmetros, a unidade de biodigestão escolhida para a elaboração do projeto será o modelo fluxo tubular. Este modelo apresenta baixos custos operacionais e de investimento, assim como uma alta aplicabilidade para digestão de resíduos alimentares. É um modelo semicontínuo, de digestão úmida, fluxo laminar, sem aquecimento e sem mistura (Figura 1).

**Figura 1 - Modelo de biodigestor fluxo tubular que será utilizado no projeto.**



Fonte: CIBiogás (2016).

#### 2.4.4 Condicionamento e Aproveitamento Energético do Biogás

Conforme o biogás é produzido, vai sendo armazenado no gasômetro, que se movimenta verticalmente conforme a quantidade de gás gerado. Na parte superior do gasômetro existe um mecanismo de saída e direcionamento do gás até o local de condicionamento e consumo.

O biogás gerado durante o processo de metanização é captado e direcionado a um sistema de condicionamento, de forma a tornar o biogás apto para utilização energética. A aplicação efetiva do sistema depende diretamente da eficiência dos processos de limpeza do biogás, de forma a reduzir e/ou eliminar compostos indesejáveis ao sistema de recuperação energética. Entre as principais impurezas que demandam remoção estão o sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ), água ( $H_2O_{vapor}$ ), siloxanos e partículas sólidas (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2008).

#### 2.4.5 Tratamento e Disposição Final do Digestato

É importante se estabelecer desde o início do projeto o que será feito com resíduo gerado na digestão anaeróbia, ou seja, definir se o digestato terá utilização após o processo ou se será encaminhado para disposição final adequada. Uma forma de reutilização do digestato é para a produção de biofertilizantes através da redução de sua umidade e enriquecimento mineral. Assim, o digestato pode ser utilizado como fertilizante organomineral fluido para utilização local ou comercializado em forma de grânulos (EMBRAPA, 2021).

Na Suécia a distribuição do biofertilizante ocorre por meio de tubulações enterradas, em que o biofertilizante é bombeado para as áreas próximas, evitando assim gastos com transporte e a possível contaminação do biofertilizante durante o trajeto (KARLSSON et al., 2014).

Quando o uso do digestato como biofertilizante for limitado ou inadequado, são necessários realizar tratamentos para a remoção de nitrogênio (N) e de potássio (K), para que assim possa ser disposto de maneira adequada, sem trazer impactos negativos para o meio ambiente.

Dessa forma, o digestato, quando descartado, passa por um sistema de desaguamento que objetiva promover a separação sólido-líquido, geralmente por prensas, centrífugas e desarenadores. A fração sólida pode ser compactada, empacotada e encaminhada a uma unidade de compostagem ou aterro, e a fração líquida encaminhada a estações de tratamento de efluentes (ETEs) que integram as instalações de correção da contaminação. Esse procedimento resulta em um impacto ambiental mínimo uma vez que a parte sólida do lodo empacotado contém menos de 15% de material biodegradável, não produzindo assim metano e chorume, dois dos principais efeitos negativos dos aterros tradicionais (KUNZ et al., 2019).

Em casos da parte líquida do digestato ter alto teor de carga orgânica e amônia, antes de ser descartado no sistema de tratamento de esgotos pode ser necessária o pré-tratamento desse rejeito através de uma instalação de correção da contaminação por processos de desnitrificação seguidos por sedimentadores ou sistemas de ultrafiltração seguidos por osmose reversa.

E, por fim, o armazenamento do digestato se dá em tanques que podem ou não ser equipados com misturadores para se homogeneizar o líquido antes de descarregá-lo. Além disso, esses tanques podem também ser cobertos por membranas herméticas ou por membranas que controlam odores (TABATABAEI e GHANAVATI, 2018).

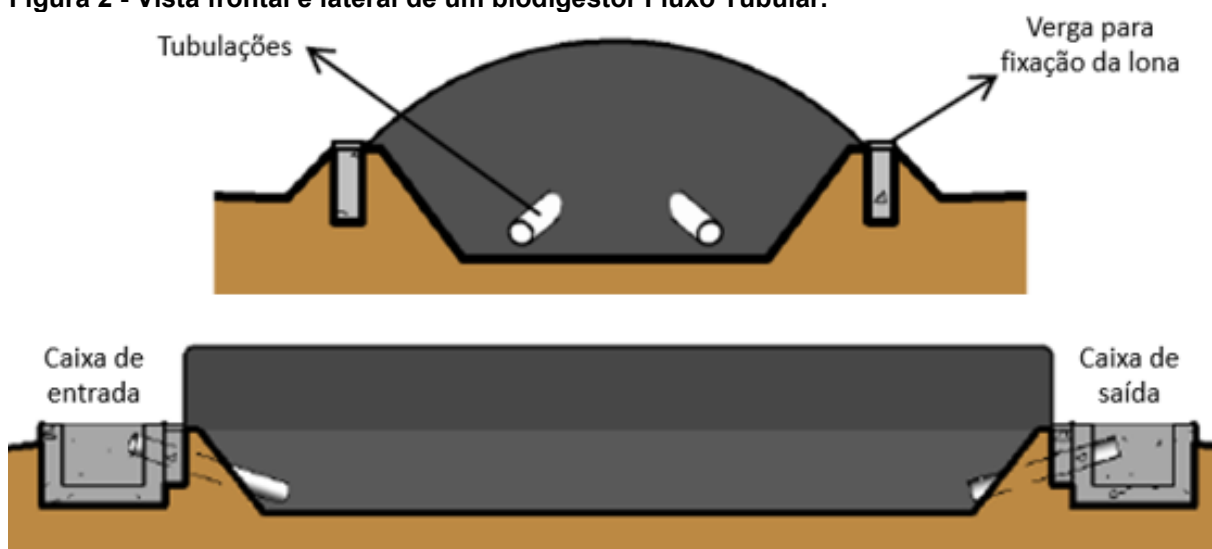
## 2.5 BIODIGESTOR FLUXO TUBULAR

O biodigestor fluxo tubular também é conhecido como plug flow, lagoa coberta, canadense ou fluxo pistão. Apresenta geometria piramidal, abaixo do nível do solo e aberturas para entrada do substrato e saída do digestato. Além disso, é

impermeabilizado em alvenaria ou com material geossintético, como PVC ou PEAD (CIBIOGÁS, 2020).

A sua área de exposição ao sol é maior, possibilitando um aumento na produção de biogás, principalmente em regiões quentes. Isto ocorre pois o comprimento deste modelo de biodigestor é maior que a sua largura e a profundidade (RICARDO, 2012), como pode ser observado na Figura 2.

**Figura 2 - Vista frontal e lateral de um biodigestor Fluxo Tubular.**



Fonte: Alves (2017).

O biogás produzido infla o material geossintético flexível (lona de PVC) que cobre a câmara. Essa cobertura serve de reservatório para o biogás produzido e pode ser retirada e limpa devido ao seu fácil manuseio (CIBIOGÁS, 2020). O fluxo do material a ser processado se dá sempre seguindo uma sequência, ou seja, os dejetos conforme vão sendo introduzidos no tanque do biodigestor vão deslocando o material mais antigo para o extremo oposto, agindo como um pistão, causando uma dispersão longitudinal mínima, com tempo de retenção hidráulica suficiente para finalizar o processo de biodigestão anaeróbia (SILVA, 2016).

Segundo Bouallagui et al. (2003), o fator mais significativo do biodigestor tubular é a sua capacidade de separar acidogênese e metanogênese longitudinalmente no biodigestor, permitindo que o biodigestor se comporte como um sistema de duas fases. Dessa maneira, o biodigestor tubular trata os resíduos anaeróbicos com alta estabilidade, alta taxa de depuração e recuperação de energia com uma boa economia de processo.

O Brasil possui uma grande experiência neste modelo de biodigestor, principalmente no tratamento de esgoto doméstico, de efluentes da agropecuária e da indústria de alimentos (PROBIOGÁS, 2015).

Assim, os biodigestores fluxo tubulares só podem receber substratos praticamente livres de sólidos, ou seja, possuem o teor de ST inferior a 5% (PROBIOGÁS, 2015). Entretanto, segundo Ciblogás (2020), para que este modelo funcione de maneira eficiente, é aconselhável que os teores de ST não ultrapassem 2%.

Uma variação deste modelo seriam as lagoas com misturador que operam substratos com um teor de ST entre 10 e 15% e apresentam maior eficiência na produção de biogás se comparada às lagoas clássicas (PROBIOGÁS, 2015).

### 2.5.1 Construção do Biodigestor

Para um projeto de dimensionamento de um biodigestor fluxo tubular são necessários os seguintes componentes: uma caixa de entrada, uma câmara de digestão, uma caixa de saída, tubulações e mantas de PVC. Tanto as caixas de entrada e saída como a câmara onde ocorrerá a biodigestão são construídas abaixo do nível do solo, em alvenaria, e por isso, precisam ser bem impermeabilizadas para não ocorrerem vazamentos no solo e como consequência poluírem o solo do local no qual o biodigestor está instalado (ALVES, 2017).

Inicialmente será construída a caixa de entrada, que armazenará o substrato. Essa caixa de entrada será conectada a câmara de digestão por meio de uma tubulação. Após a finalização a biodigestão, o subproduto digestato sai na outra ponta da câmara, a caixa de saída, também via tubulação.

Para cobrir a câmara de digestão e armazenar o biogás é utilizado a manta de PVC, que atua como gasômetro e infla conforme a produção do biogás. Nessa manta é instalada uma pequena tubulação para a saída do biogás, ligando-o até o equipamento onde ocorrerá a sua queima para a geração de energia.

Na seção da Metodologia deste trabalho será abordado mais afundo o dimensionamento deste tipo de biodigestor, com a ilustração do projeto de dimensionamento contendo os componentes descritos acima.

## 2.6 QUESTÕES OPERACIONAIS

Esta seção tratará sobre questões de operação consideradas importantes durante o funcionamento dos biodigestores, como por exemplo: legislação, medidas de segurança, partida e aquecimento do sistema de biodigestão, gerenciamento de resíduos (lodo e digestato) e remoção de impurezas do biogás gerado.

### 2.6.1 Legislação

De acordo com a Resolução SEDEST N°8, de 23 de fevereiro de 2021, a qual estabelece as definições, critérios, diretrizes e procedimentos para o licenciamento ambiental de biodigestores com aproveitamento energético de biogás no estado do Paraná, os biodigestores são classificados em quatro tipos de empreendimentos (Tabela 1).

**Tabela 1 - Classificação dos biodigestores quanto ao empreendimento.**

<b>Classificação do empreendimento</b>	<b>Finalidade</b>
Tipo I	Biodigestor a ser implantado e licenciado juntamente com o empreendimento principal, para fins de tratamento de efluentes e/ou resíduos orgânicos gerados exclusivamente na mesma planta, em empreendimentos industriais, agropecuários, saneamento e outros.
Tipo II	Especificamente para aproveitamento energético do biogás para consumo próprio e/ou distribuição, de biodigestor implantado, licenciado e em operação, vinculado ou não à um empreendimento principal. Aplica-se também para o aproveitamento energético de biogás gerado em aterros sanitários já implantados e em operação.
Tipo III	Biodigestor a ser implantado posteriormente ao empreendimento já licenciado, para fins de tratamento de matéria orgânica gerada exclusivamente pelo empreendimento, com aproveitamento energético do biogás para consumo próprio e/ou distribuição.
Tipo IV	Biodigestor a ser implantado para fins de tratamento de efluentes e/ou resíduos orgânicos, inclusive de terceiros, vinculado ou não a outra atividade/empreendimento já licenciado, com aproveitamento energético do biogás para consumo próprio e/ou distribuição.

**Fonte: Adaptado Resolução SEDEST N°8 (2021).**

Biodigestores do tipo II, são ainda classificados segundo a capacidade de utilização de biogás, em m<sup>3</sup>/h. São considerados porte mínimo se a capacidade de utilização do biogás é de até 200 m<sup>3</sup>/h, porte pequeno acima de 200 até 500 m<sup>3</sup>/h, porte médio acima de 500 até 1000 m<sup>3</sup>/h, porte grande acima de 1000 até 2000 m<sup>3</sup>/h e porte excepcional acima de 2000 m<sup>3</sup>/h.

Biodigestores do tipo III e IV são classificados também segundo a capacidade de tratamento dos efluentes líquidos e dos resíduos sólidos (de origem industrial, agropecuária, saneamento e comerciais e serviços) da seguinte maneira: porte mínimo até 200 m<sup>3</sup>/h, pequeno acima de 200 até 500 m<sup>3</sup>/h, médio acima de 500 até 800 m<sup>3</sup>/h, grande acima de 800 até 1500 m<sup>3</sup>/h e excepcional acima de 1500 m<sup>3</sup>/h.

