

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**ALESSANDRO LUIS SCHNEIDER WAPPLER**

**ELABORAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM BIODIGESTOR PARA USO  
RESIDENCIAL URBANO**

**Bagé  
2022**

**ALESSANDRO LUIS SCHNEIDER WAPPLER**

**ELABORAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM BIODIGESTOR PARA USO  
RESIDENCIAL URBANO**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado para o Curso de Engenharia Química da Universidade Federal do Pampa como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup> Tânia Regina de Souza.

**Bagé  
2022**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

W252e Wappler, Alessandro Luis Schneider

Elaboração e avaliação de um biodigestor para uso  
residencial urbano / Alessandro Luis Schneider Wappler.  
59 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade  
Federal do Pampa, ENGENHARIA QUÍMICA, 2022.

"Orientação: Tania Regina de Souza".

1. meio ambiente. 2. resíduos orgânicos. 3. biomassa. 4.  
biogás. 5. biodigestor. I. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal do Pampa

**ALESSANDRO LUIS SCHNEIDER WAPPLER**

**ELABORAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM BIODIGESTOR PARA USO RESIDENCIAL URBANO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Química da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Química.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 17 de março de 2022.

Banca examinadora:

---

Profa. Dra. Tânia Regina de Souza  
Orientadora  
UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Alexandre Denes Arruda  
UNIPAMPA

---

Prof. Dra. Sabrina Neves da Silva

UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **TANIA REGINA DE SOUZA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 22/03/2022, às 15:46, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ALEXANDRE DENES ARRUDA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 22/03/2022, às 16:01, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **SABRINA NEVES DA SILVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 22/03/2022, às 18:03, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0761422** e o código CRC **A642D408**.

---

Referência: Processo nº 23100.004128/2022-33 SEI nº 0761422

## AGRADECIMENTOS

Sou profundamente grato a todas as pessoas que encontrei ao longo da minha vida, e que fizeram parte desta minha jornada, me transferindo grandes ensinamentos que vieram a me preparar ao longo de minha formação acadêmica, das quais cito algumas que foram fundamentais neste agradecimento.

A minha mãe, que sempre me nutriu de valores que levarei para a vida, e principalmente sempre buscou me dar condições de estudar e me graduar, pois para ela que nunca teve condições de estudar, o conhecimento é o bem mais precioso que pode ser proporcionado a alguém.

Aos meus amigos de Uruguaiana, que sempre estiveram torcendo pelo meu sucesso, e estimularam a crescer e conquistar meus objetivos, mesmo distantes sempre me deram forças para superar as minhas adversidades.

Aos meus muitos amigos que fiz durante a graduação: Taynara Fernandes, Jamile Gabriele, Erica e Thais Peres, Bruna Modkovski, Natasha e Amanda, Fernanda Muniz a equipe da atlética (Beatriz e Pablo, Elton, Gustavo, Mariana Sodré, Marília, Matheus Maydana, Rafael Colares e Sherlen) que conheci em Bagé e que me acolheram, os quais estiveram ao meu lado durante esse tempo. E com eles tive o apoio e amparo para suportar as noites sem dormir, as semanas de provas, os trabalhos em grupo, assim como as dificuldades cotidianas de morar em uma cidade distante com uma cultura e estilo de vida muito diferentes. Dentre eles destaco Stefany De Los Santos Moreira, Thaciana Dos Santos Moreira, que foram minhas grandes companheiras e minha segunda família em Bagé, as quais eu pude contar em todos os momentos, bons ou difíceis, e sem elas não teria conseguido concluir este curso.

Aos meus colegas de república, Rafael Cougo, Gabriel Ladeia e Camila Goergen. Com os quais morei durante o tempo que residi em Bagé, os quais me ajudaram a ter um lar mesmo longe de casa e da minha família, onde eu tive condições de focar no meu estudo e aprendizado, mas também me propiciaram lições que levarei para vida como ter e respeitar o espaço e o tempo do próximo, a ter um pensamento em prol do coletivo e ser um adulto autossuficiente. Em especial ao Rafa, que me apoiou de tantas formas que merece uma dedicatória exclusiva para si e que sem ele minha graduação teria sido muito mais difícil!

E por fim, mas não menos importante, a minha orientadora Tânia Regina, que conheci no início da minha graduação, que me aceitou como orientando de projeto no meu segundo semestre mesmo que sem nenhuma experiência, a qual se tornou uma referência por sempre me apoiar e acreditar nas minhas muitas ideias malucas de projetos de pesquisa, e principalmente

no meu potencial (inclusive em momentos que nem eu acreditava). Sempre estive a disposição para me aconselhar e orientar nos diferentes momentos da minha graduação desde o início, até o estágio e por fim no trabalho de conclusão!

## RESUMO

Diariamente a população produz toneladas de lixo orgânico e grande parte desse volume é descartada de forma incorreta na natureza devido à falta políticas públicas, desencadeando em diversos problemas ambientais. Pensando em buscar formas de reduzir uma parcela do lixo descartado incorretamente em locais inadequados, a proposta deste trabalho é buscar fazer uso deste material para gerar energia por meio da produção anaeróbia de biogás fazendo uso de um biodigestor projetado para atender a geração de resíduos de uma residência com três moradores. Os resíduos gerados serão a única matéria prima utilizada como biomassa, para ser convertida em biogás e posteriormente ser empregado como substituinte ao GLP e, desta forma, aumentar o poder aquisitivo das famílias brasileiras. O processo de conversão da biomassa em biogás é feito no interior de um biodigestor realizado por diferentes grupos de bactérias seguindo as premissas do processo para máximo rendimento tais como: características dos nutrientes, relação C/N, temperatura, pH, tempo de residência no biodigestor. O biodigestor foi projetado utilizando-se materiais recicláveis ou de baixo custo, permitindo que qualquer pessoa possa produzir um biodigestor para sua residência. Para esse trabalho o equipamento teve um custo ponderado de confecção (valor inicial de R\$ 553,40) considerando o valor de um salário-mínimo. Durante o processo avaliativo foi realizado a utilização de 22,82 kg de resíduos orgânicos permitindo a obtenção de uma média produtiva de 0,22 litros de biogás por dia para uma temperatura ambiente na faixa de 30 °C. Foi perceptível que a produção foi maior conforme maior era a temperatura ambiente.

Palavras-chave: Meio ambiente. Resíduos orgânicos. Biomassa. Biogás. Biodigestor. Energias renováveis.



## **ABSTRACT**

Daily the population produces tons of organic waste and a large part of this volume is incorrectly discarded in nature, triggering several environmental problems. Thinking about looking for ways to reduce a portion of the garbage discarded incorrectly, the proposal of this work is to seek to make use of this material to generate energy through the anaerobic production of biogas using a biodigester designed to meet the waste generation of a residence with three residents. The waste generated will be the only raw material used as biomass, to be converted into biogas, and later be used as a substitute for LPG and thus increase the purchasing power of Brazilian families. The process of converting biomass into biogas is carried out inside a biodigester carried out by different groups of bacteria following the process premises for maximum yield such as: nutrient characteristics, C/N ratio, temperature, pH, residence time in the biodigester. The biodigester was designed to be made from recyclable or low-cost items, allowing anyone to produce a biodigester for their home. For this work, the equipment had a weighted cost (initial value of R\$ 553.40) considering the value of a minimum wage. During the evaluation process, 22.82 kg of organic waste was used, allowing for a production average of 0.22 liters of biogas per day for an ambient temperature in the range of 30 °C. It was noticeable that the production was higher the higher the ambient temperature.

**Keywords:** Environment. Organic waste. biomass. biogas. Biodigester. Renewable energy.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Composição do biogás.....	18
Figura 2 - Etapas de produção do biogás .....	25
Figura 3 - Esquema de um biodigestor modelo Indiano .....	28
Figura 4 - Esquema de um biodigestor modelo Chinês .....	29
Figura 5 - Esquema de um biodigestor do modelo Canadense .....	30
Figura 6 - Esquema de um reator UASB .....	31
Figura 7 - Esquema de um biodigestor em batelada .....	32
Figura 8 - Posições dos furos na bombona e tampa.....	38
Figura 9 - Flanges acopladas a bombona .....	38
Figura 10 - Saída de biofertilizante.....	39
Figura 11 - Vista superior da tampa.....	39
Figura 12 - Saída de gás do biodigestor.....	40
Figura 13 - Sistema de mangueiras.....	40
Figura 14 - Manômetro caseiro .....	41
Figura 15 - Filtro de água.....	41
Figura 16 - Material orgânico .....	43
Figura 17 - Biomassa utilizada como alimentação do biodigestor .....	43
Figura 18 – Esquema inicial do biodigestor .....	48
Figura 19 – Biodigestor finalizado .....	47
Figura 20 - Condições de temperatura .....	49
Figura 21 – Alimentação diária e quantidade de resíduos acumulada.....	49
Figura 22 - Produção de biogás ao longo do tempo .....	49

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Comparação de diferentes combustíveis .....	18
Tabela 2 - Comparação de valores encontrados na literatura.....	20
Tabela 3 - Material de construção utilizado na montagem do biodigestor residencial.....	37
Tabela 4 - Elementos presentes no modelo proposto.....	47

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABiogás – Associação Brasileira do biogás

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais;

GLP – Gás Liquefeito de petróleo;

GNV – Gás Natural Veicular;

pH – potencial hidrogeniônico;

PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica;

RSU – Resíduo Sólido Urbano;

SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo;

TCC – Trabalho de Conclusão de Curso;

UASB – Upflow Anaerobic Sludge Blanket

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>16</b>
2.1 Objetivo Geral .....	16
2.2 Objetivos Específicos .....	16
<b>3. CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>17</b>
3.1. O biogás.....	17
3.2. A biomassa .....	19
3.3. Brasil – um potencial para a produção de biogás.....	21
3.3.1 Barreiras nacionais ao uso do biogás .....	21
3.3.2 Incentivos ao uso do biogás por meio de políticas públicas .....	22
3.4. A produção de biogás .....	23
3.4.1. Hidrólise .....	25
3.4.2. Acidogênese .....	25
3.4.3. Acetogênese .....	26
3.4.4. Metanogênese .....	26
3.5 Os Biodigestores .....	27
3.5.1. Modelo Indiano .....	27
3.5.2. Modelo Chinês.....	28
3.5.3. Modelo Canadense .....	29
3.5.4. UASB – Upflow Anaerobic Sludge Blanket .....	30
3.5.5. Biodigestor modelo batelada.....	31
3.6 Fatores que interferem na biodigestão.....	32
3.6.1 Concentração de nutrientes .....	33
3.6.2 Relação carbono por nitrogênio (C/N) .....	33
3.6.3 Tamanho das partículas.....	34
3.6.4 Temperatura .....	34
3.6.5 Condições de pH.....	35
3.6.6 Tempo de residência no biodigestor .....	35
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>37</b>
4.1 Materiais .....	37
4.2 Montagem do biodigestor.....	38
4.3 Preparação da biomassa.....	42

4.4. Metodologia de operação.....	44
<b>5. RESULTADOS OBTIDOS.....</b>	<b>46</b>
5.1. Determinação da quantidade de resíduos .....	46
5.2. Modelo do biodigestor proposto .....	46
5.3. Montagem do equipamento e custo de implantação.....	46
5.4. O biodigestor.....	47
5.5 Obtenção de biogás e estimativas de produção no modelo desenvolvido .....	48
5.6. Estimativas do tempo de retorno do valor investido .....	51
<b>6. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>52</b>
<b>7. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS .....</b>	<b>53</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>53</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A produção de lixo é um dos maiores desafios sociais e ambientais, no Brasil e no mundo. Com o crescimento desordenado dos aglomerados urbanos, a produção e geração de resíduo sólido urbano (RSU) aumentou. Segundo a ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, (2020) entre 2010 e 2019, a geração de RSU no Brasil registrou considerável incremento, passando de 67 milhões para 79 milhões de tonelada por ano, sendo que cada habitante gerou aproximadamente 1,04 kg de resíduo/dia.

Deste montante produzido, estima-se que apenas 53,3% dos RSU foram descartados corretamente, enquanto o restante foi destinado para lugares irregulares, como os lixões, ou nem mesmo foi coletado. No entanto, os RSU são compostos por uma mistura heterogênea de materiais, dos quais a grande maioria poderia ser reciclada, como o plástico, papel e papelão, vidro e metais. (ABRELPE, 2020).

Estima-se que metade do lixo gerado é de material orgânico composto principalmente de restos de alimentos. De um modo geral, esse material é destinado para aterros sanitários para serem degradados ao longo do tempo. O que não quer dizer que este material não tem mais valor. O processo de degradação da matéria orgânica produz biogás, uma fonte de energia limpa e renovável capaz de gerar calor. O material sólido resultante pode ser utilizado como adubo orgânico. O processo de degradação, com geração de biogás ainda é uma fonte de energia subaproveitada no Brasil. (SOUZA, 2009).