Já biodigestores do tipo IV, para o tratamento de resíduos sólidos urbanos seguem a seguinte classificação: porte mínimo até 20 ton/dia, pequeno acima de 20 até 120 ton/dia, médio acima de 120 até 500 ton/dia, grande acima de 500 até 1000 ton/dia e excepcional acima de 1000 ton/dia.

Assim, após as classificações por tipo e porte do empreendimento, que serão definidos quais os licenciamentos necessários para a implantação dos projetos de construção dos biodigestores. Entretanto, os licenciamentos, de modo geral, deverão conter as unidades e elementos a serem instalados, desde a unidade de geração do biogás, estruturas de transporte necessárias até seu aproveitamento energético.

E ainda segundo a Resolução SEDEST N° 8, é importante ressaltar que biodigestores do tipo I não necessitam de licenciamento específico, pois já estão incorporados no licenciamento ambiental do empreendimento principal.

### 2.6.2 Seguranças na Operação de Biodigestores

Existe uma grande diversidade de perigos existentes em um digestor anaeróbio ou planta de biogás. Estes perigos estão relacionados tanto aos riscos ocupacionais e ambientais quanto a efetividade do processo de produção. O biogás, em função dos seus constituintes, apresenta perigo com relação aos riscos químicos e físicos, como por exemplo: a mistura gasosa que compõe o biogás possui propriedades asfixiantes. Outros aspectos como corrosividade e toxicidade do sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S), toxicidade da amônia (NH<sub>3</sub>), além da inflamabilidade do metano (CH<sub>4</sub>) e hidrogênio (H<sub>2</sub>) também devem ser considerados (CIBIOGAS, 2020).



Portanto, o monitoramento periódico para avaliar se existem vazamentos de gás no biodigestor, nos dutos e reservatórios é extremamente importante. A avaliação de estanqueidade do gás pode ser efetuada de diversas maneiras. Em reatores com baixo nível tecnológico (ex.: BLC em propriedades rurais) pode ser utilizada uma solução de detergente 2% em água aplicado nas conexões, válvulas, juntas de vedação e lona com o auxílio de um pincel. Dessa maneira, a ocorrência de bolhas indicará o vazamento do gás. Em níveis tecnológicos mais avançados (ex.: plantas em escala industrial) é possível monitorar os vazamentos utilizando-se câmeras especiais, que geram imagens na região do infravermelho possibilitando identificar anomalias no ar (KUNZ et al., 2019).

Para contornar problemas com excesso de pressão, é recomendável o uso de manômetros para monitoramento da pressão do gás. Entretanto, para o controle de baixas pressões em digestores que operam em pequena escala, é utilizado um sistema bastante simples chamado de selo d'água, que se trata de um tubo em "U" preenchido com água que age como um selo hidráulico (KUNZ et al., 2019).

Segundo Silva (2015), quando a produção diária exceder a capacidade de armazenamento do gasômetro, o biogás não sendo consumido pelo gerador, deve ser direcionado para um queimador denominado *flare*. O queimador é acionado automaticamente quando o monitoramento do sistema aponta a pressão limite resistida pela manta, evitando assim colapsos.

Outros fatores de risco envolvendo eletricidade e calor também devem ser considerados no projeto de um biodigestor ou planta de biogás. A preocupação com o aterramento de dutos e equipamentos deve ser considerada como precaução à eletricidade estática (evitar faíscas e descargas elétricas). Portanto, possíveis fontes de ignição devem ser avaliadas e evitadas. Uso de telefones celulares, fumar ou qualquer outra fonte de centelha ou chama não devem ser permitidas nas áreas de risco (KUNZ et al., 2019).

Segundo Oliver et al. (2008), o biodigestor apresenta risco de explosão quando o biogás está misturado com oxigênio no seu interior, isso acontece comumente no início da operação. Por isso, é indicado que se mantenha o registro de saída do biogás fechado até o gasômetro inflar pela primeira vez. Assim, após inflar recomenda-se abrir o registro, liberar o conteúdo na atmosfera e fechar em seguida.

### 2.6.3 Partida do Biodigestor

O início do processo é chamado de partida do biodigestor e envolve a inoculação do sistema, a aclimatação do substrato e as condições de carga e vazão específicas para esta fase de adaptação. O ecossistema anaeróbio se instala quando a população de microrganismos anaeróbios cresce e se desenvolve de maneira equilibrada. Segundo Rempel (2014), há necessidade de tempo, para ativar as atividades metabólicas da biodigestão.

A inoculação do sistema, ou melhor, a adição de inóculos ao substrato, tem se mostrado satisfatória para a estabilização e obtenção da flora bacteriana desejada já que os inóculos aumentam a densidade microbiana, propiciam o equilíbrio carbono/nitrogênio, e incorporam novos agentes tamponantes (REMPEL, 2014). O sistema de inoculação é basicamente a diluição dos resíduos sólidos orgânicos com inóculo, ao invés de água. Os inóculos geralmente utilizados são lodos de estações de tratamento de esgoto, lodos de biorreatores similares ou esterco animal (REMPEL, 2014).

A quantidade ideal de inóculo a ser adicionada no biodigestor deve ser calculada pela razão entre a quantidade de sólidos voláteis do substrato e do inóculo, como demonstra a Equação 4. Essa razão deve ser menor ou igual a 0,5 para que não haja acidificação por excesso de carga orgânica (ARRUDA, 2020).

$$\frac{SV_{substrato}}{SV_{inóculo}} \leq 0,5 \quad (4)$$

Segundo o Guia Prático do Biogás (2010), na partida, o biodigestor deve ser enchido no menor tempo possível, até que todas as saídas e entradas (vedações de líquidos) estejam cobertas de líquido. Durante a partida, é preciso ter em mente que no gasômetro do biodigestor pode ocorrer a formação de misturas gasosas explosivas. Por isso, o enchimento deve ocorrer rapidamente. E se não houver inóculo disponível em quantidade suficiente para a partida, recomenda-se dissolver o inóculo com água.

Após a estabilização da temperatura e do pH, o teor de metano no gás formado ultrapassar 50% e a concentração de ácidos graxos de cadeia curta ficar constantemente abaixo de 2.000 mg/L, pode-se então iniciar o carregamento de

substrato sem adição de inóculo. O carregamento deve ser crescente, sucessivo e em etapas, até que a carga máxima seja atingida.

Se a razão AI/AP aumentar e a produção de gás diminuir, indica que ocorreu um distúrbio no processo. Nesse caso, deve-se interromper o acréscimo de carga ou até mesmo reduzi-la (CIBIOGAS, 2010). Para Mantech-inc (2019), o valor de AI/AP considerado ótimo é de 0,3 e 0,4. Acima dessa faixa indicará que, há uma entrada excessiva de biomassa e, abaixo dessa faixa, há pouca entrada de biomassa.

#### 2.6.4 Sistemas de Aquecimento

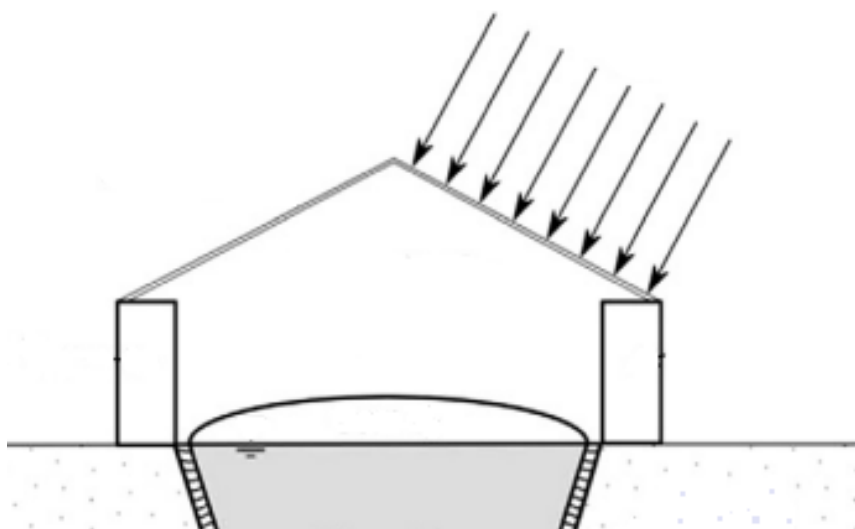
Os sistemas de aquecimento dos biodigestores podem ser através do aquecimento do substrato, da biomassa ou ainda pela circulação de água aquecida em serpentinas no interior do reator, que é a tecnologia mais adotada. Esta última tecnologia funciona como um trocador de calor, em que a água aquecida circula entre a biomassa, mantendo a temperatura desejada dentro do reator (KUNZ et al., 2019).

No caso de substratos de origem animal, como resíduos de frigoríficos, recomenda-se ainda uma etapa de pasteurização antes do substrato entrar na câmara de digestão, ou seja, esses resíduos deverão passar por um aquecimento a 70°C durante uma hora, com o objetivo de se eliminar microrganismos nocivos (KARLSSON et al., 2014).

Normalmente, biodigestores do modelo BLC não possuem sistemas de aquecimento. Essa falta de aquecimento, principalmente em regiões de grande amplitude térmica, pode provocar uma variação da temperatura da biomassa em razão da temperatura ambiente e, como consequência, afetar a capacidade de geração de biogás (KUNZ et al., 2019).

Por isso, uma alternativa para esses modelos de biodigestores, é a construção de estufas aproveitando assim o aquecimento natural. Perrigault et al. (2012) realizou um estudo com estufas, em que foi possível aumentar a temperatura da biomassa dentro do biodigestor em até 8,4 °C acima da temperatura ambiente (16,1 °C). No modelo de Perrigault, o biodigestor tubular experimental foi construído em membrana de PVC, isolado no solo com palha e integrado a uma estrutura com paredes de *adobe* (tijolos feitos de terra úmida, palha, fibras naturais, grama e secos ao sol) e teto de polietileno, como mostra a Figura 3, a seguir.

**Figura 3 - Alternativa de aquecimento para biodigestores.**



Fonte: Adaptado Perrigault et al. (2012).

Nesse sistema, a transferência de calor ocorre por meio da radiação solar que aquece a estrutura superior de polietileno, a qual troca calor com a biomassa por meio de radiação e convecção. Portanto, a construção de estufas para biodigestores tubulares é uma alternativa economicamente viável e eficiente para o sistema de aquecimento, evitando que assim o biodigestor perca calor para o ambiente.

#### 2.6.5 Gerenciamento do Digestato e do Lodo

De acordo com a resolução SEDEST nº 8, de 2021, digestato é o efluente dos biodigestores resultante da decomposição da matéria orgânica no processo de biodigestão e lodo é o resíduo formado pela sedimentação de partículas de maior granulometria e baixa biodegradabilidade que se acumula no fundo dos biodigestores de lagoa coberta. Para Kunz et al. (2019), a correta destinação desse efluente e do lodo dos biodigestores, é um dos grandes desafios para o desenvolvimento deste setor.

O digestato muitas vezes é pobre em matéria orgânica biodegradável, pois a maior parte da matéria orgânica já foi consumida no processo de biodigestão. Entretanto, é um efluente rico em nitrogênio e fósforo. Assim, quando o uso agrícola for limitado ou inadequado, esse efluente rico em nutrientes apresenta grande potencial de impacto negativo, caso seja descartado de maneira inadequada no meio ambiente. (KUNZ et al., 2019).

Além da utilização na agricultura como fertilizante, o digestato pode também passar por tratamento visando a remoção dos nutrientes que são prejudiciais ao meio ambiente, como por exemplo: o nitrogênio e o fósforo, para que assim, após o tratamento do digestato, seja possível o reuso da água residuária ou o seu lançamento em corpos hídricos receptores. Entretanto, as tecnologias de tratamento não são muito utilizadas em razão dos custos que agregam, inviabilizando economicamente o processo de biodigestão.

Por isso, costuma-se utilizar o digestato como fertilizante na agricultura para assim se evitar os custos com a implantação das tecnologias de tratamento do digestato. Contudo, é importante ressaltar que para que o digestato seja utilizado como fertilizante na agricultura, deve-se considerar alguns parâmetros como: os nutrientes presentes, nutrientes que as regiões que utilizarão o digestato necessitam e a logística para a distribuição desse fertilizante. Assim, para se realizar o aproveitamento do digestato deve-se elaborar um plano de manejo de biofertilizante que considere as características do digestato, a qualidade do solo e a rotação de cultura para determinar a forma e a aplicação do digestato (CIBIOGÁS, 2020).