O Brasil em comparação ao resto do mundo, é considerado um país com uma matriz energética mais renovável, pois além de contar com um enorme potencial de combustíveis fósseis, possui uma produção energética proveniente de hidrelétricas, que representa 75% da matriz energética nacional no ano de 2005, e mesmo tendo diminuído com o passar dos anos ainda é a maior parcela da matriz energética nacional (BRONZATTI; NETO, 2008).

No entanto tal fonte é dependente da água, e com a crise hídrica da qual o país está enfrentando, foi possível observar a fragilidade de uma matriz energética predominantemente dependente do clima. Desta forma a busca por outras fontes energéticas passa a ser cada vez mais relevante.

O ideal seria aproveitar os resíduos, como a matéria orgânica descartada no lixo, para a obtenção de uma fonte energética, que além de ter um efeito ambiental positivo ainda contribui para diversificar a matriz energética brasileira.

No ano de 1806, Humphrey Davy constatou que a decomposição de dejetos de origem animal em ambientes anaeróbio e úmidos, em um biodigestor, resultava na formação de um gás rico em carbono e dióxido de carbono. (FURMAN, 2016).

O biodigestor é um equipamento que consiste em ser basicamente uma câmara fechada, onde é fermentada a biomassa sem a presença de ar para produzir gás natural, rico em metano, através da digestão anaeróbica de bactérias responsáveis pela formação deste gás combustível. (FURMAN, 2016).

Os biodigestores já utilizados em zonas rurais, tem se mostrado promissores pela disponibilidade das biomassas exigidas (madeiras, bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz, dejetos de origem animal) para fornecer biogás e biofertilizante no Brasil, principalmente pelo fato do país apresentar condições climáticas favoráveis e uma agropecuária intensa.

Assim, surgiu a ideia da realização desse Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) que objetiva conhecer os princípios básicos do funcionamento de um biodigestor, aplicar os conhecimentos teóricos adquiridos para o desenvolvimento de um biodigestor de pequeno porte confeccionado de forma caseira, para ser utilizado em residências urbanas, alimentado a partir de resíduos orgânicos provenientes da cozinha, obtendo biogás, que poderá ser utilizado como substituinte do GLP (gás liquefeito do petróleo), aumentando o poder aquisitivo da população considerando o custo cada vez maior do gás de cozinha.

Para tanto, este TCC é estruturado em oito capítulos, sendo o primeiro a introdução. No segundo capítulo são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos. No terceiro capítulo é apresentado uma revisão dos conceitos teóricos utilizados na elaboração e construção do biodigestor residencial, assim como o embasamento teórico necessário, obtido a partir de trabalhos relacionados ao tema. No quarto capítulo, pode ser verificado os materiais e métodos que serão utilizados para atingir os objetivos propostos. No quinto capítulo são apresentados os resultados obtidos durante a realização do experimento. Enquanto no sexto capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho. No sétimo capítulo são apresentadas sugestões para trabalhos futuros. E por fim são apresentadas as referências bibliográficas que foram utilizadas para elaboração do presente estudo.



## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho consiste em projetar e construir um biodigestor de pequeno porte, para uso residencial, visando a produção de biogás, a partir dos resíduos gerados pelos moradores da residência.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Verificar a produção de resíduos em uma residência brasileira;
- Desenvolver um biodigestor, a partir de conhecimentos adquiridos na revisão de literatura;
- Construir o biodigestor residencial;
- Calcular os custos de instalação e construção do biodigestor;
- Estimar a produção de biogás a partir dos resíduos orgânicos residenciais;
- Obter biogás no biodigestor desenvolvido;
- Determinar o tempo de retorno do equipamento;

### 3. CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta os conceitos teóricos fundamentados na literatura em torno dos temas necessários para a compreensão, embasamento teórico e elaboração do desenvolvimento deste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), encontrando-se divididos nos seguintes tópicos: o biogás; a biomassa; Brasil – um potencial para a produção de biogás (barreiras nacionais ao uso do biogás e incentivos ao uso do biogás por meio de políticas públicas); produção de biogás (hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese), os biodigestores (Modelo Indiano, Modelo Chinês e Modelo Canadense; fatores que interferem na biodigestão (concentração de nutrientes, relação carbono nitrogênio – C/N, tamanho das partículas, temperatura, condições de pH, tempo de residência no biodigestor).

#### 3.1. O biogás

O biogás, também conhecido por gás do pântano, é gerado na decomposição de material orgânico por microrganismos na ausência de oxigênio, ou seja, digestão anaeróbia. Em sua composição é formado principalmente por gás metano e gás carbônico. (LORA e VENTURINI, 2012)

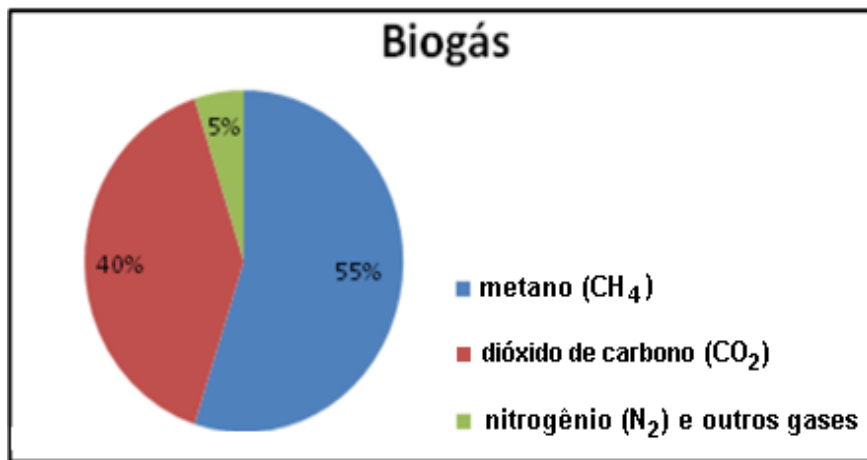
No ano de 1667 o biogás foi descoberto por Thomas Shirley, porém, apenas um século mais tarde, no ano de 1776 que Alessandro Volta reconheceu a presença de metano no gás do pântano. (NOGUEIRA, 1986).

Louis Pasteur (1884), apresentou o trabalho de seu aluno Ulysses Gayon, que realizou um processo de fermentação anaeróbia de uma mistura de estrume e água na temperatura de 35°C, obtendo 100 litros de gás por m<sup>3</sup> de matéria orgânica. Pasteur considerou que esta fermentação podia constituir uma fonte de energia para aquecimento e iluminação devido à presença de metano, um elemento com grande poder calorífico. (BATISTA, 2007)

E ainda assim, o primeiro relato de experimento relacionado a coleta de biogás foi no ano de 1895 na Inglaterra e o primeiro estudo de aproveitamento em uma pequena planta fazendo uso de estrume e outros resíduos deu-se no ano de 1941 na Índia. (ROSS e DRAKE, 1996).

A composição do biogás é de difícil definição, pois depende do resíduo utilizado e do processo de fermentação que sofre. De modo geral, conforme ilustrado pela Figura 1, o biogás é uma mistura gasosa principalmente composta por metano (55% - 70%), dióxido de carbono (30% - 45%), e traços de outros gases como hidrogênio, amoníaco, nitrogênio e gás sulfídrico que variam entre 0% e 9% de volume produzido. (DEUBLEIN e STEINNHAUSER, 2008).

Figura 1 - Composição do biogás



Fonte: Silva, 2019

O potencial energético do biogás é estabelecido em relação a quantidade de metano presente na sua composição. Quanto maior a presença de metano, maior é seu poder calorífico. (LORA e VENTURINI, 2012). Uma concentração de 60% de metano gera um poder calorífico de 5.500 kcal/m<sup>3</sup>. (POMPERMAYER e PAULA JUNIOR, 2000).

Para Karlsson (2014), o biogás bruto e o biometano são diferentes, uma vez que o primeiro é um composto CH<sub>4</sub>:CO<sub>2</sub> e outros gases, que pode ser empregado na produção de energia elétrica ou térmica. Enquanto o segundo é proveniente do beneficiamento do biogás na medida em que são removidos o dióxido de carbono e gases indesejáveis, assim elevando a capacidade calorífica a ponto de ser uma opção de substituinte ao GNV (gás natural veicular).

Para Oliveira e Higarashi (2006), o biogás é um gás combustível renovável, com uma queima limpa, sendo empregado como fonte de energia alternativa, com poder calorífico que varia de 5000 a 7000 kcal/m<sup>3</sup>.

Com elevado poder calorífico, o biogás é considerado uma boa fonte de energia alternativa ao ser comparado a outros combustíveis conforme a Tabela 1 (LIMA, 2005).

Tabela 1 - Comparação de diferentes combustíveis

Combustível	Biogás	Metano	GNV	GLP	Álcool
Quantidade	1m <sup>3</sup>	1m <sup>3</sup>	1m <sup>3</sup>	1m <sup>3</sup>	1000 mL
Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	1,2	0,72	1,3	2,5	0,809
Poder Calorífico inferior (kJ/kg)	19500	11946	14640	10997	24590
Calor Liberado (kJ)	23400	8601	19032	27492	21885

Fonte: LIMA (2005).

O biogás é considerado um gás abrasivo, devido ao fato de ser uma mistura de gases e ter em sua composição a presença de gás sulfídrico ( $H_2S$ ). Por isso são necessários cuidados especiais na manutenção dos equipamentos para sua utilização. (LORA e VENTURINI, 2012). A composição do biogás varia de acordo com a biomassa utilizada e as condições de operação.

### **3.2. A biomassa**

Qualquer matéria orgânica que possa ser decomposta pela ação de microrganismos pode ser caracterizada como biomassa. A biomassa quando decomposta em condições específicas de temperatura, pH, presença de oxigênio e umidade, por bactérias metanogênicas produz biogás. (CORTEZ; LORA e GÓMEZ, 2008; ARAÚJO, 2017).

Oliveira (1994), informa que nas primeiras semanas de produção, a quantidade de gás carbônico emitida pela biomassa é superior à do metano, e, com o tempo, essa desproporção desaparece. Ainda segundo oliveira (1994), a produção do biogás da utilização de resíduos alimentares como biomassa varia em função da relação C/N encontrada nos dejetos, assim como, as condições que cada deposição irá oferecer para a proliferação microbológica.

Por esse motivo, muitos dos biodigestores de alimentação intermitente, são projetados a fim de reter a biomassa em seu tanque digestor por aproximadamente trinta dias. (OLIVEIRA, 1994).

A aplicação do uso de biomassa para fonte de matriz energética tem sido reconhecida como precursora de um ato estratégico para o futuro para países que aderiram tal tecnologia, por se tratar de uma fonte renovável e de baixo custo, e seus resíduos podem ser considerados subprodutos, afinal podem ser utilizados como biofertilizantes. (CORTEZ; LORA e GÓMEZ, 2008).

Existem compostos que são de difícil degradação (recalcitrante) e outros que oferecem as condições ótimas para ser convenientemente degradados. Há diversos tipos de biomassa, seja ela residuária (como as sobras de alimentos e dejetos de suínos ou gado bovino), subproduto (como a vinhaça da destilação fracionada do caldo de cana fermentado para a obtenção do etanol e a glicerina de usinas de produção de biodiesel), ou culturas que podem ser produzidas de maneira combinada, visando a sua utilização como fonte de biomassa para reatores anaeróbios, como é o caso da silagem de milho e a biomassa microalgal (de microalgas produzidas em fotobiorreatores). (NAZARO, 2016).

Vários autores efetuaram pesquisas relacionadas à biodigestão de resíduos sólidos fazendo uso de diferentes materiais para produzir biogás conforme descrito na Tabela 2. (FURMAN, 2016).vs

Tabela 2 - Comparação de valores encontrados na literatura

Referência	Substrato	Volume biodigestor (L)	Tempo de retenção (dias)	Temperatura (°C)	Volume de biogás produzido (L)
Xavier (2021)	Dejetos bovinos e água	60	75 a 150	20,4 a 24,3	70
Lopez <i>et al.</i> (2020)	Dejetos de animais, restos de alimentos, descartes de frutas e legumes, soro de leite	176	56	ND*	150
Pereira (2015)	Dejetos suínos e água	20	33	20 a 30,1	8,3
Curcel (2013)	Dejetos suínos, <i>Crambe abyssinica Hochst</i> e água	7	53	ND*	45
Metz (2013)	Sobras de alimentos de cozinha, Dejetos bovinos e água	250	90	ND*	253
Alves <i>et al.</i> (2012)	Torta de mamona, água e dejetos bovinos e suínos	31	56	13 a 31	19
Galbiatti (2010)	Dejetos bovinos, suínos e de aves; Capim Napier e bagaço de cana	70	250	ND*	122,85

ND\* - não disponível

Fonte: adaptado de FURMAN, (2016); Lopez *et al.* (2020).

Para este trabalho a matéria prima a ser utilizada como biomassa para o desenvolvimento e produção de biogás será o resíduo orgânico gerado em residências urbanas.