A resolução SEDEST N° 8, mencionada na seção 2.6.1, além de estabelecer definições, critérios, diretrizes e procedimentos para o licenciamento ambiental de biodigestores também trata sobre os resíduos que são gerados pelo processo de biodigestão. Segundo essa resolução, a utilização do digestato para na agricultura deve estar contemplada no licenciamento do biodigestor, como também deve possuir um projeto de utilização agrícola com uma anotação de responsabilidade técnica (ART). Entretanto, caso o digestato seja lançado em um corpo receptor, deverá ser submetido a um controle e/ou tratamento antes desse lançamento.

O lançamento dos efluentes líquidos gerados no corpo receptor, só será permitido se possuírem: pH entre 5 e 9; temperatura inferior à 40°C, sendo que a elevação máxima de temperatura do corpo receptor não poderá ultrapassar 3°C; materiais sedimentáveis de até 1 mg/L em teste de 1 hora em Cone Imhoff; óleos minerais de até 20 mg/L e óleos vegetais e gorduras animais de até 50 mg/L; ausência de materiais flutuantes; DBO de até 50 mg/L e DQO de até 150 mg/L.

Ainda nesta resolução, é proibido o lançamento de efluentes líquidos em corpos hídricos superficiais utilizados ou potencialmente identificados como mananciais de abastecimento público. Além disso, os resíduos sólidos e rejeitos gerados em unidades de biodigestão, como resíduos de pré-tratamento e lodo do

biodigestor, deverão ser acondicionados, armazenados, tratados e destinados de forma técnica e ambientalmente adequadas.

#### 2.6.6 Técnicas de Remoção de Impurezas do Biogás

O biogás apresenta uma série de impurezas, com destaque para os compostos de enxofre e amônia que são corrosivos para diversos materiais, tais como: cobre, latão e aço. Segundo Ryckebosch et al. (2011), essas impurezas, se não retiradas ou tratadas, podem gerar várias consequências, como: corrosão em compressores, tanques de armazenamento e motores; formação de tóxicos; acúmulo de substâncias nos aparelhos e abrasão nas superfícies. Além disso, ao se retirar o  $\text{CO}_2$  o potencial calorífico do biogás aumenta significativamente.

Diversos materiais adsorventes como zeólitas sintéticas, carvão ativado, gel de sílica ou alumina são utilizados para remover  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  dentre outros compostos do biogás (Ryckebosch et al., 2011). Já os métodos de remoção são variados como adsorção, condensação, absorção e separação por membranas.

Segundo Kunz et al. (2019), a escolha da tecnologia de tratamento depende diretamente da vazão do biogás produzido, da composição do biogás e, principalmente, do nível de purificação do biogás que se pretende alcançar. Sistemas de tratamento mais complexos e de alto custo de implantação e operação permitirão alcançar níveis superiores de purificação do biogás, porém muitas vezes garantir alto grau de purificação não é necessário. Neste caso, sistemas de tratamento mais simples e de baixo custos poderão ser utilizados, desde que atendam aos requisitos mínimos exigidos para cada tipo de aplicação.

Para a conversão do biogás em energia elétrica não é necessário a purificação do gás, apenas o tratamento. De acordo com Kunz et al. (2019), os principais componentes que necessitam ser removidos para a aplicação do biogás em motores de combustão interna são:  $\text{H}_2\text{O}$ , material particulado, e  $\text{H}_2\text{S}$ . A quantidade de  $\text{H}_2\text{S}$  permitida é de 545 ppm a 1742 ppm dependendo do tipo de motor a ser utilizado.

Pecora (2006) desenvolveu um sistema de purificação composto por um dreno e dois tubos de absorção conectados em série. Antes do biogás ser alimentado nos tubos, passa por um recipiente conectado em "T" em altura mais baixa onde fica retida a água condensada durante sua passagem pela tubulação. Então passa para os dois tubos: o primeiro tubo é composto por sílica em gel branca e azul com a

finalidade de retirar a umidade e o segundo contém cavaco de ferro, visando assegurar a retirada de H<sub>2</sub>S. Esse sistema foi instalado na linha de captação do biogás e mostrou-se eficiente quanto à retirada de umidade e H<sub>2</sub>S.

## 2.7 CONVERSÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS

A queima do metano possibilita diversas aplicações para esse gás, que podem ser tanto pelo uso direto do calor (aquecimento, geração de vapor, secagem de materiais) ou da luz (iluminação de vias públicas), como também pela sua transformação em outras formas de energia, como: elétrica e mecânica (bombeamento do digestato) (ICLEI, 2010). Além da produção de biometano e gás carbônico (CIBIOGÁS, 2020).

A porcentagem de metano no biogás confere a sua capacidade calorífica. Tendo em vista que a composição de metano no biogás varia de 50% a 80%, o poder calorífico do biogás varia entre 5.000 e 8.000 kcal/Nm<sup>3</sup> (LIMA, 2012). Assim, o biogás é mais energético quando sua quantidade de metano for maior (Tabela 2).

**Tabela 2 - Variação do poder calorífico em relação à composição do biogás.**

<b>Composição Química do Biogás</b>	<b>Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)</b>	<b>Poder Calorífico Inferior (kcal/Nm<sup>3</sup>)</b>
10% CH <sub>4</sub> , 90% CO <sub>2</sub>	465,43	8856,066
40% CH <sub>4</sub> , 60% CO <sub>2</sub>	2338,52	3424,29
60% CH <sub>4</sub> , 40% CO <sub>2</sub>	4229,98	5136,46
65% CH <sub>4</sub> , 35% CO <sub>2</sub>	4831,14	5564,50
75% CH <sub>4</sub> , 25% CO <sub>2</sub>	6253,01	6420,59
95% CH <sub>4</sub> , 5% CO <sub>2</sub>	10469,6	8132,78
99% CH <sub>4</sub> , 1% CO <sub>2</sub>	11661,02	8475,23

**Fonte: Lima (2012).**

Dessa maneira, se torna interessante verificar a equivalência energética do biogás com outras fontes energéticas, como mostra a Tabela 3, composta por dados de diferentes estudos.

**Tabela 3 – Equivalência de 1 m<sup>3</sup> de biogás com outras fontes de energia.**

Combustível	Equivalência à 1m <sup>3</sup> de biogás			
	Barrera (1993)	Nogueira (1986)	Ferraz & Mariel (1980)	Sganzerla (1983)
Gasolina (L)	0,613	0,61	0,61	0,613
Álcool (L)	0,790	0,8	-	0,79
Querosene(L)	0,579	0,62	0,58	0,579
Óleo Diesel (L)	0,553	0,55	0,55	0,533
Gás de Cozinha GLP (L)	0,454	0,43	0,45	0,454
Lenha (Kg)	1,539	3,50	-	0,428
Eletricidade (KWh)	1,428	-	1,43	-

**Fonte: Gaspar (2003); Morais (2012).**

A divergência entre os valores possivelmente ocorreu por conta da diferença de qualidade do biogás analisado nos estudos que pode ser justificada pelo tipo de substrato, sistema de biodigestão, controle de pH, temperatura e entre outros fatores.

### 2.7.1 Geração de Energia Elétrica

A conversão do biogás em energia elétrica pode ser feita por microturbinas, turbinas a gás e motores de combustão interna (motores Otto e Diesel). Para utilização com biogás, tradicionalmente vem sendo utilizados grupos geradores de combustão interna convertidos para biogás (BIOGAS MOTORES, 2021).

O motor ciclo Otto caracteriza-se por ter sua ignição por faísca e é o equipamento mais utilizado para queima do biogás, devido ao maior rendimento elétrico e menor custo, quando comparado às outras tecnologias (ICLEI, 2010). Para promover a queima de biogás em motores ciclo Otto, são necessárias pequenas modificações nos sistemas de alimentação, ignição e taxa de compressão (ICLEI, 2010).

Segundo Çengel e Boles (2013), as eficiências térmicas para motores a combustão variam entre 35 e 40%. Já os geradores elétricos acoplados ao motor, no entanto, possuem eficiências que variam entre 82 e 92%, que são apresentadas no manual do fabricante (SILVA, 2015).

Segundo Silva (2015), para determinar as características do conjunto moto-gerador, leva-se em consideração quantas horas o conjunto ficará em funcionamento, a disponibilidade de biogás, a demanda de energia e amortização de investimentos.



Além disso, para escolher o gerador ideal é preciso calcular a sua potência necessária para atender a demanda energética.

A conversão de matéria orgânica em energia é relacionada à caracterização da quantidade de sólidos voláteis. Para isso, utiliza-se a relação entre os sólidos voláteis do substrato e a conversão em metano, em  $\text{m}^3_{\text{CH}_4}/\text{Kg}_{\text{SV}}$ . Assim, para calcular a quantidade de energia elétrica que pode ser gerada é necessário saber o potencial de metano teórico, a quantidade de sólidos voláteis do substrato, o poder calorífico inferior do metano e a eficiência do moto-gerador (Equação 5).

$$E = PM_{\text{CH}_4} \times \overline{SV} \times PCI_{\text{CH}_4} \times \varepsilon \quad (5)$$

$E$  = Energia diária produzida (kWh/dia);

$PM_{\text{CH}_4}$  = Potencial de metano ( $\text{m}^3_{\text{CH}_4}/\text{Kg}_{\text{SV}}$ );

$\overline{SV}$  = Sólidos voláteis do substrato adicionados por dia ( $\text{Kg}_{\text{SV}}/\text{dia}$ );

$PCI_{\text{CH}_4}$  = Poder calorífico inferior do metano ( $\text{kWh}/\text{m}^3_{\text{CH}_4}$ );

$\varepsilon$  = Eficiência do conjunto motor gerador (%).

### 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo apresenta a metodologia do trabalho, desde a captação de dados sobre os resíduos sólidos orgânicos do restaurante universitário da UTFPR - PR até o projeto de implantação do sistema de biodigestão dentro do campus da universidade.

Para o trabalho realizou-se uma pesquisa descritiva bibliográfica, em bibliotecas virtuais com intuito de se buscar dissertações de mestrado, teses de doutorado e artigos científicos relacionados ao tema deste trabalho.

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO SUBSTRATO

Diversos autores sugerem que a porcentagem de sólidos totais voláteis (SV) que compõem os resíduos alimentares varia na faixa de 17,1 a 27,6 % (Tabela 4).

**Tabela 4 - Composição de SV dos resíduos alimentares.**

Referência	Zhang et al. (2006)	Li et al. (2011)	Zhang et al. (2011)	Browne et al. (2012)	Zhang et al. (2013)	Probiogás (2015)	Média
%SV	26,4	22,6	17,1	27,6	21,0	19,0	22,3

Fonte: Adaptado de Rocha (2016).

O potencial energético do biogás está relacionado com a quantidade de metano em sua composição. Segundo a Probiogás (2015), a porcentagem de metano da biodigestão de restos de alimentos é de 55 a 60%.

Para a estimativa do potencial de produção de biogás e conversão de metano utilizou-se os valores encontrados na literatura para resíduos orgânicos de grandes geradores de resíduos de alimentos. Segundo a Probiogás (2015), o potencial máximo de metano médio para esse tipo de substrato é de  $0,488 \text{ Nm}^3_{\text{CH}_4} \cdot \text{kg}_{\text{SV}}^{-1}$  e o potencial de produção de biogás é de  $0,850 \text{ Nm}^3 \cdot \text{Kg}_{\text{SV}}^{-1}$ . Esta escolha se deu, pois é a opção que mais se assemelha ao proposto por este trabalho, já que os dados do estudo de referência foram obtidos através de resíduos orgânicos de grandes geradores como cozinhas, restaurantes e cantinas.

## 3.2 PROPOSIÇÃO DO MODELO A SER IMPLANTADO NA UNIVERSIDADE

Nesta seção serão propostos o modelo e as condições necessárias para a implantação do sistema de biodigestão no campus da UTFPR – PG.

### 3.2.1 Área de Estudo

O biodigestor fluxo tubular será implantado no campus da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, localizado na Rua Doutor Washington Subtil Chueire, nº 330, Jardim Carvalho, Ponta Grossa – PR, CEP 84017-220.

O município de Ponta Grossa está localizado à 966 metros acima do nível do mar e de acordo com a classificação climática de Köppen - Geiger, Ponta Grossa possui o clima temperado oceânico, com verão ameno. Neste tipo de clima todas as estações são úmidas e o verão é moderadamente quente e fresco. E a temperatura média da cidade é de 18,3 °C (CLIMATE-DATA.ORG, S.I.).

A área dentro do campus sugerida pelos autores para a implantação do biodigestor será a área marcada em vermelho na Figura 4, de latitude -25.053141 e longitude -50.129915. A escolha dessa área se deu por ser próxima ao RU, facilitando assim a gestão dos resíduos gerados que serão utilizados como substrato.