No entanto, embora a utilização da biomassa para produzir biogás com a finalidade de gerar energia tenha se tornado popular apenas recentemente, seu desenvolvimento e aperfeiçoamento já são tema de estudo há algum tempo.

### **3.3. Brasil – um potencial para a produção de biogás**

O Brasil por ser um país com destaque econômico para o setor agroindustrial, apresenta uma grande possibilidade para a produção de biogás utilizando os resíduos dessas atividades na obtenção de energia elétrica. O potencial de produção de biogás gerado a partir de dejetos humanos, bovinos e suínos é em torno de 43% do total da potência instalada de fontes renováveis contempladas no PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica. (PROINFA, 2017).

O Rio Grande do Sul, possuiu um potencial de geração de eletricidade de 8,7 MW a partir do biogás em 2019. Para este cálculo foi considerado entre 670 e 800 m<sup>3</sup>/h de biogás com pureza em 50% de CH<sub>4</sub> a fim de garantir 1MW, e foi considerado que 40% de todo o biogás gerado foi capturado. (ABRELPE, 2019).

Por ser de fácil obtenção o biogás pode ser utilizado em regiões isoladas para a geração de energia em substituição do GLP. Como o biogás é um produto da decomposição orgânica, não altera a ciclo do carbono, não contribuindo para o efeito estufa. (VENTURINI, LORA, 2012).

Estima-se que o Brasil teve um aumento nas emissões de gases de efeito estufa no ano de 2019 em 9,6% comparado ao ano anterior. Emitindo 2,17 bilhões de toneladas de dióxido de carbono e o setor agropecuário foi responsável por 28% deste montante. (SEEG, 2020).

Os biodigestores ao serem utilizados no tratamento de resíduos como dejetos animais podem reduzir em 40% a emissão de gases de efeito estufa. Tornando-se uma excelente medida para o combate aos danos ambientais causados pelo setor. (GARCIA JUNIOR, PIRES, CUNHA 2016).

Mesmo com grande potencial energético pelo reaproveitamento de dejetos animais provenientes da agroindústria, outros resíduos provenientes do setor ainda não são aproveitados e uma grande parcela é descartada como resíduo orgânico. Mesmo assim ainda há muitas barreiras no Brasil para permitir que o biogás tenha uma parcela de atuação maior na matriz energética.

#### **3.3.1 Barreiras nacionais ao uso do biogás**

O biogás tem se mostrado como uma alternativa viável, mesmo assim, sua participação na matriz energética do Brasil ainda é pequena, devido a diversas barreiras que o setor tem

enfrentado. Essas barreiras podem ser repartidas em três áreas: conhecimento, desenvolvimento tecnológico e setor econômico e financeiro. (MARINI, 2018).

As barreiras do conhecimento são vinculadas ao acesso à materiais com informações técnicas e comerciais, a pequena parcela de profissionais capacitados para atuar na área e descrédito por uma parcela da população. (ABIOGAS, 2015, apud MARINI, 2018).

Quanto às barreiras tecnológicas, temos tecnologias brasileiras que são consideradas iniciantes neste setor, interferindo nos projetos de produção de biogás com alta eficiência para tornar economicamente viável. (MARINI,2018).

E finalmente, o setor econômico e financeiro não são atrativos muitas vezes para investidores com informações referentes aos custos do projeto e vantagens comerciais. (MARINI, 2018).

### **3.3.2 Incentivos ao uso do biogás por meio de políticas públicas**

No Brasil, já houve iniciativas na década de 1980 dentre elas se destaca o uso de biometano pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – SABESP como substituinte do gás natural veicular (GNV) em sua frota de veículos. (LUIZ, 2019).

No ano de 2002, foi publicado o decreto nº 5.025 do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), com a finalidade de expandir a participação de fontes renováveis de energia na matriz energética do Brasil por meio de produtores independentes autônomos. (PROINFA, 2015).

O Plano Nacional de Agroenergia com vigência de 2006 a 2011, buscava orientar as ações públicas e privadas em pesquisa e aquisição de tecnologia que promovessem a produção sustentável de energia na agricultura, com a meta principal de tornar o agronegócio mais competitivo e contribuir com as políticas de sustentabilidade ambiental. (JARDINE, 2011).

Para atender os compromissos estabelecidos pelo país de diminuir as liberações de gases do efeito estufa no setor agropecuário, o decreto nº 7.390/2010, instaura uma política pública com a proposta de organizar e ordenar ações de implementação de tecnologias mais sustentáveis. (SOUZA, 2021).

A Política Nacional de Biocombustíveis, ou RenovaBio, implementada em 2017 através da lei 13.576/2017, objetiva a expansão dos biocombustíveis na matriz energética e redução das emissões de gases de efeito estufa na produção, comercialização e utilização de biocombustíveis. (ANP, 2020).

O trabalho de Luiz, (2019) mostra uma possibilidade de geração de biogás, proveniente dos RSU de um restaurante universitário, assim como a tese de doutorado de Nadaleti, (2017) que direciona o aproveitamento do biogás oriundo do resíduo agroindustrial de arroz para o uso no setor de transporte público.

Espera-se que no futuro outras medidas de incentivo ao uso de fontes renováveis deem continuidade e amparo para desenvolvimento do uso de biodigestores pelo público em geral para produzir biogás a partir de resíduos gerados pela própria população.

### **3.4. A Produção de biogás**

No início do século XX, ocorreu na Índia e na China, o início do desenvolvimento da produção de gás metano a partir de esterco de animais. E a partir de 1960, a digestão anaeróbia começou a ser pesquisada em caráter científico, buscando a compreensão dos fundamentos do processo para o melhoramento de projetos de biodigestores e equipamentos auxiliares. (PECORA, 2006).

Atualmente, esse processo vem se difundindo em vários países como uma forma de tratamento de resíduos. Com a crise do petróleo, a recuperação de energia gerada pelos processos anaeróbicos teve um grande incentivo como alternativa de substituinte ao petróleo. (GASPAR, 2003).

No entanto as soluções para os problemas de desenvolvimento devem condizer com as necessidades, as capacidades e recursos humanos e aos recursos financeiros e culturais. (NOGUEIRA, 1986). Assim o incentivo recebido durante a crise do petróleo não chegou a se consolidar como movimento de substituição de recursos não renováveis por fontes de energias renováveis.

A produção de biogás é feita pelo processo de digestão anaeróbica realizado na degradação da biomassa e levando a formação de metano e outros gases inorgânicos, e resíduo líquido rico em minerais que pode ser usado como biofertilizante. (ARAÚJO, 2017).

A digestão anaeróbia é um processo de fermentação consideravelmente simples que pode ocorrer em uma lagoa anaeróbia ou em um tanque. A digestão anaeróbia ocorre na natureza em vários ambientes com condições favoráveis ao processo, podendo ser citados segundo VILLEN, (2001) os pântanos, estuários, mares e lagos. Esses sistemas têm em comum a presença de baixas concentrações de oxigênio que facilita a ocorrência deste fenômeno.



A degradação anaeróbia da biomassa a metano é um processo biológico que sucede em diferentes etapas pela ação de microrganismos de forma simbiótica. (KELLEHER *et al...*, 2002).

Para as diferentes etapas, uma determinada espécie bacteriana tem maior atuação no processo. Essas bactérias são geralmente dos grupos: hidrolíticos, acidogênicos, acetogênicos e metanogênicos. As bactérias acidogênicas e as metanogênicas apresentam diferentes características relacionadas às exigências nutricionais, a fisiologia, o pH, crescimento e sensibilidade quanto a variação de temperatura. (CHERNICHARO, 1997).

Quando comparadas a velocidade de reprodução entre as bactérias acidogênicas e as metanogênicas, as metanogênicas apresentam menor velocidade e maior sensibilidade as condições ambientais. (ARAÚJO, 2017).

As etapas pelo qual necessariamente o processo anaeróbio passa são quatro, sendo elas hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, onde a geração do biogás acontece na última etapa. Na realização do processo, é essencial que as reações químicas aconteçam de forma sinérgica, onde as fases 1-2 e 3-4 tem íntima relação, por tanto, elas são organizadas em dois estágios, onde os níveis de degradação devem ser o mesmo. (DEUBLEINB e STEINHAUSER, 2008).

A Figura 2 ilustra o mecanismo dos processos bioquímicos presentes na formação do biogás.

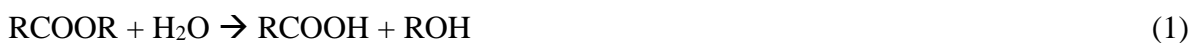
Figura 2 - Etapas de produção do biogás



Fonte: Araújo, 2017.

### 3.4.1. Hidrólise

O processo de biodigestão inicia pela hidrólise da biomassa, que contém matéria orgânica. Nessa etapa, as ligações moleculares complexas como carboidratos, proteínas e gorduras são quebradas por enzimas em um processo bioquímico, sendo disponibilizadas por um grupo específico de bactérias originando compostos orgânicos simples como aminoácidos, açúcares e ácidos graxos, como mostrado na Reação 1. (ARAÚJO, 2017).



Diversos tipos de hidrólise mudam em relação a matéria orgânica usada, como a hidrólise de glicosídeos para a formação de açúcares e de proteínas para aminoácidos. Tal processo é de importância fundamental para a produção de biogás, pois a partir da quebra dos polímeros maiores, inicia-se o processo de biodigestão. (ARAÚJO, 2017).

### 3.4.2. Acidogênese

Durante a Acidogênese as substâncias resultantes da hidrólise são convertidas por bactérias acidogênicas em ácido propanoico, ácido butanoico, ácido lático e álcoois, além de hidrogênio e gás carbônico. (ARAÚJO, 2017; PESCADOR, 2001).

A produção nesta etapa é dependente também da presença inicial de hidrogênio na mistura. As concentrações elevadas de hidrogênio na mistura interferem de forma negativa na eficiência da etapa, causando o acúmulo de ácidos orgânicos afetando o processo com a redução do pH na mistura. (ARAÚJO, 2017).

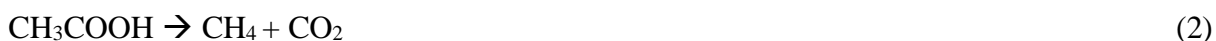
### 3.4.3. Acetogênese

É a fase na qual os materiais resultantes da etapa anterior são convertidos em ácido etanoico, hidrogênio e gás carbônico pelas bactérias acetogênicas. Sendo esta etapa, uma das mais delicadas do processo, pois é importante manter o equilíbrio para que a quantidade de hidrogênio gerada nessa etapa, seja consumida pelas bactérias Arqueas, na etapa seguinte, a metanogênese. (ELLER, 2013; ARAÚJO, 2017).

### 3.4.4. Metanogênese

Durante a metanogênese na biodigestão anaeróbia é finalmente realizada a conversão do ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono em metano e gás carbônico, pela ação das bactérias Arqueas. Essas bactérias pertencem a apresentam genéticas únicas e particulares que as permitem sobreviver em ambientes com ausência ou quase nenhuma presença de oxigênio e nitrato, desta forma a metanogênese pode ser considerada um processo de respiração anaeróbio. (SILVA, 2009 b; METZ, 2013; ELLER, 2013).

As Arqueas são subdivididas em dois grupos em função das suas fisiologias. Os microrganismos metanogênicos hidrogenotróficos fazem uso do hidrogênio e dióxido de carbono, ao mesmo tempo que os metanogênicos acetoclásticos utilizam o ácido acético basicamente para a geração de metano e gás carbônico as Reações (2) e (3) representam, respectivamente, a atuação citada de cada grupo de Arqueas. (SOUZA, 2021; ARAÚJO, 2017).



### 3.5 Os biodigestores

São equipamentos compostos de câmaras vedadas, para mantê-la livre da presença de oxigênio, e um gasômetro para armazenar o biogás gerado, além de tubulações e instrumentos de medição de pressão e temperatura. Através da tubulação de entrada de um biodigestor os resíduos orgânicos são depositados com o objetivo de produzir biogás e biofertilizante (DONGALA, 2010; JÚNIOR, 2000).

Existem três modelos de uso contínuo, onde a descarga é proporcional à biomassa que entra no equipamento e um modelo de uso em batelada, onde a biomassa fica confinada até que a biodigestão ocorra, para após ser descartada como biofertilizante e assim inicia-se um novo processo de recarga de biomassa. Os modelos de uso contínuo são o modelo Indiano, o modelo Chinês e o modelo Canadense. (JÚNIOR, 2000).

Para este estudo o modelo em batelada é considerado inviável tendo em vista o fato de que a proposta é alimentar o equipamento diariamente com os resíduos residenciais gerados.

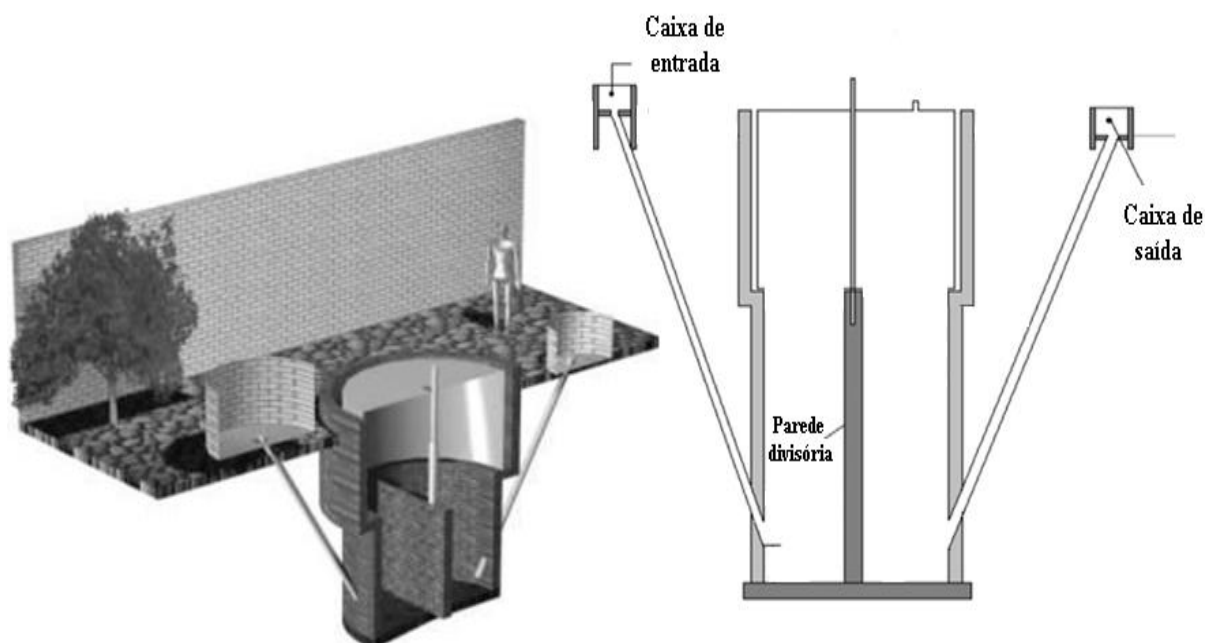
A seguir será detalhado cada um dos modelos de uso contínuo.

#### 3.5.1. Modelo Indiano

A Índia foi o primeiro país a construir biodigestores em grande escala, sendo a primeira unidade montada em 1908. (ARAÚJO, 2017)

O modelo é caracterizado por possuir uma campânula metálica que serve como gasômetro que pode se encontrar submersa na biomassa ou selada externamente por água, e com a presença de uma parede no centro de sua estrutura com a função de dividir as duas câmaras para que o material circule por seu interior. (PRATI, 2010). A Figura 3 mostra um esquema de um biodigestor modelo indiano.

Figura 3 - Esquema de um biodigestor modelo Indiano



Fonte: Dongola, 2010

Este modelo não necessita que sejam estabelecidas medidas fixas de diâmetro e profundidade, devido ao fato da variabilidade do solo e a profundidade dos lençóis freáticos próximos ao local de implementação. É possível alterar a profundidade em função do diâmetro do equipamento para se adequar ao local de instalação, logo, quanto menor for sua profundidade, maior deve ser seu diâmetro. (DONGOLA, 2010).

O fator de proporcionalidade entre a profundidade e o diâmetro também deve levar em consideração o fator clima, já que este equipamento pode ser utilizado em regiões de clima tropical e temperado. O modelo é considerado de fácil construção e baixo custo, sendo que o gasômetro de metal é a parte mais cara do projeto. (DONGOLA, 2010).

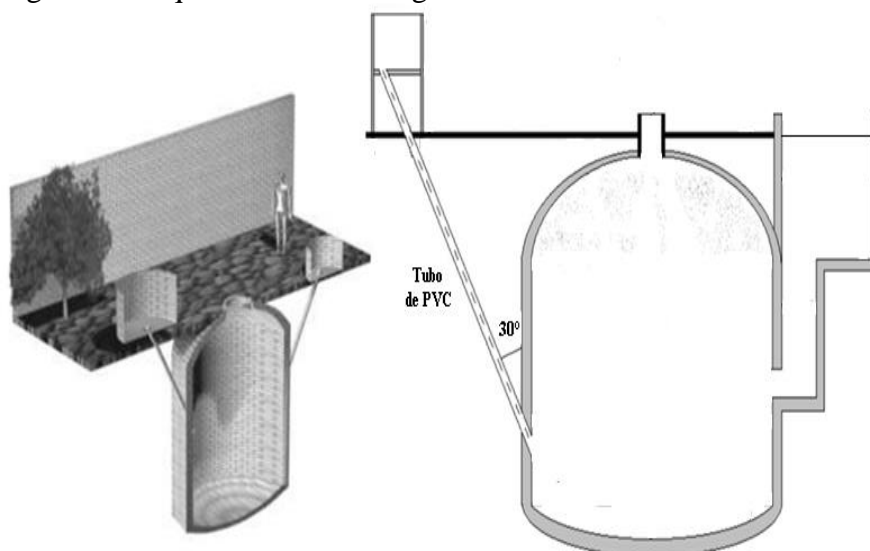
Mesmo sendo um modelo de alimentação constante, sua concentração de sólidos totais deve se manter inferior a 8% para garantir a circulação dos resíduos pelo equipamento e afim de evitar que seja alterado o processo fermentativo da biomassa. (DONGOLA, 2010).

### 3.5.2. Modelo Chinês

É um modelo semelhante ao modelo Indiano, em termos comparativos. Ambos os modelos apresentam além da estrutura semelhante um desempenho muito parecido, com uma leve vantagem do modelo indiano. Tem como diferença que é quase que completamente enterrado no solo, sendo constituído de uma câmara circular de alvenaria. Fazendo uso para seu

funcionamento do princípio da prensa hidráulica, de forma a elevar a pressão em seu interior, devido ao acúmulo de gases gerados. Causando o deslocamento da biomassa localizada na câmara de fermentação para a caixa de saída. (PRATI 2010). A Figura 4 mostra um esquema de um biodigestor do modelo chinês.

Figura 4 - Esquema de um biodigestor modelo Chinês



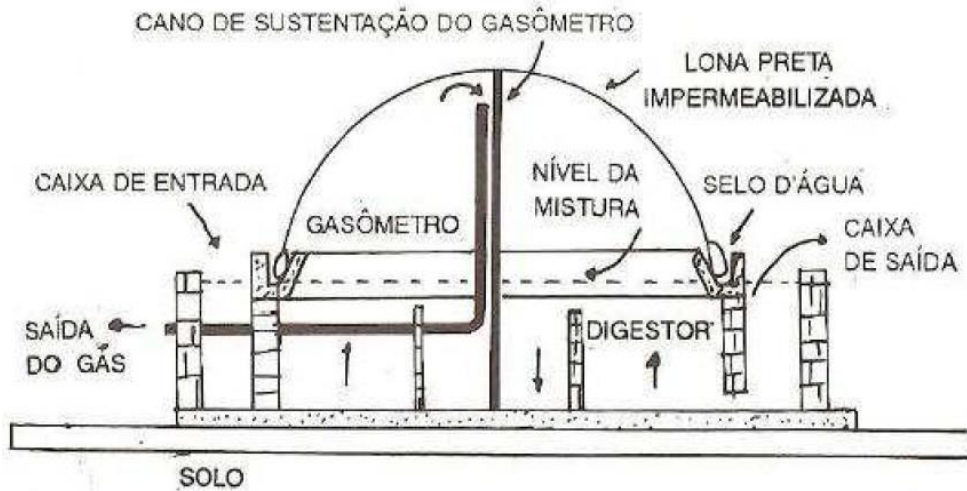
Fonte: Dongola, 2010

Por demandar mão-de-obra experiente e qualificada para implementação, pois os tijolos da câmara devem ser assentados sem recursos de escoamento, o modelo é bastante criticado, além do fato da pressão oscilar muito. (DONGOLA, 2010)

### 3.5.3. Modelo Canadense

O modelo canadense também é conhecido no Brasil por modelo da marinha, e possui uma cúpula de lona preta impermeabilizada que é responsável pelo aumento da temperatura no interior da cúpula devido a incidência dos raios solares, o que ajuda na produção do biogás. Este modelo, de modo geral, é instalado ao nível do solo, motivo pelo qual o modelo tem seu uso disseminado em áreas rurais por ser de fácil construção. (DONGOLA, 2010). A Figura 5 mostra um esquema de um biodigestor do modelo canadense.

Figura 5 - Esquema de um biodigestor do modelo Canadense



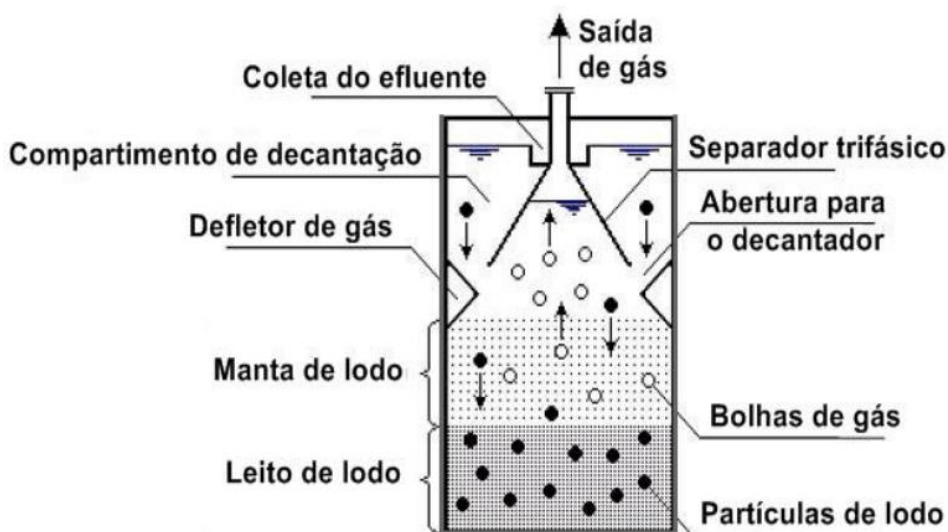
Fonte: Prati, 2010

#### 3.5.4. UASB – Upflow Anaerobic Sludge Blanket

O modelo UASB foi desenvolvido na década de 70 na Holanda, para o tratamento de efluentes industriais de alta concentração, a partir de estudos anteriormente efetuados com filtro anaeróbio ascendente. O reator é utilizado desde a década de 80 nos estados do Paraná e São Paulo. (FAEDO, 2010).

O processo do reator consiste em um fluxo ascendente de efluentes através de um leito denso de lodo de elevada atividade, conforme ilustrado na Figura 6. Onde o perfil de sólidos no reator varia de muito denso com grandes grânulos à lodos dispersos e leves. A estabilização de matéria orgânica ocorre em todas as zonas do reator, sendo promovida a mistura do sistema pelo fluxo do esgoto em ascensão e das bolhas de gás. (CHERINCHARO, 2007).

Figura 6 - Esquema de um reator UASB



Fonte: (CORTEZ, 2008)

A habilidade de desenvolver uma elevada atividade por apresentar a forma de flocos ou grânulos. Uma característica dos reatores UASB é que apresentam elevado tempo de residência hidráulica, além disso, o sistema deve conter um separador trifásico projetado para ser capaz de separar de forma adequada o biogás, o líquido e os sólidos de forma que apenas o último seja retido no equipamento (CHERINCHARO, 2007; SOUZA, 2007).

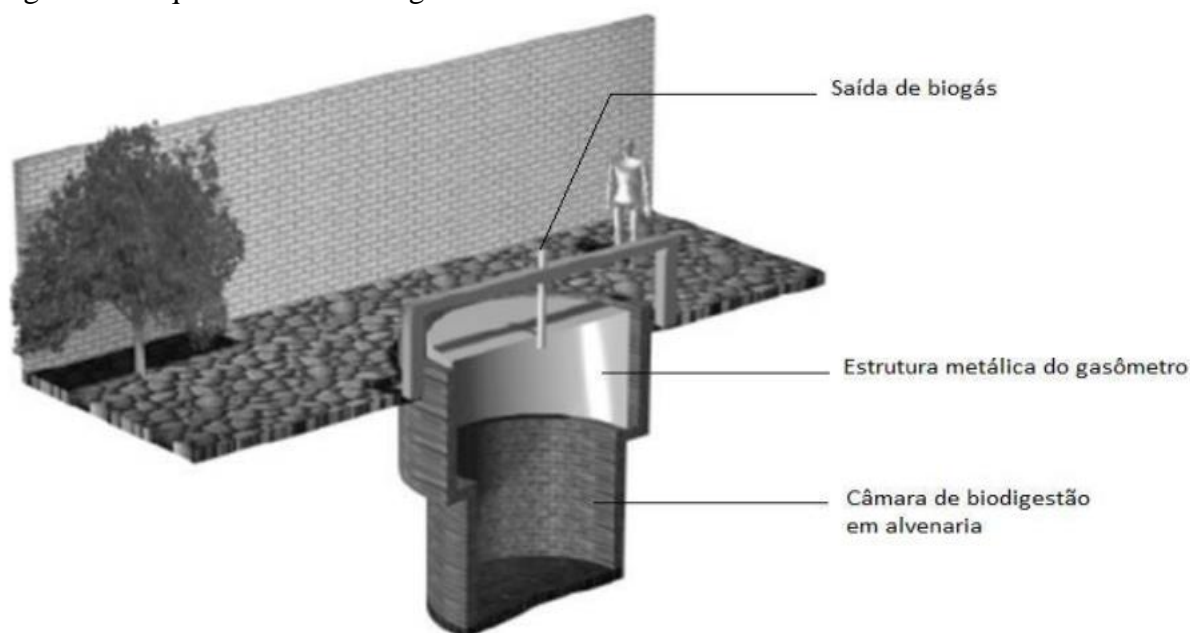
O tratamento realizado por esse modelo possui facilidades operacionais e hidrodinâmicas mais eficientes, boa adaptação às condições climáticas do Brasil e produzir biogás com elevada concentração de metano. (BELLI *et al.*, 2001).