**Figura 4 - Área de implantação do biodigestor no campus da UTFPR – PG.**



Fonte: Adaptado de Google Maps (2021).

### 3.2.2 Armazenamento

O Restaurante Universitário do campus será a fonte de geração dos resíduos orgânicos que serão utilizados como substrato no biodigestor. Segundo Tabatabaei e Ghanavati (2018), os resíduos orgânicos que são separados na própria fonte de geração possuem a quantidade de fração orgânica mais alta. Entretanto, é importante ressaltar que sempre existem riscos de contaminação, como por exemplo: papéis, plásticos, metais e outros corpos estranhos.

Para a separação dos resíduos será proposto a colocação de duas lixeiras, uma apenas para os restos de alimentos dos pratos dos alunos e outra dentro da cozinha para os alimentos crus que não serão utilizados na preparação das refeições, por exemplo: cascas de legumes e ovos. Assim, ao final do período do almoço e da janta no RU, os resíduos de dentro dessas duas lixeiras serão transferidos para outro recipiente com a capacidade adequada para armazenar a quantidade de resíduos orgânicos gerados diariamente. Esse recipiente pode ser uma lixeira container para lixo orgânico (Figura 5), ou então, opções mais viáveis seriam uma caixa d'água com tampa ou qualquer recipiente que seja tampado. Os resíduos orgânicos ficarão armazenados nesses recipientes aguardando a etapa de pré-tratamento, a qual será abordada na próxima seção deste trabalho.

**Figura 5 - Exemplo de lixeira para a destinação dos resíduos orgânicos do RU.**



**Fonte: LixLimp (2021).**

Para evitar contaminações no próprio resíduo orgânico e como forma de evitar que este recipiente se transforme em um ponto de proliferação de vetores e doenças, é importante que eles sempre permaneçam tampados e, se possível, localizados em uma área coberta.

Além disso, corpos estranhos que estejam misturados a esses resíduos e que sejam visíveis, devem ser retirados pela pessoa que for responsável pela realização desta etapa da geração de biogás. Também será importante conscientizar os alunos e funcionários do RU da importância da separação correta dos resíduos orgânicos evitando assim problemas futuros na sequência do processo.

### 3.2.3 Pré-Tratamento

O pré-tratamento mecânico ocorrerá pela trituração dos resíduos em um triturador adequado (Figura 6), posicionado acima da caixa de entrada. Ao ser triturado, o substrato cairá dentro da caixa de entrada por força da gravidade e será diluído até o teor de ST igual a 2% por meio da adição de água e misturado manualmente.

Para assegurar a pressão dentro do tanque de biodigestão, é importante garantir que o nível de substrato na câmara de entrada esteja pelo menos 5 cm acima do nível do substrato no interior do tanque de biodigestão (NAZARO, 2019).

Após passar pelo pré-tratamento e cair na câmara de entrada, quando acionada a válvula de entrada, o resíduo percorrerá em uma tubulação onde será gradualmente direcionado por gravidade para dentro do tanque de biodigestão de forma ordenada e contínua.

**Figura 6 - Triturador para resíduos orgânicos.**



**Fonte: Indiamart (2002).**

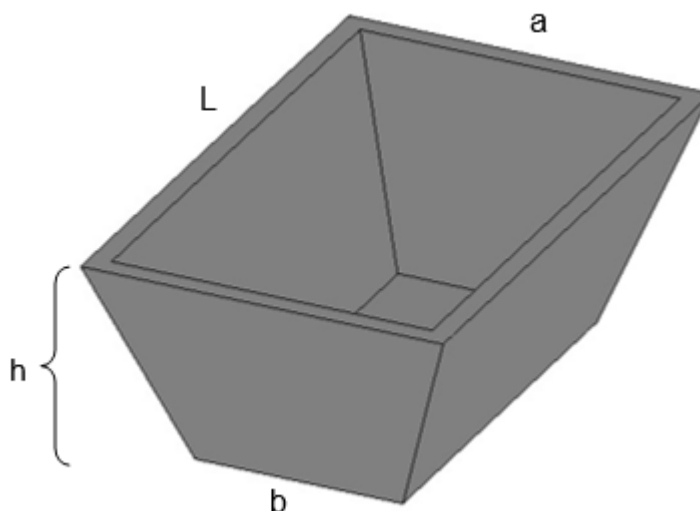
### 3.2.4 Dimensionamento do Biodigestor Fluxo Tubular

O dimensionamento correto do biodigestor é um fator importante para garantir a eficiência do processo. Se as dimensões não estiverem adequadas, o tempo de retenção crítico poderá não ser alcançado. Como consequência, não será atingido o potencial total de geração de metano e o processo permitirá o acúmulo de fluxos estagnados dentro do biodigestor.

Segundo Tabatabaei e Ghanavati (2018), antes de iniciar o dimensionamento é importante definir os parâmetros a seguir para a operação do biodigestor: tipo de digestão (seca ou úmida), temperatura do processo (psicrofílica, mesofílica ou termofílica), tecnologia (batelada, semicontínua ou contínua) e quantidade de estágios. Ainda segundo os autores acima, todo projeto de uma usina de biogás deve se iniciar com a seleção de matéria prima, que no caso deste trabalho serão os resíduos orgânicos provenientes do RU, e deve finalizar com qual será a utilização dos produtos: digestato (biofertilizante) e biogás (energia).

Dessa maneira, os parâmetros de operação para este projeto serão: digestão úmida, temperatura psicrofílica devido à ausência de sistemas de aquecimento, alimentação semicontínua, fluxo laminar, de único estágio e sem mistura. Os biodigestores fluxo tubulares apresentam o formato de um trapézio invertido com a superfície superior retangular (Figura 7).

**Figura 7 - Exemplificação do formato do biodigestor fluxo tubular.**



**Fonte: Autoria própria (2021).**

Segundo Alves (2017), para o dimensionamento é necessário estabelecer o volume do biodigestor, o qual deve estar de acordo com a quantidade de resíduos produzidos pelo RU diariamente, o tempo de retenção hidráulica adequado para o tipo de substrato e o teor de sólidos permitidos para a digestão úmida. Assim,

$Q_{RO}$  = Quantidade de resíduos orgânicos coletados do RU por dia (Kg/dia);

$V_{RO}$  = Quantidade de resíduos orgânicos coletados do RU por dia (L/dia).

É importante destacar que para o modelo de biodigestor que será implantado, a tolerância de ST é de até 2%, como recomenda o Clbiogás (2020). E o teor de SV dos resíduos orgânicos de grandes geradores é em média 90% dos sólidos totais (PROBIOGÁS, 2015). Portanto, é possível determinar o valor de ST com base da média de SV da Tabela 4, da seção 3.1. Portanto, calcula-se a massa de sólidos presentes nos resíduos orgânicos gerados diariamente (Equação 6).

$$M_{Sd} = \frac{\%SV}{90} \times Q_{RO} \quad (6)$$

$M_{Sd}$  = Massa de sólidos totais do substrato diária (Kg/dia);

$SV$  = Porcentagem de sólidos voláteis do substrato (%).

Definido a quantidade de sólidos totais diária, calcula-se a massa da solução final ( $M_{H_2O}$ ), em  $Kg_{H_2O}/dia$ , para que a concentração de ST da solução que entrará no biodigestor seja igual a 2% (Equação 7).

$$M_{H_2O} = \frac{M_{Sd}}{ST_{final}} \quad (7)$$

$M_{H_2O}$  = Massa final diária ( $Kg_{H_2O}/dia$ )

$ST_{final}$  = 0,02 de sólidos totais ( $Kg_{ST}/Kg_{H_2O}$ ).

Como a  $M_{H_2O}$  refere-se à massa de água, a partir da densidade da  $H_2O$ , encontraremos o volume de  $H_2O$  adicionado diariamente ( $V_{H_2O}$ ), em litros, para que a solução final tenha a concentração de 2% de ST. Assim, o volume diário final ( $V_{final}$ ) é

igual à soma do volume do resíduo diário e do volume de água adicionado diariamente (Equação 8).

$$V_{final} = V_{RO} + V_{H2O} \quad (8)$$

Para o dimensionamento na câmara do biodigestor fluxo tubular é necessário considerar o tempo de carregamento (TC) conforme o tempo de retenção hidráulico (TRH) estabelecido para o projeto. Para a biodigestão de resíduos orgânicos, o valor encontrado na literatura para o TRH é de 30 dias. Entretanto, aos finais de semana o biodigestor não será alimentado, por isso, para o cálculo do dimensionamento só serão considerados os dias de carga do biodigestor (TC), que será igual a 22 dias. Assim, o volume total da câmara do biodigestor ( $V_{TB}$ ) será obtido através da multiplicação do  $V_{final}$ , em  $m^3$ , pelo tempo de carregamento, em dias, como mostra a Equação 9.

$$V_{TB} = V_{final} \times TC \quad (9)$$

$V_{TB}$  = Volume do biodigestor ( $m^3$ );

$TC$  = Tempo de carregamento (dia).

Segundo Alves (2017), com o volume total da câmara de biodigestor é possível determinar o volume geométrico da câmara ( $V_{GB}$ ), assim como as suas dimensões (Equação 10). Bartholomeu et al. (2007), recomenda que o volume geométrico de instalação seja 30% maior que o volume total calculado do biodigestor, para assegurar assim um volume de segurança.

$$V_{GB} = 1,3 \times V_{TB} = \frac{(a + b)}{2} \times h \times L \quad (10)$$

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

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

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

$h$  = Altura do trapézio (m);



$L$  = Comprimento do biodigestor (m).

O ângulo de inclinação das paredes (talude) considerado será igual a  $110^\circ$  que é uma referência média (ALVES, 2017). Assim, o ângulo alfa ( $\alpha$ ), que é igual a subtração do ângulo reto dos  $110^\circ$ , será igual a  $20^\circ$ . A relação entre o comprimento ( $L$ ) e a largura ( $a$ ) adotada para o projeto será igual a 1:5 (FEIDEN et al., 2004). E para a altura, serão consideradas as seguintes relações conforme a Tabela 5, a seguir.

**Tabela 5 - Altura ideal para cada faixa de volume do biodigestor fluxo tubular.**

Volume do biodigestor (m <sup>3</sup> )	Altura ideal (m)
Até 100	1,5
Entre 100 e 500	2,5
Entre 500 e 2000	3,5
Acima 2000	4,5

Fonte: Adaptado Alves (2017).

Substituindo as correlações na Equação 10, encontramos:

$$V_{GB} = \frac{(a + b)}{2} \times h \times 5 \times a \quad (11)$$

Assim, para encontrarmos os valores de  $a$  e  $b$  da Equação 11 será utilizada a ferramenta *solver* do Excel.

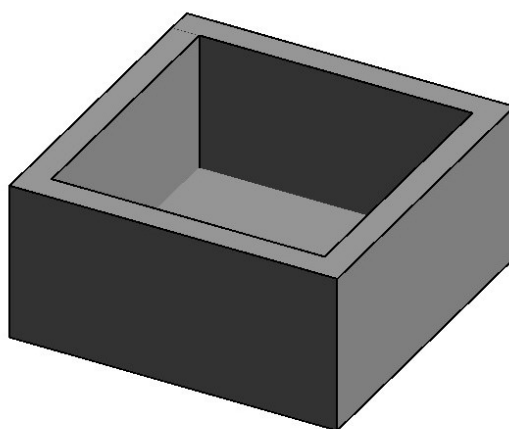
Segundo Alves (2017), a caixa de entrada deve possuir volume 20% maior que a quantidade de resíduos orgânicos gerados por dia pelo RU ( $V_{final}$ ) e a caixa de saída deve ser de três vezes o volume da caixa de entrada. Segundo Gonçalves et al. (2018), a altura das caixas deve ser de 1 m, dessa maneira, ambas apresentarão o formato quadrado (Figura 8) e o dimensionamento seguirá as Equações 12 e 13, respectivamente.

$$V_{caixa,e} = V_{final} \times 1,2 = h_{caixa,e} \times (L_{caixa,e})^2 \quad (12)$$

$$V_{caixa,s} = 3 \times V_{caixa,e} = h_{caixa,s} \times (L_{caixa,s})^2 \quad (13)$$

$V_{caixa,e}$  = Volume da caixa de entrada ( $m^3$ );  
 $V_{final}$  = Volume de resíduo orgânico diário ( $m^3$ );  
 $h_{caixa,e}$  = Altura da caixa de entrada (m);  
 $L_{caixa,e}$  = Comprimento da caixa de entrada (m);  
 $V_{caixa,s}$  = Volume da caixa de saída ( $m^3$ );  
 $h_{caixa,s}$  = Altura da caixa de saída (m);  
 $L_{caixa,s}$  = Comprimento da caixa de saída (m).