### 3.5.5. Biodigestor modelo batelada

O modelo em batelada (Figura 7) é um sistema de capacidade operacional simples. A implantação de seu sistema poderá ser apenas em um tanque anaeróbio ou uma série de tanques interligados. Se diferenciando dos demais sistemas por ser abastecido apenas em uma vez, então é lacrado para que ocorra a fermentação. Podendo ser aberto, descarregado e recarregado apenas quando cessar a produção de gás, pela movimentação da estrutura metálica do gasômetro. O modelo é ideal para instalações em que a disponibilidade de matéria orgânica ocorra por longos períodos, permitindo que após a conclusão da produção de biogás, inicie novo processo. (DEGANUTTIL, 2002; PECORA, 2006).



Figura 7 - Esquema de um biodigestor em batelada



Fonte: Adaptado de Coelho (2012)

### 3.6 Fatores que interferem na biodigestão

Os parâmetros de operação do processo influenciam diretamente na eficiência da digestão anaeróbia, um processo bioquímico realizado por milhares de bactérias que são dependentes de um meio ideal para a sua atuação, levando em consideração a natureza do substrato, atributos do biodigestor e o controle dos parâmetros relacionados com o equipamento e o processo de biodigestão. (ARAÚJO, 2017).

Existe a possibilidade de acontecer falhas operacionais mesmo havendo o controle dos parâmetros. Por esse motivo deve haver a verificação no startup do processo, garantindo assim um início adequado nas melhores condições para maximizar o desempenho do processo. (ARAÚJO, 2017).

É interessante que o biodigestor seja completo com o máximo possível de biomassa e preferencialmente, com materiais que já contenham microrganismos anaeróbios previamente solvidos. Depois de ser iniciado o processo, as alterações nas condições de controle devem ser evitadas ou rejeitadas. (ARAÚJO, 2017).

Na sequência são descritos os principais fatores influenciadores na eficiência da produção de biogás.

### 3.6.1 Concentração de nutrientes

A presença de macro elementos como o carbono, nitrogênio, potássio, fosforo e enxofre, alguns micronutrientes minerais, vitaminas e aminoácidos são fundamentais para o desenvolvimento das bactérias metanogênicas, assim sendo, o conhecimento da composição e o tipo de biomassa são necessários. (FILHO, 1981).

É interessante que seja utilizada biomassa rica em teor de carbono na forma de carboidratos na alimentação do biorreator, uma vez que este será o alimento da microbiota. (METZ, 2013).

É necessário que ocorra uma diluição conforme as características da biomassa, para que o processo de digestão seja mais eficiente. A diluição adequada para dejetos de animais deve corresponder de 6% a 20% de sólidos totais no substrato dos reatores anaeróbios. No caso de apresentar 6 % de sólidos totais, o processo é classificado como processo de digestão anaeróbia úmida e com 20% de sólidos totais é classificado como processo de digestão anaeróbia seca. (NAZARO, 2016).

Ainda segundo o autor Nazaro (2016), no caso de utilização de sobras de alimentos em geral, como alimentação dos biodigestores, as mesmas devem ser diluídas de modo a conter em torno de 12% de sólidos totais.

### 3.6.2 Relação carbono por nitrogênio (C/N)

Para o processo de digestão a relação C/N é importante, por estes serem os principais nutrientes dos microrganismos. As bactérias envolvidas no processo, fazem uso de uma quantidade maior de carbono em relação ao nitrogênio. Onde o carbono é consumido como fonte de energia pelos microrganismos, enquanto o nitrogênio é empregado nas construções das estruturas celulares bacterianas. Para diversos autores como Prati (2010), Reis (2012), Metz (2013) e Nazaro (2016), a relação C/N carece de se manter entre 20:1 e 30:1. Tal relação, segundo Metz (2013), é de grande valor para a formação dos ácidos orgânicos utilizados pelas bactérias na produção do biogás.

Tais considerações são embasadas nos experimentos realizados por Sgorlon *et al.* (2011), onde foi utilizado resíduos de fruti-hortícolas. Foi constatado que durante a primeira centena de dias, a relação C/N manteve-se em condições ideais para início da digestão, no entanto, era esperado que ocorresse a diminuição da relação ao longo do processo até atingir a relação 10:1 para ser considerada a estabilização da digestão. Mas a relação cresceu, motivada pelo aumento

de carbono presente, causando a inibição da atividade microbiana, diminuindo a capacidade degradativa da matéria orgânica.

### **3.6.3 Tamanho das partículas**

Se a biomassa utilizada como alimentação do biodigestor for composta de partículas de grandes dimensões, a ação dos microrganismos sobre o substrato pode ser dificultada. Para contornar essa dificuldade, torna-se necessário um pré-tratamento como por exemplo a moagem, que diminui o tamanho das partículas, aumentando a superfície de contato entre o material e os microrganismos. Resíduos ligno-celulósicos podem necessitar de pré-tratamento para liberar a celulose e hemi-celulose da lignina. A palha, por exemplo, deve ser pré-fermentada e se possível triturada em pequenos pedaços para facilitar o processo. (NAZARO, 2016)

### **3.6.4 Temperatura**

O aspecto principal na produção do biogás é o grupo de microrganismos encontrar um ambiente que favoreça o seu desenvolvimento, e para isso o fator temperatura é o mais relevante dos parâmetros. (KONZEN, 1983).

Para Metz (2013), a produção de biogás por meio da fermentação anaeróbia é influenciada diretamente pela temperatura. Para condições em temperaturas mais elevadas é possível obter um processo mais eficaz, podendo diminuir o período de retenção da biomassa no biodigestor. E para temperaturas mais elevadas a concentração de metano produzida é maior, garantindo maior poder calorífico ao biogás. O aumento da eficiência do biodigestor é obtido em faixas elevadas de temperatura, produzindo o dobro de volume de gás, ou podendo ser dimensionado um biodigestor com metade do volume em comparação ao volume pré-estabelecido. E caso aconteça a redução da temperatura, o processo digestivo também diminuirá.

O processo de digestão anaeróbio pode ser interrompido em temperaturas extremas, muito baixas ou muito altas (NAZARO, 2016). Por tanto, a presença de variações bruscas de temperaturas no processo anaeróbio não é recomendada, pois desta maneira pode haver a morte das bactérias comprometendo o processo de digestão. Por esta razão é de suma importância manter temperatura constante dentro do digestor. (BARRERA, 2003).

Para Metcalf e Eddy (1991), as bactérias podem ser classificadas em função das faixas de temperatura em que se desenvolvem: psicrófilas (0°C a 20°C), mesófilas (20°C a 45°C) e

termofílicas (45°C a 70°C). E para temperaturas próximas a 10°C, a atividade é reduzida e para temperaturas acima de 70°C, as enzimas são neutralizadas pelo calor.

O processo de digestão é altamente acelerado na faixa de 35 a 37°C. Para temperaturas superiores o rendimento é maior, pois a decomposição é acelerada quando há um maior desenvolvimento de bactérias termofílicas, porém, os custos relativos ao aquecimento inviabilizam o processo. (BARRERA, 2003).

### **3.6.5 Condições de pH**

O pH é um parâmetro fundamental para o desenvolvimento da microbiota e de difícil controle durante o processo de compostagem. No entanto, diversos microrganismos tem a habilidade de se adaptar a diferentes zonas de pH. (BATISTA, 2007).

A variação das condições de pH segue o mesmo princípio da temperatura, onde cada grupo bacteriano possui sua faixa ideal de acidez. Nas etapas da hidrólise e da acidogênese, a faixa ideal de pH fica em torno de 5,2 a 6,3. (PRATI, 2010).

Nessas fases iniciais do processo, durante a degradação dos resíduos, são produzidos ácidos orgânicos reduzindo o pH, promovendo a proliferação de fungos capazes de degradar a celulose e lignina. (KIEHL, 1995).

Os ácidos orgânicos gerados são decompostos e se transformam em moléculas mais simples, no entanto, quando o sistema se tornar anaeróbio a acumulação destes ácidos pode baixar drasticamente o pH e diminuir a atividade biológica, podendo ser revertido com a inserção de oxigênio no sistema. (BATISTA, 2007).

Pela compostagem, cerca de 98% do nitrogênio presente na biomassa se converte em nitrogênio amídico e depois em nitrogênio amoniacal, inferindo um pH mais elevado pela reação alcalina da amônia. E posteriormente as nitrobactérias convertem o nitrogênio amoniacal em nitrato, produto final da degradação do nitrogênio orgânico. (BATISTA, 2007).

Na acetogênese e metanogênese a faixa de pH ideal fica entre 6,5 a 8. Abaixo do pH crítico pode ocorrer a precipitação de íons metálicos, assim como a inibição da ação bacteriana, devido à produção de ácidos. (PRATI, 2010).

### **3.6.6 Tempo de residência no biodigestor**

O tempo de residência ou tempo de detenção hidráulica, é o tempo que o material deve permanecer no interior do biodigestor, desde a entrada da biomassa até a sua saída. O tempo de

retenção é considerado um parâmetro dependente dos demais parâmetros, pois pode mudar de acordo com a natureza dos materiais utilizados como biomassa, e das demais especificações admitidas, podendo variar de 4 a 60 dias. (MAZZUCHI, 1980; FILHO, 1981).

Para biomassas compostas de restos de alimentos, o tempo de detenção situa entre 20 e 30 dias. Em 30 dias a carga orgânica sofreu grande redução e a produção de biogás atingiu o máximo e inicia o decaimento. (BEUX, 2005).

Para determinar o tempo de residência é necessário definir qual o produto principal do biodigestor a ser obtido, e as quantidades e qualidades desta operação. (BATISTA, 2007).

A relação entre o volume da biomassa e a carga de alimentação do biodigestor permite determinar o tempo de retenção do biodigestor.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os aspectos e materiais envolvidos para a construção e desenvolvimento de um biodigestor compacto de alimentação contínua. Foram utilizados materiais baratos ou reciclados de maneira que qualquer pessoa possa construí-lo e utilizá-lo em sua residência. O biodigestor desenvolvido baseou-se em conceitos de diferentes modelos adaptados para atender as necessidades propostas.

### 4.1 Materiais

Foi utilizado uma bombona de plástico com volume de 100 litros, como recipiente para montagem do biodigestor. Foram adaptados componentes hidráulicos e instrumentos para controle de vazão e pressão descritos e quantificados na Tabela 3.

Tabela 3 - Material de construção utilizado na montagem do biodigestor residencial

<b>Material</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Valor unitário (R\$)</b>	<b>Valor total (R\$)</b>
Bombona 100 L	1	100,00	100,00
Flange 1"	1	24,80	24,80
Registro esfera 1"	1	29,80	29,80
Adaptador curto	1	2,50	2,50
Cano PVC soldável 1"	1,5 m	1,00/m	15,00
Flange ½"	1	16,80	16,80
Adaptador curto ½"	1	1,50	1,50
Bico para mangueira ½"	1	3,00	3,00
Mangueira cristal ½"	5 m	4,50/m	22,50
Tee interno polietileno ½"	1	3,00	3,00
Fita métrica 1,5m	1	5,00	5,00
Registro alta pressão	3	20,00	60,00
Espiga p/ mangueira 1/8"	2	4,00	8,00
Braçadeiras	12	2,00	24,00
Tubo de cobre ½"	0,5m	29,00/m	14,50
Pote de vidro	1	-	-
Redutor ½" p/ 3/8" aço	2	30,00	60,00
Mangueira cristal 3/8"	2m	3,00/m	6,00
Flange50mm	1	82,00	82,00
Registro esfera PVC	1	32,00	32,00
Cola cano PVC 17g	1	5,00	5,00
Fita veda rosca 12mmx10	1	3,00	3,00
Silicone bisnaga 50G incolor	1	8,00	8,00
<b>INVESTIMENTO TOTAL (R\$)</b>			<b>553,40</b>

Fonte: autor, 2022.

A fim de quantificar o custo de implementação do biodigestor, foram obtidos todos os componentes novos junto ao comércio local na cidade de Uruguiana entre os dias 25 de janeiro de 2022 e 08 de fevereiro de 2022.

#### 4.2 Montagem do biodigestor

Inicialmente após a aquisição da bombona foi realizada sua higienização. O primeiro passo da montagem consistiu em realizar um furo na parte inferior da bombona e dois furos na tampa com o auxílio de um jogo de serra copos conforme Figura 8.

Figura 8 - Posições dos furos na bombona e tampa



Fonte: Autor, 2022.

Posteriormente foram acoplados os flanges de diferentes tamanhos aos furos realizados na bombona, conforme demonstrado na Figura 9:

Figura 9 - Flanges acopladas a bombona



Fonte: Autor, 2022.

Onde na parte inferior da bombona foi inserida a flange de 50mm seguida do registro esfera de 50mm formando o sistema de saída (Figura 10) para a retirada do resíduo sólido gerado, que posteriormente poderá ser utilizado como biofertilizante.

Figura 10 - Saída de biofertilizante



Fonte: Autor, 2022.

Na tampa do biodigestor foram feitos dois furos e neles acoplados as suas respectivas flanges para as funções de ser a entrada de alimentação (1") e saída de gás (1/2") de acordo com a Figura 11.

Figura 11 - Vista superior da tampa



Fonte: Autor, 2022

Para montar o sistema de alimentação foi inserido um pequeno pedaço de cano PVC de 1" no flange, seguido do registro esfera de 1" e por fim conectado um cano de PVC de 1" de 0,5m de comprimento na parte externa do galão com a finalidade de atuar como um embolo



onde é inserido o alimento. E por dentro foi inserido um cano de PVC de 1” com comprimento de 0,78m aplicando conceitos do modelo Chines para a entrada da biomassa.

A saída de gás foi elaborada com um adaptador e bico para mangueira colocados no flange de ½”, de acordo com a Figura 12, para ser acoplado ao sistema de mangueiras.

Figura 12 - Saída de gás do biodigestor



Fonte: Autor, 2022.

O sistema de mangueiras (Figura 13) foi elaborado a partir da inserção de uma mangueira no bico de pvc, e conexão ao tee de polietileno de modo que o fluxo de biogás seja dividido em duas partes.

Figura 13 - Sistema de mangueiras



Fonte: Autor, 2022.

Uma parte do fluxo segue para um manômetro caseiro (Figura 14), com a finalidade de aferir a pressão interna do biodigestor ao longo do processo produtivo e outra parte segue para um filtro d'água (Figura 15) com a finalidade de conter os microrganismos e substâncias voláteis. Presentes no biogás.

Figura 14 - Manômetro caseiro



Fonte: Autor, 2022.

Figura 15 - Filtro de água



Fonte: Autor, 2022.

O mecanismo de filtragem é realizado pelo filtro de água, elaborado em um pote de vidro preenchido até a metade com água. Foram realizados dois furos na tampa com o auxílio de uma furadeira e foram inseridos dois canos de cobre com 0,35m e 0,15m. O cano maior foi posicionado de forma que a sua extremidade no inferior do recipiente esteja submersa, enquanto o cano menor ficou posicionado de forma que sua extremidade não entre em contato com a água. Por fim os canos foram fixados com cola Epóxi na tampa, que foi vedada no recipiente com cola de silicone. Na figura 15 é possível observar a coloração esbranquiçada da água resultante da cola de silicone utilizada para a vedação do recipiente.

O filtro é ligado à mangueira de saída do biogás.

O sistema de mangueiras ao ser montado, contou como uso de braçadeiras para fixação dos componentes e afim de inibir a possibilidade de vazamentos.

Por fim utilizou-se silicone em bisnaga para recobrir todas as conexões com a finalidade de garantir que não ocorresse perda de gás do interior do sistema para o meio ambiente.

### **4.3 Preparação da biomassa**

A matéria orgânica utilizada para a alimentação do biodigestor como objeto de estudo deste trabalho foi proveniente dos resíduos orgânicos gerados na residência do autor, buscando aproximar as condições de uma residência de uma família com 3 pessoas

A matéria orgânica a ser inserida no biodigestor para gerar biogás foi calculada admitindo que cada brasileiro gera cerca de 1,04kg de RSU/dia, sendo metade deste valor correspondente a material orgânico, ou seja, a produção de 0,52 kg de resíduo orgânico por dia por morador. Assim com uma média de três moradores se estimou o valor de 1,56 kg de resíduo orgânico gerado diariamente.

Para a realização do preparo do material orgânicos, utilizado como alimentação do biodigestor utilizou-se os seguintes utensílios:

- Balança de cozinha;
- Liquidificador;
- Copo graduado;
- Funil de plástico.

As etapas da preparação consistiram em separar e coletar cascas de legumes e restos de alimentos produzidos diariamente (Figura 16). É importante ressaltar que para este estudo não foram adicionados como parte da composição da biomassa restos de carne (processo de

decomposição tende a favorecer a proliferação de microrganismos concorrentes aos de interesse) e cascas de ovos (pouco fornecimento nutricional para a microbiota produzir biogás).

Figura 16 - Material orgânico



Fonte: Autor, 2022.

Após aferir o peso se estima a quantidade de água para realizar a solubilização do material, em uma proporção de 1,4:1. Esse valor foi escolhido com base nos valores definidos por Luiz (2019). Essa diluição ocorre a fim de facilitar a trituração do material e obter uma aceleração das reações durante o processo digestivo, de modo a agilizar o tempo de início de produção do biogás. A Figura 17 mostra a biomassa após ser solubilizada e triturada com o liquidificador, antes de ser encaminhada para biodigestão.

Figura 17 - Biomassa utilizada como alimentação do biodigestor



Fonte: Autor, 2022.

Vale a pena ressaltar que o autor manteve uma alimentação diversificada, constituída de frutas, verduras, legumes e demais alimentos, normalmente encontrados na mesa do brasileiro.

#### 4.4. Metodologia de operação

O equipamento foi posicionado em um local ventilado e a meia sombra em área externa e coberta da residência do autor, no dia 13/02/2022. Foram realizadas diariamente a leitura e registro da posição inicial do manômetro antes da alimentação, leitura final do manômetro após alimentação pontualmente as 18h. Foi utilizado um aplicativo clima tempo presente no celular do autor para registrar as medias de temperatura ambiente ao decorrer do processo de biodigestão.

Durante a realização do experimento não foram realizadas medidas de pH, temperatura interna, nem a quantificação dos componentes do gás gerado. Também não foram realizadas avaliações de parâmetros como: a umidade, caracterização da microbiota e contagem C/N.

O biogás foi considerado um gás ideal de modo a permitir a utilização da equação dos gases ideais de Clapeyron (Equação 4) para calcular o volume de biogás produzido.

$$pV = nRT \quad (4)$$

Onde  $p$  é a pressão,  $V$  o volume,  $n$  o número de mols do biogás,  $R$  a constante universal dos gases e  $T$  a temperatura. Baseados na Equação 4, temos a Equação 5, onde o lado direito da equação é uma constante durante a operação do biodigestor.

$$pV/T = nR \quad (5)$$

Desta forma, chegamos na Equação 6.

$$\left(\frac{pV}{T}\right)_{interno} = \left(\frac{pV}{T}\right)_{externo} \quad (6)$$

Sendo o índice “*interno*” relacionado ao estado do gás no interior do biodigestor e o índice *externo* está relacionado ao estado do gás no exterior do biodigestor.

Por meio do equilíbrio térmico do sistema, temos que a  $P_{externa} = P_{atmosférica}$  e a  $T_{interna} = T_{externa}$ , deste modo é possível obter a Equação 7.

$$P_{atmosférica}V_{externo} = P_{interno}V_{interno} \quad (7)$$

Como o biodigestor está conectado ao manômetro, temos que a  $P_{interno} = P_{atmosfera} + P_{hidrostatica}$ , onde a  $P_{hidrostatica}$  é a pressão que a coluna de água no manômetro exerce sobre o gás formado no biodigestor. Assumindo que a  $P_{atmosfera}$  é igual a 101325 Pa e  $V_{interno} = 100$  litros, temos a Equação 8 a seguir.

$$101325V_{externo} = 100 (101325 + P_{hidrostatica}) \quad (8)$$

A produção de gás ( $\Delta V$ ) é obtida através da diferença do  $V_{externo}$  por  $V_{interno}$ . Considerando que o  $V_{externo}$  equivale ao volume ocupado pelo gás caso estivesse sobre pressão de 101325 Pa, é possível obter a seguinte Equação 9.

$$\Delta V = V_{externo} - V_{interno} \quad (9)$$

Considerando que ( $\Delta V$ ) seja o volume de gás produzido pelo biodigestor ( $V_{pb}$ ) e rearranjando as equações 8 e 9, é possível obter o volume do biogás produzido durante 24 horas através da Equação 10.

$$V_{pb} = \left( \frac{P_{hidrostatica}}{1013,25} \right) \quad (10)$$

A obtenção do  $P_{hidrostatica}$  é através do manômetro do tipo U instalado no biodigestor. Através da seguinte Equação 11 é obtido o  $P_{hidrostatica}$ .

$$P_{hidrostatica} = \rho g (h_a - h_b) \quad (11)$$

Rearranjando as equações 10 e 11, temos a Equação 12.

$$V_{pb} = \left( \frac{\rho g (h_a - h_b)}{1013,25} \right) \quad (12)$$

Sendo que  $\rho$  é massa específica da água,  $g$  é a gravidade,  $h_b$  é a altura inferior e  $h_a$  a altura superior do fluido na coluna de água do manômetro indicado na Figura 14.



## **5. RESULTADOS OBTIDOS**

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos durante a execução dos experimentos, que foram desenvolvidos durante a elaboração deste TCC, seguindo a metodologia mencionada no item anterior. Os resultados serão discutidos e relacionados com a revisão de literatura, sempre que possível

### **5.1. Determinação da quantidade de resíduos**

Os resíduos orgânicos foram coletados, na casa do autor deste TCC, no intervalo entre os dias 14 de fevereiro de 2022 e 10 de março de 2022. Após a coleta o material foi separado, pesado e triturado, para ser utilizado como alimentação do biodigestor.

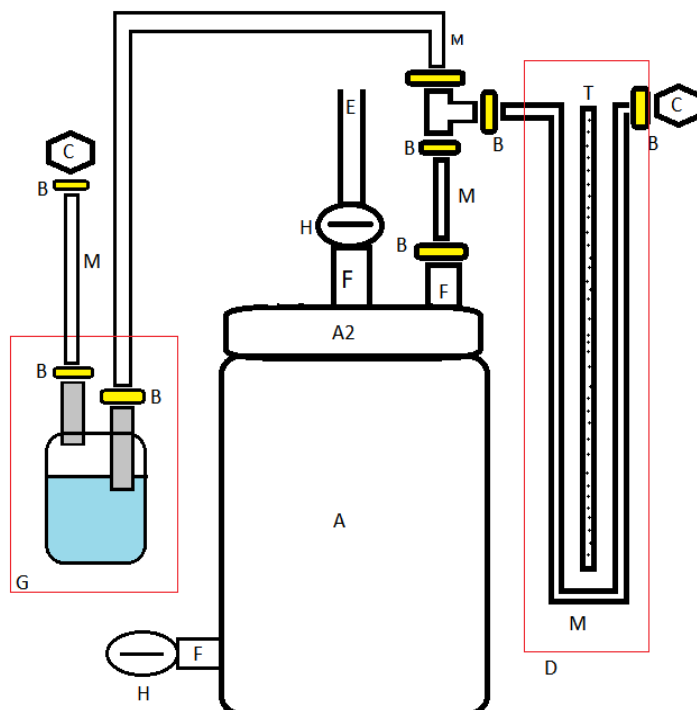
Neste período foram coletados 28,89 kg de resíduos, chegando a uma média diária de 1,22 kg de resíduos/dia. Verifica-se que o valor obtido foi 21,79 % menor que o valor estimado de 1,56 kg, com base nos dados da literatura.

### **5.2. Modelo do biodigestor proposto**

A proposta inicial de construção do biodigestor consistia em desenvolver um modelo de pequeno porte, para ser possível a sua inserção em uma residência urbana. No entanto os valores para aquisição da bombona de 50 L era o mesmo da bombona de 100L, por esse motivo se definiu por adquirir a bombona maior, a fim de ser possível utilizar o mesmo equipamento para estudos futuros em estabelecimentos comerciais.

A Figura 18 mostra um esquema da proposta inicial de construção do equipamento que foi desenvolvido, utilizando com base os trabalhos realizados pelos autores Furman (2015); Metz (2013) e Xavier (2010). Esse equipamento inicial é composto pelo biodigestor, um filtro de água e um manômetro, representados na figura e elencados na Tabela 4, juntamente com seus significados.