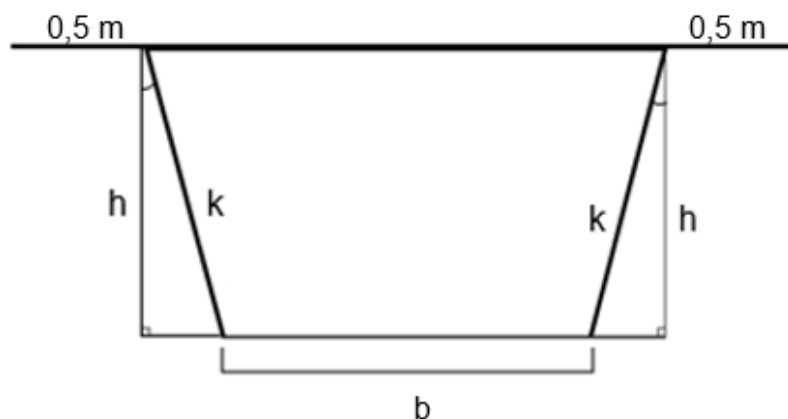
**Figura 8 - Exemplificação do formato das caixas de entrada e saída do biodigestor.**



Fonte: Autoria própria (2021).

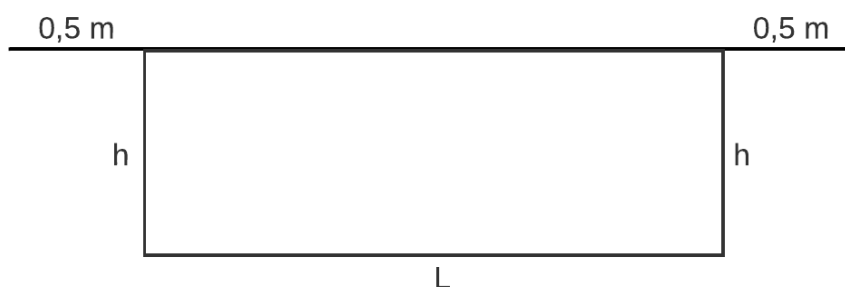
O dimensionamento da lona de PVC para a impermeabilização do biodigestor será baseado no perímetro do comprimento e da largura do biodigestor como exemplificam as Figuras 9 e 10, a seguir.

**Figura 9 - Vista frontal do biodigestor para dimensionamento da lona de impermeabilização.**



Fonte: Autoria própria (2021).

**Figura 10 - Vista lateral do biodigestor para dimensionamento da lona de impermeabilização.**



**Fonte: Autoria própria (2021).**

Assim, calcula-se a medida da lateral da lona de impermeabilização e do comprimento da lona pelas Equações 14 e 15, respectivamente.

$$L_{lona,imp} = 1,05 \times (0,5 + k + b + k + 0,5) \quad (14)$$

$$C_{lona,imp} = 1,05 \times (0,5 + h + L + h + 0,5) \quad (15)$$

O valor de  $k$  das Equações 14 e 15 é obtido por meio da relação trigonométrica (Equação 16), considerando o ângulo  $\alpha$  igual a  $20^\circ$ .

$$\cos \alpha = \frac{h}{k} \quad (16)$$

O valor de 0,5 m refere-se ao tamanho das bordas para fixar a lona no solo e o valor de 1,05 é uma medida de segurança, de 5% a mais do valor final, caso ocorram dilatações ou contrações no material.

A área da lona ( $A_{caixas}$ ), em  $m^2$ , colocada na parte superior das caixas para fechá-las seguirá a Equação 17, substituindo o valor respectivo da parede de cada caixa. Como no caso da lona de impermeabilização, o valor de 0,5 m corresponde ao tamanho das bordas para fixar a lona no solo.

$$A_{caixas} = (L_{lona})^2 = (0,5 + L_{caixas} + 0,5)^2 \quad (17)$$

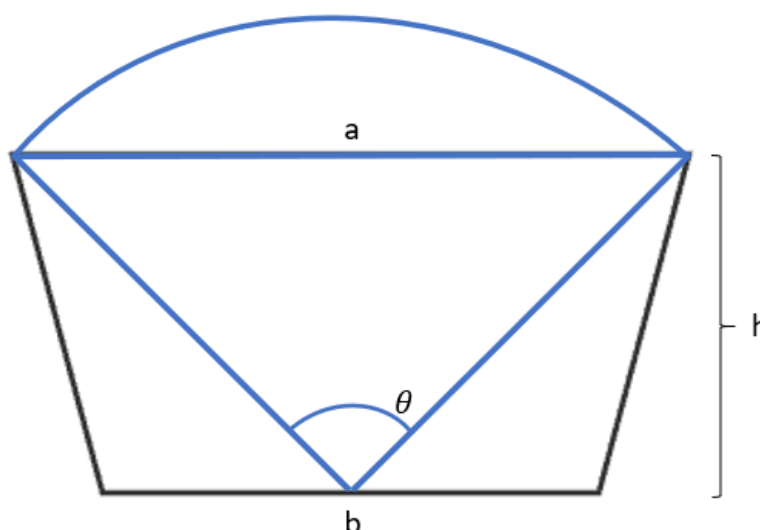
### 3.2.5 Captação e Purificação do Biogás

Segundo Azevedo et al. (2004), para o dimensionamento do gasômetro, deve-se levar em consideração a demanda diária de gás, a curva de variação da demanda em função da hora do dia e a taxa de produção de gás pelo digestor. Recomenda-se que os reservatórios ou gasômetros tenham capacidade de armazenar pelo menos 50% da produção diária do biodigestor para biodigestores de pequeno porte. Porém para este estudo, por falta de dados do período de queima do biogás pelo motorizador, podemos considerar o volume do gasômetro igual a produção diária de biogás.

Portanto, após definir o volume do gasômetro desejado, faz-se os cálculos para saber a área da lona de vedação, através da ferramenta *solver* do Excel. As relações trigonométricas feitas são mostradas a seguir.

Fez-se um arco na geometria frontal do biodigestor, que ligou as  $a$  e  $b$  formando um ângulo  $\theta$  (Figura 11). As áreas do arco e do triângulo interno são dadas pelas Equações 18 e 19, respectivamente. Com isso, calcula-se o volume do gasômetro calculado, dado pela diferença entre as áreas do arco e do triângulo interno, multiplicada pelo comprimento  $L$  do biodigestor (Equação 20).

**Figura 11 - Exemplo do arco e ângulo formado no biodigestor para o cálculo do gasômetro.**



Fonte: Autoria própria (2021).

$$A_c = \frac{\theta \times \pi r^2}{360^\circ} \quad (18)$$

$A_c$  = Área do arco ( $m^2$ );

$\theta$  = Ângulo do arco (m);

$r$  = Raio do arco (m).

$$A_t = \frac{a \times h}{2} \quad (19)$$

$A_t$  = Área do triângulo ( $m^2$ );

$a$  = Largura maior do biodigestor (m);

$h$  = Altura do biodigestor (m).

$$V_{g_{calculado}} = (A_c - A_t) \times L \quad (20)$$

$V_{g_{calculado}}$  = Volume do gasômetro calculado ( $m^3$ );

$L$  = Comprimento do biodigestor (m).

A ferramenta *solver* realizou cálculos dinâmicos do “ $V_{g_{calculado}}$ ” de forma que o lado  $a$  não variou, mas o ângulo  $\theta$ , o raio  $r$  e a altura  $h$  puderam variar para maiores e menores volumes. A partir disso, encontrou-se os valores de raio e ângulo ideais para se chegar no volume do gasômetro desejado.

Com os valores de raio e ângulo ideais, calculou-se o comprimento de arco da lona de vedação (Equação 21). E adicionou-se 15% para sua verga de fixação.

$$C_{arco} = \left( \frac{\theta_d \times 2\pi \times r_d}{360^\circ} \right) \times 1,15 \quad (21)$$

$C_{arco}$  = Comprimento do arco da lona de vedação (m);

$\theta_d$  = Ângulo do arco desejado (m);

$r_d$  = Raio do arco desejado (m).

Por fim, calculou-se a área da lona de vedação utilizando-se o comprimento do biodigestor encontrado na seção anterior (Equação 22).

$$A_{vedação} = (C_{arco} \times L) \times 1,15 \quad (22)$$

$A_{vedação}$  = Área da lona de vedação ( $m^2$ );

$C_{arco}$  = Comprimento do arco da lona de vedação (m);

$L$  = Comprimento do biodigestor (m).

A lona de vedação pode ser feita de manta de PVC flexível de 1mm de espessura, e a ligação do biodigestor ao grupo gerador pode ser feita através de uma tubulação em PVC de 100 mm (SILVA, 2015).

O sistema de purificação será feito por um sistema drenagem, seguido por duas peneiras moleculares de adsorção conectadas em série. Primeiro o biogás passa pelo dreno, que retém a água condensada da tubulação, como na Figura 12.

**Figura 12 - Exemplo de dreno.**



**Fonte: Oliver (2008).**

E em seguida, o biogás passa por duas peneiras moleculares. A primeira peneira irá retirar a umidade por sílica em gel branco e azul e a segunda irá retirar o  $H_2S$  por cavaco de ferro.

### 3.2.6 Disposição do Digestato e do Lodo do Biodigestor

Como foi visto na seção 2.6.5 deste trabalho, sobre o gerenciamento do digestato e do lodo acumulado no fundo do biodigestor, ambos os resíduos gerados deverão estar incluídos no licenciamento no biodigestor e as áreas na quais eles serão dispostos deverão possuir licenciamento também e para a utilização do digestato

como fertilizante deverá ser elaborado o Projeto de Utilização Agrícola com a respectiva ART.

Além disso, é importante ressaltar que as tecnologias para o tratamento de ambos os resíduos não fazem parte do tema deste trabalho, mas será assegurado que na implantação do biodigestor fluxo tubular todas as medidas estejam de acordo com a resolução SEDEST nº 8, de 2021, para que não sejam criados prejuízos ao meio ambiente.

Entretanto, fica como sugestão das autoras que tanto o digestato como o lodo sejam submetidos a análises nos laboratórios da universidade, para que assim, sejam conhecidas as características de cada resíduo como também o nível de toxicidade de ambos para o meio ambiente. Também fica como opção a busca por unidades agrícolas que queiram utilizar o digestato gerado como fertilizante em suas propriedades.

E para o descarte adequado ou destinação como fertilizante, no caso do digestato, ambos deverão ser armazenados em tanques fechados para aguardar o transporte, o qual deve ser realizado por empresas licenciadas e de confiança, pois segundo o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (2010), o gerador é responsável até a destinação final do resíduo. Por isso, é importante que para a destinação final esses resíduos sejam tratados e se tornem adequados ambientalmente para este tipo de descarte.

### 3.3 PRODUÇÃO TEÓRICA DE BIOGÁS

Para estimarmos a produção de biogás que será alcançada pelo projeto do biodigestor fluxo tubular deste trabalho, precisamos inicialmente estabelecer a quantidade de resíduos orgânicos gerados mensalmente em quilogramas. Caso a quantidade fornecida seja em litros, precisaremos converter em quilograma a partir da densidade dos resíduos sólidos orgânicos (Equação 23).

$$M_{RO} = \rho_{RO} \times V_{RO} \quad (23)$$

$M_{RO}$  = Massa de resíduos orgânicos (Kg/mês);

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

$V_{RO}$  = Volume de resíduos orgânicos (L/mês).

Feito isso, é verificada a quantidade de sólidos voláteis ( $SV_{RO}$ ) que está presente em  $M_{RO}$ . Segundo dados da Tabela 4, em substratos de restos de alimentos a concentração de SV é em média 22,3%. Assim, os  $SV_{RO}$  presentes são encontrados como na Equação 24 e a partir desse valor, a produção de biogás é calculada (Equação 25).

$$SV_{RO} = \% \overline{SV} \times M_{RO} \quad (24)$$

$SV_{RO}$  = Quantidade de sólidos voláteis (Kg<sub>SV</sub>/mês);

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

$$\text{Produção de biogás} = P_{PB} \times \overline{SV}_{ro} \quad (25)$$

A incógnita  $P_{PB}$  se refere ao potencial de produção de biogás, e  $\text{Nm}^3 \cdot \text{Kg}_{SV}^{-1}$ . E como consta na seção 3.1, o valor utilizado será de  $0,850 \text{ Nm}^3 \cdot \text{Kg}_{SV}^{-1}$  (PROBIOGÁS, 2015). Dessa forma, encontraremos o valor mensal correspondente à produção de biogás em  $\text{Nm}^3$  e converteremos para  $\text{m}^3$ .

### 3.4 CONVERSÃO TEÓRICA DE ENERGIA

Para estimar a energia térmica do biogás é preciso saber o potencial máximo de metano cujo cálculo se dá a partir da quantidade mensal de sólidos voláteis do substrato e o potencial teórico de produção de metano (Equação 26).

$$PM_{CH_4} = PM_{CH_4 \text{ teórico}} \times \overline{SV}_{ro} \quad (26)$$

$PM_{CH_4}$  = Potencial máximo de metano ( $\text{Nm}^3_{CH_4}$ /mês);

$PM_{CH_4 \text{ teórico}}$  = Potencial teórico de metano ( $\text{Nm}^3_{CH_4}$ /Kg<sub>SV</sub>).

$SV_{RO}$  = Quantidade de sólidos voláteis (Kg<sub>SV</sub>/mês);



O valor de  $PM_{CH_4\text{teórico}}$  será de  $0,488 \text{ Nm}^3_{CH_4} \cdot \text{Kg}_{SV}^{-1}$  como consta na seção 3.1. E assim, com o potencial máximo de metano, é possível calcular o ganho energético em energia térmica (Equação 27).

$$E_{t\acute{e}rmica} = PM_{CH_4} \times PCI_{CH_4} \quad (27)$$

$E_{t\acute{e}rmica}$  = Energia térmica do biogás produzido mensalmente (kWh/mês);

$PM_{CH_4}$  = Potencial máximo de metano ( $\text{Nm}^3_{CH_4}/\text{mês}$ );

$PCI_{CH_4}$  = Potencial calorífico inferior do metano ( $\text{kWh}/\text{Nm}^3_{CH_4}$ ).

A conversão em energia elétrica do biogás depende do tipo da máquina térmica e do gerador utilizado. Considerou-se o valor médio de 37,50% para a eficiência de motores a combustão interna e o rendimento do gerador igual a 87%, uma vez que geradores apropriados para essas máquinas apresentam rendimentos na faixa entre 82 e 92%, como consta na seção 2.7.1. Assim, a energia elétrica pode ser calculada (Equação 28).

$$E_{el\acute{e}trica} = Energia\ t\acute{e}rmica \times \varepsilon_{MAQ} \times \varepsilon_{GER} \quad (28)$$

$E_{el\acute{e}trica}$  = Energia elétrica do biogás produzido mensal (kWh/mês);

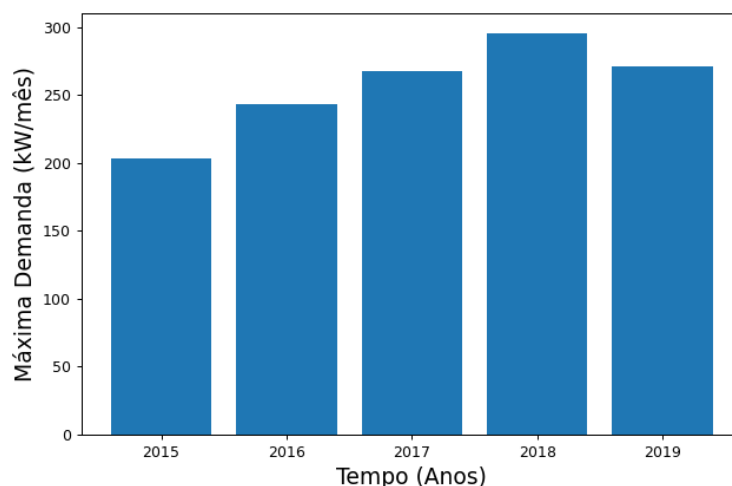
$E_{t\acute{e}rmica}$  = Energia térmica do biogás produzido mensalmente (kWh/mês);

$\varepsilon_{MAQ}$  = Eficiência do motor (%);

$\varepsilon_{GER}$  = Eficiência do gerador(%).

#### 3.4.1 Escolha do Moto-Gerador

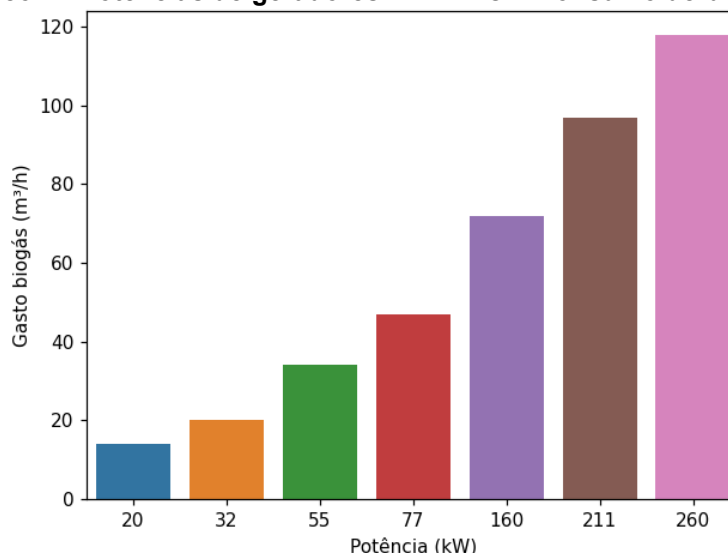
Como dito na sessão 2.7.1, para o dimensionamento do moto-gerador, é preciso definir um gerador com potência adequada para suprir a demanda energética da UTFPR. Através do histórico de faturas energéticas disponibilizado pela comissão de gestão e uso de energia da UTFPR-PG, fez-se um gráfico resumido indicando as demandas máximas de energia de cada ano, entre os anos 2016 e 2019 (Gráfico 3).

**Gráfico 3 - Demanda máxima energética da UTFPR entre 2016 e 2019.**

**Fonte: Autoria própria (2021).**

A maior demanda energética do período foi de 295kW no mês de abril de 2018. Portanto a potência ideal de gerador para abastecer toda a universidade seria maior ou igual a 295kW.

Todavia, é necessário que a produção de biogás seja suficiente. O Gráfico 4 mostra a relação entre a potência de grupos geradores da marca ERMAC e a queima de biogás por hora.

**Gráfico 4 - Potências de geradores ERMAC® x Consumo de biogás.**

**Fonte: Enermac (2021).**

Segundo o Gráfico 4 e as especificações da ficha técnica do moto-gerador de potência de 260 kW (Enermac, 2021), o consumo de biogás deste modelo é de 118

m<sup>3</sup> de biogás, composto por 65% de metano, por hora de funcionamento do moto-gerador. Portanto, é possível indicar o moto-gerador correspondente à produção de biogás calculada na seção 3.3.

## 4 RESULTADOS

Para a obtenção dos dados referentes à quantidade de resíduos sólidos orgânicos produzidos pelo restaurante universitário foi feita uma abordagem quantitativa, para se estimar a média das refeições diárias e média diária aproximada de alimentos desperdiçados.

### 4.1 GERAÇÃO ESTIMADA DE RESÍDUOS DA UNIVERSIDADE

Para a estimativa de resíduos orgânicos gerados considerou-se o descarte de sobra de comida dos pratos na lixeira e as sobras de alimentos no preparo na cozinha. Segundo informações fornecidas pelo presidente da comissão de resíduos da universidade, no período anterior a pandemia, entre novembro e outubro de 2019, diariamente o restaurante universitário fornecia cerca de 700 refeições por dia, gerando aproximadamente 100L de resíduos orgânicos diários.

Silva e Santos (2009) consideram que a densidade para a fração de matéria orgânica presente em RSU coletados seja igual a 1.213 kg/m<sup>3</sup>. Dessa forma, a quantidade de 100L equivaleria a aproximadamente 121,3 kg/dia de resíduos orgânicos e 2.668,6 kg/mês, considerando 22 dias letivos no mês.

### 4.2 DIMENSIONAMENTO DA PLANTA DO BIODIGESTOR FLUXO TUBULAR

Como foi definido na seção 4.1, a massa de resíduos orgânicos gerados por dia ( $Q_{RO}$ ) na universidade é em média de 121,3 kg/dia, a tolerância de ST da solução que entrará no biodigestor tem que ser de 2% e a quantidade de SV presente nos resíduos orgânicos considerada será de 22,3%. Assim, calcula-se a massa de sólidos totais presentes nos resíduos orgânicos gerados diariamente (Equação 29).

$$M_{sd} = \frac{22,3(\%)}{90(\%)} \times 121,3 \left( \frac{Kg}{dia} \right) = 30,05 \frac{Kg}{dia} \quad (29)$$

Definido a massa seca  $M_{sd}$ , faz-se a diluição para 0,02 Kg<sub>ST</sub>/Kg<sub>H<sub>2</sub>O</sub> (Equação 30).

$$M_{H_2O} = \frac{30,05 \left( \frac{Kg_{ST}}{dia} \right)}{0,02 \left( \frac{Kg_{ST}}{Kg_{H_2O}} \right)} = 1502,5 \frac{Kg_{H_2O}}{dia} \quad (30)$$

Considerando a densidade da H<sub>2</sub>O igual a aproximadamente 1 Kg/L, encontraremos o volume final diário de água (V<sub>H<sub>2</sub>O</sub>) igual a 1502,5 L<sub>H<sub>2</sub>O</sub>/dia, para que a solução final que entrará no biodigestor tenha a concentração desejada. Assim, o volume diário final é igual à soma do volume de 100 L de resíduo diário e do volume de água adicionada V<sub>H<sub>2</sub>O</sub> (Equação 31).

$$V_{final} = 100 \left( \frac{L}{dia} \right) + 1502,5 \left( \frac{L}{dia} \right) = 1602,5 \frac{L}{dia} \quad (31)$$

Para o dimensionamento na câmara do biodigestor considerou-se o tempo de carregamento de 22 dias para se garantir assim um TRH de 30 dias como recomendado na seção 3.2.4. Assim, o volume final da câmara do biodigestor (V<sub>TB</sub>) convertido para m<sup>3</sup>, será obtido pela Equação 32.

$$V_{TB} = 1,60 \left( \frac{m^3}{dia} \right) \times 22(dias) = 35,25 m^3 \quad (32)$$

Com isso, será possível então calcular o volume geométrico do biodigestor (Equação 33).

$$V_{GB} = 1,3 \times 35,25 = 45,84 m^2 \quad (33)$$

De acordo com a Tabela 5, da seção 3.2.4, como o volume do biodigestor encontrado é menor que 100 m<sup>3</sup>, a altura ideal para o biodigestor será de 1,5 m. Portanto, a partir da Equação 34 encontraremos os valores de a e b do biodigestor, por meio da ferramenta *solver* do Excel.

$$45,8 = \frac{(a + b)}{2} \times 1,5 \times 5 \times a \quad (34)$$

Assim, os valores de a, b e L do biodigestor serão iguais a 2,84 m, 1,47 m e 14,18 m, respectivamente.

O volume da caixa de entrada será igual a 1,92 m<sup>3</sup>, pois deve ser 20% maior que a quantidade de resíduos orgânicos gerados por dia pelo RU de 1,6 m<sup>3</sup>/dia. Dessa forma, considerando o padrão para a altura da caixa de entrada de 1 m, as laterais da caixa de entrada serão iguais a 1,39 m.

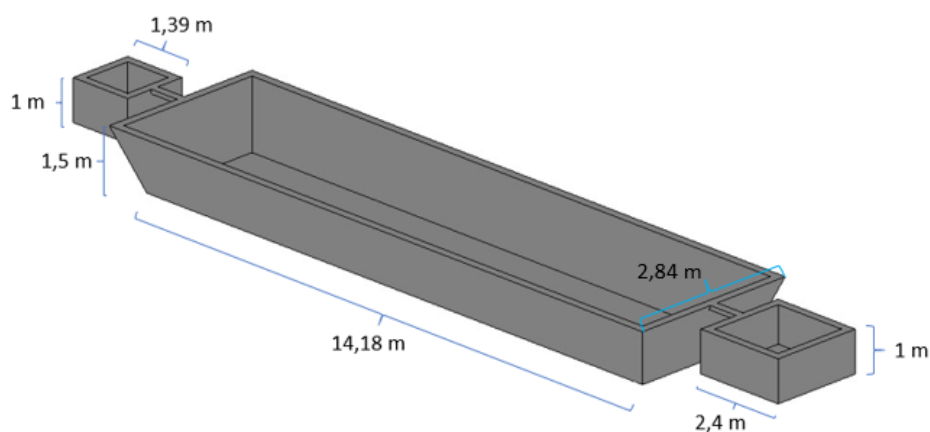
A caixa de saída possuirá 1 m de altura também, no entanto, deve ser três vezes maior que a caixa de entrada. Logo, o volume da caixa de saída será de 5,77 m<sup>3</sup> e as paredes terão 2,4 m de largura. As Figuras 13, 14 e 15 exemplificam o modelo final do biodigestor feito pelo *software* REVIT e as respectivas dimensões.