Figura 18 - Esquema inicial do biodigestor



Fonte: Autor, 2022

Tabela 4 - Elementos presentes no modelo proposto

Legenda	Significado
A	Bombona
A2	Tampa da bombona
B	Braçadeiras
C	Registro de alta pressão
D	Sistema manométrico
E	Entrada alimentação
F	flange
G	Sistema de filtragem
H	Registro esfera
M	mangueiras

Fonte: Autor, 2022

### 5.3. Montagem do equipamento e custo de implantação

A realização do processo de montagem do biodigestor deu-se pelo seguimento das etapas descritas no tópico 4.2.; e a lista de materiais necessários foi descrita na Tabela 3.

A Tabela 3 também informa que o custo inicial com os materiais necessários para montagem do equipamento corresponde a R\$ 553,40. Logo o valor de investimento inicial



equivale a 45,66% do salário-mínimo atual (18/02/2022), o que demonstra um investimento consideravelmente alto para a população de baixa renda.

Quanto ao tempo necessário para montagem do equipamento, foi possível a montagem de todo o equipamento, realizar a vedação e abastecê-lo de biomassa em 8 horas de trabalho.

Em relação as dificuldades encontradas no processo de montagem, o uso de diferentes diâmetros para as partes do sistema de mangueiras elevou o custo do equipamento pela necessidade de adaptadores, e a inserção deles elevou o número de locais com risco de vazamentos para realizar o selamento com silicone bisnaga.

#### 5.4 O biodigestor

Uma das propostas deste trabalho de conclusão de curso era a elaboração e montagem do equipamento, de forma simples e de fácil reprodução.

A partir dos conhecimentos e conceitos de outros estudos citados no referencial teórico foi possível projetar um modelo de um biodigestor com porte acessível para se ter em uma residência urbana. O modelo proposto foi elaborado de modo a atender a proposta de ser alimentado apenas com resíduos alimentícios gerados por uma residência, de forma contínua e pode ser visualizado na Figura 19.

Figura 19 - Biodigestor finalizado



Fonte: Autor, 2022

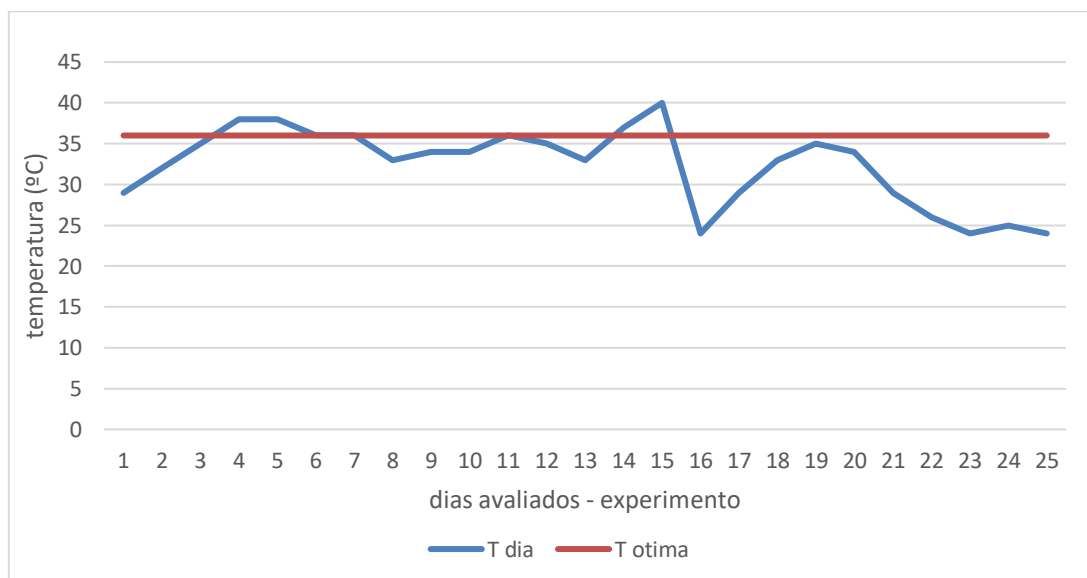
### 5.5 Obtenção de biogás e estimativas de produção no modelo desenvolvido

Para a obtenção do biogás alguns fatores interferentes foram considerados, sendo eles o tamanho das partículas, a temperatura e o tempo de residência.

Em busca de maximizar o processo digestivo, foi realizado a diminuição do tamanho das partículas de modo a facilitar a ação microbiológica conforme especificado no item 4.3.

A proposta do biodigestor tinha como objetivo avaliar seu desempenho em temperatura ambiente de modo que o processo seja economicamente viável. Desta forma durante a etapa experimental foi observada as condições climáticas do município ao qual o equipamento estava exposto, conforme demonstrado na Figura 20.

Figura 20 - Condições de temperatura

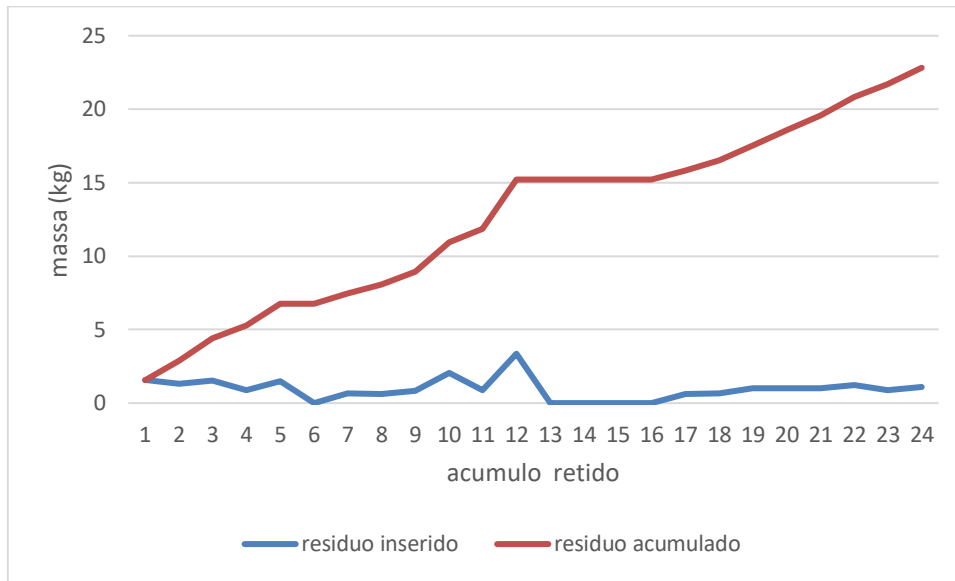


Fonte: Autor, 2022

Os valores de temperatura inferidos foram coletados diariamente as 16h e estão ilustrados na figura 20 pela legenda “T dia”, a Figura 20 também traz a informação da temperatura considerada ótima para o desenvolvimento da microbiota e realização das reações químicas envolvidas no processo de formação do biogás, representada pela linha vermelha, correspondendo ao valor de 35 °C..

O tempo de residência corresponde ao período pelo qual o alimento é inserido no biodigestor e passa pelo processo de decomposição. A Figura 21 descreve a alimentação diária realizada no equipamento proposto, assim como a quantidade de resíduo acumulada dentro do biodigestor ao longo dos dias de realização do experimento.

Figura 21 – Alimentação diária e quantidade de resíduos acumulada

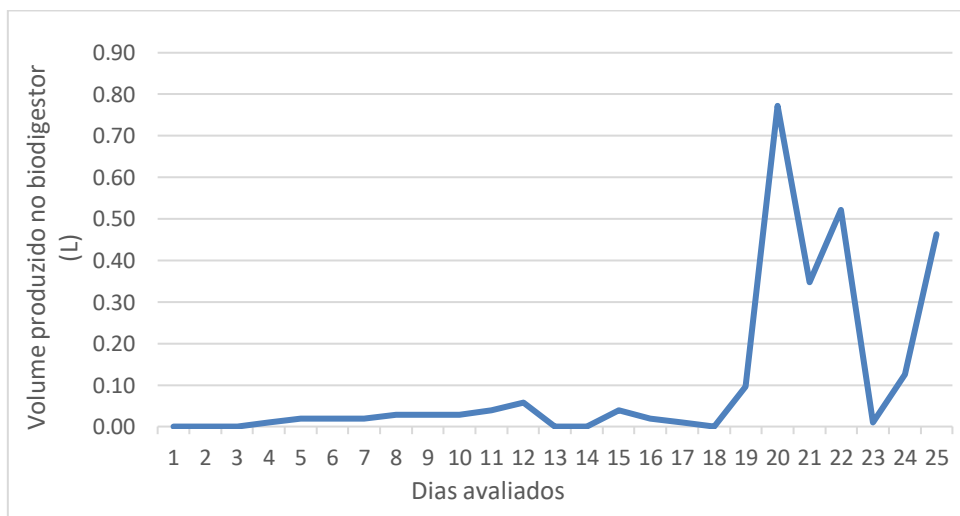


Fonte: Autor, 2022

Segundo o trabalho de Beux (2005), para as biomassas compostas a partir de restos de alimentos, o tempo de detenção situa entre 20 e 30 dias. De forma que em 30 dias a carga orgânica sofre grande redução pela carência de nutrientes presentes e a produção de biogás atinge o máximo e inicia o decaimento.

Nos primeiros dias é liberado gás carbônico e ocorre a proliferação microbológica na biomassa. A partir do quinto dia ocorreu a estabilização da pressão dentro do equipamento até o oitavo dia de avaliação conforme Figura 22.

Figura 22 - Produção de biogás ao longo do tempo



Fonte: Autor, 2022.

É importante comentar que durante a realização da alimentação, no décimo terceiro dia da realização dos experimentos ocorreu um vazamento na entrada de biomassa. O fato causou uma queda imediata de pressão, seguido de um período de adaptação da microbiota após a abertura do equipamento para realização de ajustes. Também é possível observar que no vigésimo dia há uma grande produção de gás conforme o esperado e citado por Beux (2005), assim como pode ser observado que a variação da temperatura influencia na produção de gás após cinco dias.

De acordo com a Figura 20, no décimo sexto dia e no vigésimo primeiro dia houve uma queda da temperatura ambiente, originando uma queda da pressão interna do equipamento, podendo ser observado na Figura 22.

A queda de pressão do dia 23 se dá pela realização do teste da chama, onde foi liberado gás a fim de verificar se era inflamável. Durante avaliação do teste de chama, os resultados foram inconclusivos pois o gás demonstrou possuir presença de metano ao iniciar chama, no entanto, a chama apresentou coloração azul com traços de laranja e rapidamente se dissipou.

No entanto é importante ressaltar que durante o período avaliativo, a produção de biogás demonstrou que não havia estabilizado ainda. Desta forma, um maior tempo de avaliação seria necessário.

Considerando a produção de gás a partir das alterações feitas no equipamento para corrigir o vazamento, foi obtido uma média de 0,22 L de biogás por dia em uma temperatura ambiente média de 30°C.

## **5.6. Estimativas do tempo de retorno do valor investido**

A partir da média produzida de 0,22 L de biogás por dia. Para produzir 13 kg de biogás, valor referente ao de um botijão P13 que é o mais utilizado pelas residências brasileiras, levaria em torno de 60 dias.

Na cidade de Uruguaiana, o valor médio de um botijão P13 é R\$ 102,00 e desta forma após 326 dias o biodigestor nas condições de temperatura de estudo custearia seu investimento inicial ao produzir 5,5 botijões P13 ou 71,5kg de biogás.

## 6. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Realizou-se a elaboração seguida da confecção do biodigestor a partir de materiais de fácil acesso a população. O equipamento atendeu a proposta de possuir tamanho adequado para atender residências em um ambiente urbano devido ao seu tamanho menor quando comparado aos modelos Indiano, Chinês e Canadense.

O custo total do biodigestor foi de R\$ 553,40 para a compra da bombona de 100 litros, registros do tipo esfera, registro de gás, mangueiras, sistema de vedação e conexões.

Em conta do período de pandemia COVID-19, o levantamento e quantificação da produção de resíduos orgânicos limitou-se a residência do autor. Onde foi verificado uma produção média de 1,22kg ao dia, valor esse próximo ao definido na literatura.

A carga residual foi empregada na elaboração de biomassa e totalmente aproveitada na alimentação do biodigestor desenvolvido.

É importante comentar que durante o processo de alimentação foi necessário fazer alterações no projeto inicial para evitar fugas de gás, mesmo assim foi possível realizar a alimentação de forma contínua conforme o proposto.

Quanto a obtenção do biogás, foram obtidos resultados parciais, pois foi possível verificar a produção e armazenamento de biogás no equipamento, a partir da variação de alturas do manômetro do sistema. No entanto a avaliação do teste de chama não foi conclusiva, podendo ser atribuída a necessidade de um período maior de digestão para a completa retirada de O<sub>2</sub> do interior do equipamento, seguido pela possível presença elevada de dióxido de carbono proveniente da digestão de biomassa com tempo de residência inferior a 20 dias.