**Figura 13 - Vista superior do biodigestor e as respectivas dimensões.**



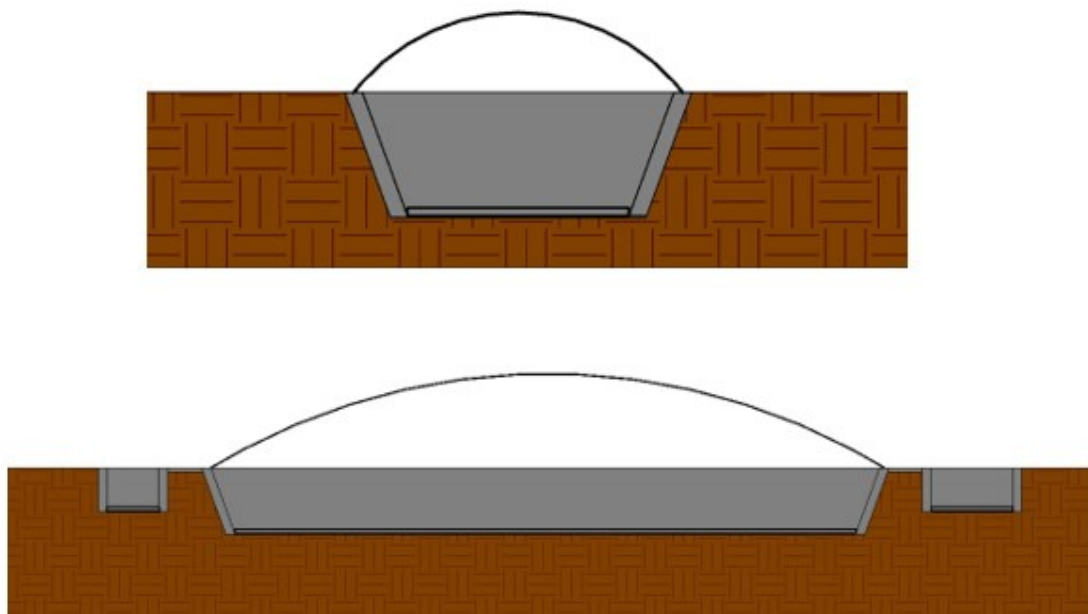
Fonte: Autoria própria (2021).

**Figura 14 - Dimensões reais do biodigestor e das caixas de entrada e saída.**



Fonte: Autoria própria (2021).

**Figura 15 – Corte da seção transversal e da seção longitudinal do biodigestor.**



**Fonte: Autoria própria (2021).**

De acordo com o dimensionamento do biodigestor realizado acima, a lona de PVC para a impermeabilização do biodigestor terá  $113,59 \text{ m}^2$ , com comprimento de  $19,09 \text{ m}$  e largura de  $5,95 \text{ m}$ . E as lonas que cobrirão a parte superior das caixas de entrada e saída, servindo como tampas, terão  $5,71 \text{ m}^2$  e  $11,56 \text{ m}^2$ , respectivamente. O lado para a lona da caixa de entrada será de  $2,39 \text{ m}$  e o lado para a caixa de saída será de  $3,4 \text{ m}$ .

#### 4.3 PRODUÇÃO ESTIMADA DE BIOGÁS

A produção de biogás corresponde à um período de biodigestão de cerca de 30 dias, em que durante 22 dias há entradas diárias de substrato no biodigestor e durante 8 dias não há pois aos sábados e domingos o RU não gera resíduos. Portanto, a quantidade de biogás de um ciclo representa no final a produção mensal de biogás.

Através dos dados da sessão 3.1 e das Equações 24 e 25 da seção 3.3 espera-se que os  $2.668,6 \text{ Kg}$  de resíduos sólidos orgânicos gerados mensalmente no restaurante universitário possuam em média  $595 \text{ Kg}$  de SV e que o potencial de

produção de biogás seja de  $0,85 \text{ Nm}^3 \cdot \text{Kg}_{\text{SV}}^{-1}$ . Assim, a produção estimada de biogás seria equivalente a Equação 35.

$$\text{Produção de biogás} = 0,85 \left( \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}_{\text{SV}}} \right) \times 595 \left( \frac{\text{kg}_{\text{SV}}}{\text{mês}} \right) = 505,83 \frac{\text{Nm}^3}{\text{mês}} \quad (35)$$

Por se tratar de um gás, a unidade utilizada ( $\text{Nm}^3$ ) é uma convenção padrão de medida, na qual são considerados valores de referência para temperatura, pressão e umidade relativa iguais a:  $0^\circ\text{C}$ , 1 atm e 0%, respectivamente. Utilizando parâmetros de referência da cidade de Ponta Grossa (temperatura:  $19^\circ\text{C}$ ; altitude: 966 metros; e umidade relativa: 76,5%) referentes aos meses de janeiro a maio do ano de 2021, encontrou-se o valor de produção de biogás igual a  $626 \text{ m}^3/\text{mês}$ .

#### 4.4 DIMENSIONAMENTO DO GASÔMETRO

Levando em consideração o volume do gasômetro igual a produção diária de biogás, dividiu-se a quantidade mensal produzida de  $626 \text{ m}^3/\text{mês}$ , pelo tempo de retenção hidráulica de 22 dias. Assim, obteve-se o valor de  $28,45 \text{ m}^3/\text{dia}$  e fez-se cálculos iterativos pela ferramenta *solver* do Excel para encontrar o ângulo de arco ideal e o raio correspondente que foram iguais a  $109,5^\circ$  e  $1,73 \text{ m}$ , respectivamente.

Dessa maneira, o comprimento do arco da lona de vedação foi calculado e adicionado de 15% para sua fixação (Equação 36).

$$C_{\text{arco}} = \left( \frac{109,5^\circ \times 2\pi \times 1,73}{360^\circ} \right) \times 1,15 = 3,8\text{m} \quad (36)$$

A área da lona de vedação pôde ser calculada multiplicando-se o comprimento do arco com o comprimento do biodigestor e adicionado 15% para fixação lateral (Equação 37).

$$A_{\text{vedação}} = (3,8 \times 14,18) \times 1,15 = 61,97 \text{ m}^2 \quad (37)$$



A escolha do moto-gerador pode ser feita a partir da quantidade diária de biogás produzida de 28,45 m<sup>3</sup>/dia considerando que todo o biogás acumulado será consumido por pelo menos 1 hora por dia durante os dias úteis. O modelo da marca Ermac de potência contínua de 40kVA / 32KW pode ser utilizado devido ao seu consumo de 20 m<sup>3</sup>/h de biogás (ERMAC, 2019).

#### 4.5 PRODUÇÃO ESTIMADA DE ENERGIA

Para calcular o potencial máximo de metano conforme a Equação 26 da seção 3.4, utilizou-se o potencial teórico de metano de 0,488 Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>.Kg<sub>SV</sub><sup>-1</sup> e a quantidade de entrada de sólidos voláteis mensais de 595 Kg<sub>SV</sub>/mês (Equação 38).

$$PM_{CH_4} = 0,488 \left( \frac{Nm^3_{CH_4}}{kg_{SV}} \right) \times 595 \left( \frac{kg_{SV}}{mês} \right) = 290,36 \frac{Nm^3_{CH_4}}{mês} \quad (38)$$

O poder calorífico inferior de metano (PCI) foi encontrado na Tabela 2, para biogás com 60% de metano, segundo a qualidade do biogás advinda de restos de alimentos referenciada na seção 3.1. O valor do PCI encontrado foi de 5136,46 kcal/Nm<sup>3</sup> (5,97 kWh/Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>). Com isso, calculou-se a energia térmica (Equação 39).

$$E_{térmica} = 290,36 \left( \frac{Nm^3_{CH_4}}{mês} \right) \times 5,97 \left( \frac{kWh}{Nm^3_{CH_4}} \right) = 1733,45 \frac{kWh}{mês} \quad (39)$$

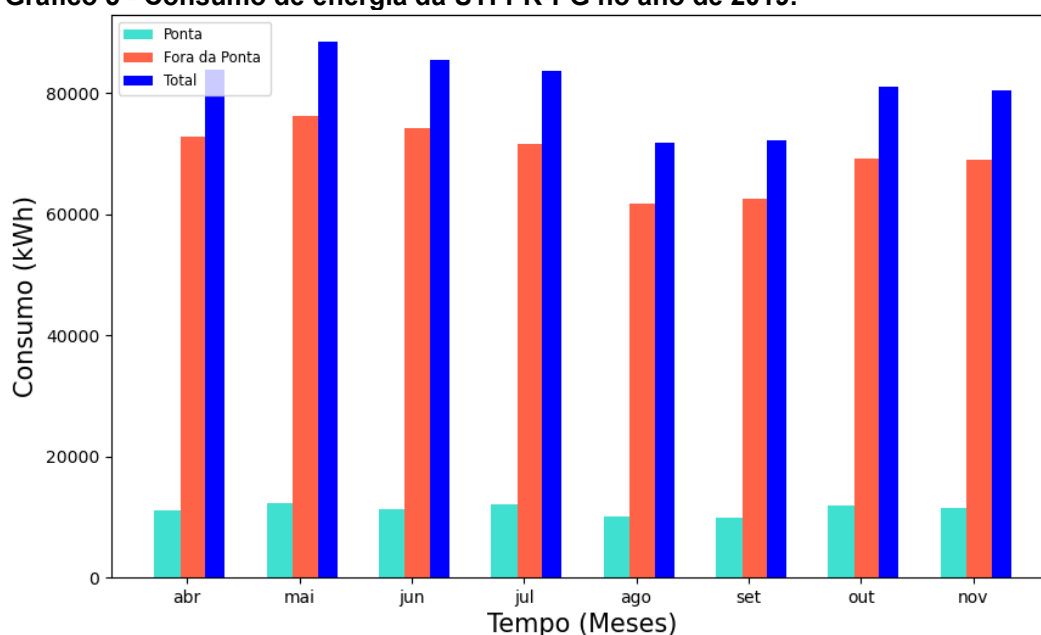
Finalmente, a quantidade de energia elétrica produzida a partir da queima do biogás utilizando eficiências do motor e gerador iguais a 37,5% e 87%, respectivamente, foi de 565,54 kWh/mês (Equação 32).

$$Energia\ Elétrica = 1733,45 \left( \frac{kWh}{mês} \right) \times 37,5(\%) \times 87(\%) = 565,54 \frac{kWh}{mês} \quad (32)$$

#### 4.6 COMPARATIVO ENERGÉTICO NA UNIVERSIDADE

O Gráfico 5 mostra as faturas de consumo de energia da universidade durante os meses de abril a novembro do ano de 2019. O valor da tarifa cobrada ao poder público foi de R\$1,963 na ponta e R\$0,517 fora da ponta. A média do consumo total foi de 80.885,25 kWh mensal, implicando em um gasto mensal médio de aproximadamente R\$58.086,27.

**Gráfico 5 - Consumo de energia da UTFPR-PG no ano de 2019.**



**Fonte: A autoria própria (2021); Contas de energia da UTFPR-PG.**

A partir dessas informações e com a estimativa de geração de energia elétrica a partir do biogás, pode-se fazer uma análise comparativa do quanto o uso do biogás poderia reduzir o consumo de energia da UTFPR-PG.

Nesse sentido, tem-se que a energia elétrica gerada proporcionaria uma redução no consumo de energia em torno de 0,7% por mês. Embora não aparente ser algo tão expressivo, resulta em uma diminuição do consumo médio mensal de energia elétrica em torno de 565,54 kWh e uma redução no gasto de energia de cerca de R\$405,75 em relação ao gasto médio mensal e R\$1110,15 em relação ao gasto médio mensal nos horários de ponta. Tal valor, apesar de parecer inexpressivo para a universidade, equivale a mais de 3,5 vezes o consumo médio mensal de uma residência no Brasil de 158kWh (EPE, 2018).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após o desenvolvimento deste trabalho, pode-se perceber que o projeto de implantação e funcionamento do biodigestor fluxo tubular na prática, não é um projeto que apresenta grandes dificuldades, já que possui uma vasta adaptabilidade da construção dos componentes, facilitando assim a construção e diminuindo gastos com o projeto.

Com base nos dados obtidos e na pesquisa bibliográfica realizada, foi possível observar que o desperdício orgânico mensal do RU, é suficiente para gerar energia elétrica através do biodigestor, com um abatimento de 565,54 kWh nas despesas mensais da universidade, o que equivaleria a R\$1110,15 nos horários de ponta.