Entre os dias 28 de fevereiro e 10 de março foram obtidos aproximadamente 2,4 litros de biogás em uma temperatura ambiente média de 30°C, e considerando tais resultados podemos estimar que nessas condições o biodigestor retornaria o valor de capital investido em 326 dias. Na região sul do Brasil o clima tem grande variação durante o período do inverno, por tanto, se faz necessário avaliar o comportamento produtivo de biogás do equipamento para essas condições, o que se planeja avaliar em trabalhos futuros.

Os objetivos propostos foram alcançados de forma satisfatória e apresentando resultados condizentes com o esperado.

## 7. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Inicialmente, podem ser apontadas as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar a avaliação da produção de biogás a partir de biomassas com diferentes valores de diluição afim de verificar a maior rentabilidade;
- Realizar a caracterização de bactérias presentes assim como contagem C/N e pH do meio;
- Avaliação do biofertilizante gerado em plantios;
- Mapeamento da etapa final de produção de biogás utilizando um maior período de avaliação experimental;
- Alterar o sistema proposto para diminuir componentes de forma a baratear seu custo de produção;
- Aplicar outro método de vedação do sistema diferente da bisnaga de silicone de modo que o equipamento suporte pressões internas maiores.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE. Atlas Brasileiro de Emissões de GEE e Potencial Energético na Destinação de Resíduos Sólidos. 2019 Disponível em: <http://abrelpe.org.br/atlas-brasileiro/>. Acesso em agosto/2021

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2020/> Acesso em setembro/2021.

ALBUQUERQUE, Igor. ALENCAR, Ane. ANGELO, Claudio. AZEVEDO, Tasso. BARCELLOS, Felipe. COLUNA, Iris. COSTA JUNIOR, Círiro. CREMER, Marcelo. PIATTO, Marina. POTENZA, Renata. QUINTANA, Gabriel. SHIMBO, Júlia. TSAI, David. ZIMBRES, Bárbara. **Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas de clima do Brasil 1970-2019.** SEEG, 2020. Disponível em: [https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos%20Analiticos/SEEG\\_8/SEEG8\\_DO\\_C\\_ANALITICO\\_SINTESE\\_1990-2019.pdf](https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos%20Analiticos/SEEG_8/SEEG8_DO_C_ANALITICO_SINTESE_1990-2019.pdf). Acesso em: setembro/2021.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Lei 13.576/2017. Disponível em: <http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2015/janeiro&item=ranp-8--2015>. Acesso: julho/2021.

ARAÚJO, A. P. C., **Produção de Biogás a Partir de Resíduos Orgânicos Utilizando Biodigestor Anaeróbico**, 2017. Monografia – Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.

BARREIRA, P. – Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para zona rural, 2003.

BATISTA, P. S., **Geração Biogás e Fertilizante Orgânico Através Usina de Compostagem Pequeno Porte**, 2007. Monografia – Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, Brasil.

BELLI, P.F; CASTILHOS, A.B.; COSTA, R.H.R.; SOARES, S.R.; PERDOMO, C. C. Tecnologias para o tratamento de dejetos de suínos. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental - vol.5 n°1. Campina Grande jan./Abr. 2001.

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

BRONZATTI, F. L.; NETO, A. I., **Matrizes Energéticas no Brasil – Cenário 2010-2030**, outubro de 2008. XXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO – ENEGEP – a integração de cadeias produtivas com a abordagem da manufatura sustentável, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CHERNICHARO, C. A. de L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: Segrac, 1997, v. 5. 245 p. Acesso em: agosto de 2020. Disponível em: <https://ppgema.eec.ufg.br/up/141/o/EmentaEA06.pdf>

CORTEZ, Luís Augusto Barbosa; LORA, Electo Eduardo Silva; GÓMEZ, Edgardo Olivares. **Biomassa para energia**. Campinas: Editora da UNICAMP, 2008.

DEUBLEINB, D.; STEINHAUSER, A. Biogás from waste and renewable resources, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2008 368p.

DONGALA, A. M. **Projeto de biodigestor para geração de bioenergia em sistema de produção de suínos: um estudo de caso da região de Icolo e Bengo – Angola**. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro. 127 p. 2010.

ELLER, C. M. **Caracterização dos compostos traços influentes no aproveitamento energético do biogás gerado em reatores uasb no tratamento de esgoto doméstico**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo. 81p. 2013.

FAEDO, A.M. Tecnologias convencionais e novas alternativas para o tratamento de efluentes domésticos. Universidade do Sul de Santa Catarina. Florianópolis, 2010. FERNANDÓ

FILHO, J. A. C. Biogás, independência energética do Pantanal Matogrossense. Circular técnica nº. 9. Corumbá, EMBRAPA, 53 p., 1981.

FURMAN, L. P., **Construção e Operação de um Biodigestor a Partir de Materiais Reciclados** Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de engenharia química - Universidade Federal do Pampa 51p. 2016

GARCIA JUNIOR, Luiz Claudio, PIRES, Marcel Viana, DA CUNHA, Dênis Antônio, **BIODIGESTORES PARA A MITIGAÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA PELA BOVINOCULTURA NA REGIÃO SUDESTE, BRASIL**. Revista de Economia e Agronegócio, [S. l.], v. 14, n. 1,2,3, 2016. DOI: 10.25070/rea.v14i1,2,3.355. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/rea/article/view/7667>. Acesso em: 24 fev. 2021

GASPAR, R.M.B.L. Utilização de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na região de Toledo - PR. 2003. 106 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento e Estratégia Organizacional) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

JARDINE, José Gilberto, BARROS, Talita Delgrossi, Agência Embrapa de Informação Tecnológica - Plano Nacional de Agroenergia. Embrapa.br, 2011. Disponível em: 48 <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/arvore/CONT000fj1ma9ra02wyiv802hvm3j4y1chlr.html>. Acesso em: setembro, 2021.

JUNIOR, A. B. C. – Simulação do comportamento de um resíduo modelo em aterro sanitário e estudo da evolução bio-físico-química, 2000

Karlsson, T. **Manual básico de biogás** - Lajeado: Ed. da Univates, 2014

KELLEHER, B. P.; LEAHY, J. J.; HENIHAN, A. M.; O'DWYER, T.F.; SUTTON, D.; LEAHY, M.J. Advances in poultry litter disposal technology – a review **Bioresource Technology**. v.83, p. 27-36, 2002.

KIEHL, E. J., Fertilizantes Orgânicos. Piracicaba, Editora Agronômica Ceres Ltda., 1995.



LIMA, Felipe Palma. Energia no tratamento de esgoto: análise tecnológica e institucional para conservação de energia e uso do biogás. 2005. f.139. Programa Inter Unidades de Pós-Graduação em Energia – PIPGE (EP/FEA/IEE/IF). Universidade de São Paulo – USP, São Paulo.

LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J.; **Biocombustíveis volume 1**. 1ª edição. Rio de Janeiro (RJ, BRASIL): Editora Interciência, 2012.

LOPES, L. A.; LOUREZANI, A. E. B. S.; SANTOS, C. V.; dos SANTOS, C. V., dos SANTOS, P. V. B. Desenvolvimento de um biodigestor de baixo custo aplicado na agricultura familiar *Brasilian Journal of Biosystems Engineering* v 14, p. 8-15, 2020 Disponível em: <file:///C:/Users/tania/Downloads/853-Article%20Text-2968-1-10-20200330.pdf> Acesso em fevereiro/2022.

Luiz, Carla Daniela Cordeiro Biodigestão anaeróbia dos resíduos orgânicos do restaurante universitário da UNIPAMPA – campus Bagé / Carla Daniela Cordeiro Luiz. 65 p.

MARIANI, Leidiane. Biogás: diagnóstico e propostas de ações para incentivar seu uso no Brasil. 2018. 1 recurso online (144 p.). Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP. Disponível em: [http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/333144/1/Mariani\\_Leidiane\\_D.pdf](http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/333144/1/Mariani_Leidiane_D.pdf). Acesso em 02 maio 2021.

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

METCALF; EDDY In: *Waste water engineering: treatment and reuse*. 3 ed., McGraw-Hill, Nova York, 1991.

METZ, H. L. **Construção de um biodigestor caseiro para demonstração de produção de biogás e biofertilizante em escolas situadas em meios urbanos**. Monografia (Especialista) – Universidade Federal de Lavras. 39 p. 2013.

NADALETI, Willian César, APROVEITAMENTO DE BIOGÁS, HIDROGÊNIO E GÁS DESÍNTese NO SETOR DE TRANSPORTE PÚBLICO EAGROINDUSTRIAL DE ARROZ: ESTUDO DE POTENCIALENERGÉTICO DE RESÍDUOS E EMISSÕES DE POLUENTES /Willian César Nadaleti; orientador, Paulo Belli Filho, coorientador, Grzegorz Przybyla, 2017.235 p.

NAZARO, M. S. **Desenvolvimento de um biodigestor residencial para processamento de resíduos sólidos orgânicos**, Trabalho de conclusão de curso – Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental - Universidade de Santa Catarina, 105 p. 2016 Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/166781/TCC%20-%20Mariane%20Scheffer%20Nazaro.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> Acesso em fevereiro/2022.

NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta. Biodigestão: a alternativa energética. São Paulo: Nobel, 1986.

OLIVERA, P. M.; *et al...* **Manual de treinamento em biodigestão**. Salvador: Winrock, 2008. 23 p.

OLIVEIRA, P.A.V. Manual de manejo e utilização dos dejetos de suínos. EMBRAPACNPSA. Documentos, 27, 1994.

OLIVEIRA, P. A. V.; HIGARASHI, M. M. Geração e utilização de biogás em unidades de produção de suínos. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2006, 42p.

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, 2006.

PESCADOR, F. S. **Tratamento de esgoto doméstico em reatores sequenciais em batelada anaeróbicos (RSBAn)**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 136 p. 2001.

PRATI, L., 2010. Geração de energia elétrica a partir do biogás gerado por biodigestores. 83p. Projeto de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010. Disponível em: <http://www.eletrica.ufpr.br/ufpr2/tccs/148.pdf>. Acesso em: 19 março 2021.

POMPERMAYER, Raquel de Souza; PAULA JUNIOR, Durval Rodrigues de. Estimativa do potencial brasileiro de produção de biogás através da biodigestão da vinhaça e comparação com outros energéticos. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3., 2000, Campinas. Proceedings online. Disponível em: [http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022000000200055&lng=en&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022000000200055&lng=en&nrm=abn) . Acesso em: setembro/2021.

PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica – ANEEL 2019. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/pt/proinfa> . Acesso em: agosto/2021

REIS, A. D. S. **Tratamento de resíduos sólidos orgânicos em biodigestor anaeróbio**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. 63 p. 2012.

ROSS, C.C.; DRAKE, T.J. – The handbook of biogas utilization, U.S. Department of Energy Southeastern Regional Biomass Energy Program Tennessee Valley Authority, 1996.

SGORLON, J. G.; RIZK, M. C.; BERGAMASCO, R.; TAVARES, C. R. G. **Avaliação da DQO e da relação C/N obtidas no tratamento anaeróbio de resíduos fruti-hortícolas**. Acta Scientiarum Technology, Maringá, Pr, v. 33, n. 4, p. 421-424, 2011. Disponível em: <http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciTechnol/article/viewFile/8259/8259>>. Acesso em: 24 set. 2015.

SILVA, F. M., *et al.*... **Desempenho de um aquecedor de água a biogás**. Revista Engenharia Agrícola, Jaboticabal-SP, vol. 25, no 3, set./dez, 2009 a.

SILVA, W. R. **Estudo cinético de processo de digestão anaeróbica de resíduos sólidos vegetais**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal da Paraíba. 175 p. 2009 b.

SOUZA, A. M. N., **Biogás: Mapeamento das Plantas e Potencial de Produção a Partir de Dejetos Bovinos no RS**, 2021. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Pampa, Rio Grande do Sul, Brasil.

SOUZA, G. C., **Caracterização Quantitativa e Qualitativa dos Resíduos Sólidos Domiciliares: O Método de Quarteamento na Definição da composição Gravimétrica em Cocal do Sul – SC**, 2009. 3º Seminário regional sul de resíduos sólidos – UCS. Caxias do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil. Disponível em: <<http://repositorio.unesc.net/bitstream/1/1372/1/Caracteriza%C3%A7%C3%A3o%20quantitativa%20e%20qualitativa%20dos%20res%C3%ADduos.pdf>> Acesso em: agosto/2021

SOUZA, Quênia. Avaliação da utilização do efluente tratado no processo produtivo da parboilização do arroz. Universidade do Extremo Sul Catarinense. (Trabalho de Conclusão de Curso). p. 67. Criciúma, SC. 2007.

VENTURINI, O. J.; LORA, E. E. S. **BIOCOMBUSTÍVEIS** 1ªED. (2012) editora interciência

Villen, R.A.; Lima, U.A; Aqurone, E; Borzani, W.; Schimidell, W. – **Tratamento biológico de efluentes**, 2001.