Investir no projeto da implantação do biodigestor significa trazer um retorno financeiro benéfico para a universidade, com relação ao valor abatido na conta de energia, por exemplo. Além disso, o funcionamento do biodigestor estará garantido por um longo tempo fornecendo energia para a universidade, já que o substrato utilizado será ilimitado, enquanto o RU estiver funcionando dentro do campus.

Portanto, a discussão da correta destinação dos resíduos sólidos orgânicos é de grande valia, pois o seu emprego traz inúmeros benefícios no âmbito ambiental, social, educativo e econômico. A produção de biogás pela universidade proporcionará a economia de gastos com tarifas energéticas, e ao mesmo tempo contribuirá para a redução de emissão de poluentes atmosféricos.

Além disso, a implantação deste projeto será de grande importância para o desenvolvimento acadêmico dos estudantes, possibilitando também o surgimento de outros projetos e atividades que poderão ser desenvolvidos por alunos da graduação, do mestrado ou do doutorado da própria universidade, evitando assim custos com terceiros e aumentando a gama de projetos desenvolvidos pela universidade, pois a construção do biodigestor engloba áreas de todas as engenharias ofertadas pelo campus de Ponta Grossa.

Assim, espera-se que este trabalho possa difundir a obtenção de energia elétrica ou química através de resíduos sólidos orgânicos e se torne referência para outros projetos na mesma área.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após a realização e análise deste trabalho foram considerados alguns pontos pelas autoras que melhorariam os resultados obtidos e questões que não foram abordadas pelo trabalho, mas que poderiam ser temas de outros trabalhos. Assim, recomenda-se que sejam considerados para a realização de trabalhos futuros:

- Utilização de um sistema de aquecimento no biodigestor, como foi visto na seção 2.6.4 deste trabalho;
- Utilização de misturadores no biodigestor;
- Utilização dos resíduos gerados pela biodigestão (digestato e lodo);
- Tecnologias de tratamento de biogás;
- Utilização do biogás como substituinte de GLP;
- Utilização do biogás como produção de biometano;
- Dimensionamento do conjunto moto-gerador ideal através do estudo de demanda parcial de energia da UTFPR-PG;
- Análise de viabilidade econômica de realização do projeto;
- Análise de viabilidade econômica entre cenários econômicos;
- Análise de viabilidade econômica entre cenários de diferentes utilizações do biogás;
- Aproveitamento de resíduos orgânicos de podas de grama do campus como substrato;
- Interferência da utilização do sal de cozinha (cloreto de sódio) nas refeições para o processo de biodigestão;
- Controle e simulação para a garantia do ambiente estável do biodigestor e eficiência do processo.

## REFERÊNCIAS

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. Brasil. 2020

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. Brasil. 2019

ABNT. **NBR 10004**: resíduos sólidos – classificação. 2ª ed. Rio de Janeiro, 2004.

ALVES, A.M. **Desenvolvimento de um aplicativo computacional para dimensionamento técnico e econômico de biodigestores tipo tubular**. 2017. 105 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, 2017.

ARRUDA, H. J. **Avaliação da viabilidade técnica e econômica da produção de biogás a partir de resíduo do processamento industrial de vegetais**. 2020. 67 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2020.

AZEVEDO, M.; et al. **Cogeração de energia utilizando o biogás do esgoto sanitário realizado na Companhia de Saneamento do Paraná – SANEPAR**. 2004. 100 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Medianeira, 2004.

BARRERA, P. **Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para a zona rural**. São Paulo: Ícone, 1993, p. 11.

BARTHOLOMEU, M.; et al. Formulação do modelo de otimização da qualidade do biogás em um biodigestor de modelo tubular: um estudo de caso no município de Conchas – SP. São Paulo, **Revista de Economia e Administração**, v6, 2007.

BEUX, S. **Avaliação do tratamento de efluentes de abatedouro em biodigestores anaeróbicos de duas fases**. 99p. Dissertação de Mestrado em Ciências e Tecnologia de Alimentos, Universidade de Ponta Grossa – UEPG/PR, Ponta Grossa, 2005.

BIOGAS MOTORES. Grupo Gerador a Diesel GGD 80. Disponível em : <<https://biogasmotores.com.br/produto/14-grupo-gerador-a-diesel-ggd-80>>. Acesso em: 30 jun. 2021.

BOUALLAGUI.H.; et al. **Mesophilic biogas production from fruit and vegetable waste in a tubular digester**. Bioresource Technology, Tunísia, 2003.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010; altera a lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.** Ministério do Meio Ambiente. Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União. Brasília-DF. 2010.

BRASIL. **Resolução SEDEST nº. 8, de 23 de fevereiro de 2021.** Estabelece definições, critérios, diretrizes e procedimentos para licenciamento ambiental de biodigestores com aproveitamento energético de biogás no âmbito do Estado do Paraná. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=410825>>. Acesso em: 15 jul. 2021.

CALDEREIRO, G. M. B. **Caracterização da digestão de resíduos agroindustriais em biodigestor de fluxo contínuo operado em escala real 2015.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2015

CIBIOGÁS. **Curso de operacionalização de biodigestores.** Foz do Iguaçu, 2016.

CIBIOGÁS. **Fundamentos do biogás:** características e aplicações do biogás e do digestato. Foz do Iguaçu, 2020. 52 p.

CIBIOGÁS. **Fundamentos do biogás:** operação e manutenção de plantas de biogás, arranjos de viabilidade econômica e panorama do biogás. Foz do Iguaçu, 2020. 14 p.

CIBIOGÁS. **Fundamentos do biogás:** conceitos básicos e digestão anaeróbia. Foz do Iguaçu, 2020. 57 p.

CIBIOGÁS. **Fundamentos do biogás:** operação e manutenção de plantas de biogás, arranjos de viabilidade econômica e panorama do biogás. Foz do Iguaçu, 2020. 49 p.

CETESB. **Biogás: Pesquisas e projetos no Brasil.** São Paulo, 2006.

ÇENGEL, Y.A.; BOLES, M.A. **Termodinâmica.** 7ª Ed. Editora Mcgraw-hill Interamericana, 2013.

CHERNICHARO, C. A. L. **Anaerobic Reactors:** Biological Wastewater Treatment Series. Vol4, Minas Gerais: IWA, 2007.

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

EMBRAPA. **Digestato.** Disponível em: <<https://www.embrapa.br/suinos-e-aves/biogasfert/fertilizantes/dejetos-fertilizantes/fertilizante-fluido/digestato>> Acesso: 01 julho. 2021.

EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2027**. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2018

ENERMAC. **Grupo gerador a Biogás: descubra qual o gerador ideal para o seu projeto**. Disponível em: <<https://enermac.com.br/grupo-gerador-biogas>>. Acesso em: 20 jul. 2021.

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

FERREIRA, B .O . **Avaliação de um sistema de metanização de resíduos alimentares com vistas ao aproveitamento energético do biogás**. Dissertação (Mestrado) –Programa De Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal De Minas Gerais. Belo Horizonte, 2015.

GASPAR, R.M. **Utilização de Biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na região de Toledo-PR**. Dissertação (Mestrado) –Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas. Florianópolis, 2003.

GONÇALVES, A. D.; et al. **Dimensionamento e análise da viabilidade técnica e econômica de um biodigestor tubular**. 2018. 31 f. Instituto Federal de Minas Gerais – MG, 2018.

GOOGLE. **Google Maps**, c2021. Página inicial. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/@-25.0521448,-50.1306182,675m/data=!3m1!1e>>. Acesso em: 27 de jun. De 2021.

HOBSON, P. N.; WHEATLEY, A. D. **Anaerobic digestion: modern theory and practice**. Londres: Elsevier Applied Science, 1993. 269p.

ICLEI. **Governos locais pela sustentabilidade. Manual para aproveitamento de biogás Volume 2: Efluentes Urbanos**. São Paulo, 2010.

IEA. **Outlook for biogas and biomethane: prospects for organic growth**. 2020.

INDIAMART. **Triturador de Resíduos Orgânicos**. Disponível em: <<https://www.indiamart.com/proddetail/organic-waste-shredding-machine-kwik-shredder-11159523848.html>>. 2002. Acesso em: 15 jul. 2021.

IPCC. **Climate Change and Land: An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and**

greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Disponível em: <[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/08/4.SPM\\_Aproved\\_Microsite\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/08/4.SPM_Aproved_Microsite_FINAL.pdf)>. Acesso em: 18 set. 2021.

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

KELLEHER, B. P.; et al. Advances in poultry litter disposal technology – a review **Bioresource Technology**. v.83, p. 27-36, 2002.

KUNZ, A.; et al. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. 1. ed. Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2019.

KUNZ, A.; MUKHTAR, S. **Hydrophobic membrane technology for ammonia extraction from wastewaters**. Engenharia Agrícola, v. 36, p. 377-386, 2016.

LEBUHN, M.; BAUER, C. A. **Probleme der biogasproduktion aus nachwachsenden Rohstoffen im Langzeitbetrieb und molekularbiologische Analytik**. VDLUFA-Schriftenreihe 64, 2008, p. 118-125.

LIMA, A.G. **Avaliação do potencial energético do biogás produzido no reator UASB da ETE-UFES**. Vitória, 2012.

MANTECH INC. Disponível em: <<https://mantech-inc.com/blog/automated-fos-tac-ratio-cod-biogas-applications/>> 2019. Acesso em: jul. 2021.

MAZZUCCHI, O. A. J. **Biodigestor rural**. São Paulo, CESP, 1980. 29p.

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

NAZARO, M.S.; NOGUEIRA, M.A. **Desenvolvimento de um biodigestor residencial para tratamento dos resíduos sólidos orgânicos**. Florianópolis, 2019.

OLIVER, A.P. M. et al. **Manual de treinamento em biodigestão**. Salvador: Winrock, 2008.

OLIVEIRA, P.A.V. **Tecnologias para manejo de resíduos na produção de suínos - Manual de boas práticas**. 01. ed. Concórdia - SC: Embrapa, 2004. v. 01. 109 p.

PECORA, V. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da usp – estudo**



**de caso. Dissertação (Mestrado)** – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

PERRIGAULT, T.; et al. Towards thermal design optimization of tubular digesters in cold climates: A heat transfer model. **Elsevier: bioresource technology**, v. 14, n. 124, p. 259-268, nov. 2012.

PINTO, C. P. **Tecnologia da digestão anaeróbia da vinhaça e desenvolvimento sustentável**. 1999. 147 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Planejamento de Sistemas Energéticos, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1999.

PONTA GROSSA CLIMA (BRASIL). **Climate-data.org**, S.I. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/parana/ponta-grossa-4493/>>. Acesso em: 27 de jun. de 2021.

PROBIOGÁS. **Guia técnico**: de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto. Brasília, 2015. 186 p.

PROBIOGÁS. **Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil**: substratos, digestores e uso do biogás. Brasília, 2015. 87 p.

REMPEL, N. **Biodigestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos consorciado com glicerina**. São Leopoldo, 2014.

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

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

RYCKEBOSCH, E.; DROUILLON, M.; VERVAEREN, H. **Techniques for transformation of biogas to Biomethane, Biomass & Bioenergy**, v. 35, n.5, p. 1633-1645, 2011.

SILVA, M. A.; SANTOS, G. O. **Densidade aparente de resíduos recém coletados**. 2009. 5 f. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará. Fortaleza, 2009.

SILVA, J.E.P. **Avaliação Técnica E Econômica De Um Biodigestor De Fluxo Tubular: Estudo De Caso Do Modelo Implantado Na ETEC “Orlando Quagliato” Em Santa Cruz Do Rio Pardo**, sp. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, UNESP. Botucatu, 2016.

SILVA, F.P. **eficiência energética de uma unidade de microgeração de energia elétrica a partir do biogás da suinocultura**. Cascavel, 2015.

SOARES, C.M.T.; FEIDEN, A.; TAVARES, S.G. **Fatores que influenciam o processo de digestão anaeróbia na produção de biogás**. *Revista de Nativa*, Sinop (MT), v. 5, p. 509-514, dez. 2017.

SOUZA, M. E. Fatores que influenciam a digestão anaeróbia. *Revista DAE*, v. 44, n.137, jun. 1984.

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

VIEIRA, A.C.A 2005. 88 f. **Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos: Desafios e Tecnologias**. Dissertação (Mestrado) – Núcleo de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, 2011.

XU, J. K.; SUN, R.C. **Recent advances in alkaline pretreatment of lignocellulosic biomass**. In: MUSSATO, S. I. Biomass fractionation technologies for a lignocellulosic feedstock based biorefinery. Amsterdam: Elsevier, 2016. ch. 19, p.431-459.