

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA

Escola de Engenharia Mauá

Engenharia Mecânica

BEATRIZ FREITAS MARTUCCI

FERNANDO LOVATTO CUBO

LUCAS RODRIGUES SANTOS

Projeto e dimensionamento de biodigestores de baixo custo

São Caetano do Sul

2022

BEATRIZ FREITAS MARTUCCI

FERNANDO LOVATTO CUBO

LUCAS RODRIGUES SANTOS

Projeto e dimensionamento de biodigestores de baixo custo

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. João de Sá Brasil Lima

Área de concentração: Engenharia Mecânica

São Caetano do Sul

2022

Martucci, Beatriz Freitas

Projeto e Dimensionamento de Biodigestores de Baixo Custo/ Beatriz Freitas Martucci, Lucas Rodrigues Santos, Fernando Lovatto Cubo. — São Caetano do Sul: CEUN-IMT, 2022.

72 p.

Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, SP, 2022

Orientador: Prof. João de Sá Brasil Lima

1. Reaproveitar o lixo. 2. Biodigestor. 3. Biogás. 4. Resíduos sólidos urbanos. 5. Economia circular I. Santos, Lucas Rodrigues. II. Cubo, Fernando Lovatto. III. Instituto Mauá de Tecnologia. Escola de Engenharia. IV. Título.

BEATRIZ FREITAS MARTUCCI

FERNANDO LOVATTO CUBO

LUCAS RODRIGUES SANTOS

Projeto e dimensionamento de um biodigestor de baixo custo

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado pela Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Banca avaliadora:

Prof. Dr. João de Sá Brasil Lima

Prof. Dr. Guilherme Wolf Lebrão

Prof. Dr. Armando Zanone

São Caetano do Sul, 6 de dezembro de 2022.

*Dedicamos esse trabalho para você,
amigo(a) ou familiar que contribuiu muito na nossa caminhada.*

AGRADECIMENTOS

Ao nosso orientador Dr. Sr. João de Sá Brasil, pelos ensinamentos, compreensão e paciência durante as etapas do projeto.

Ao nosso laboratorista Téc. Sr. Carlos Augusto, por todos os momentos de troca de conhecimento e pela montagem do nosso biodigestor. Sem o auxílio de ambos o projeto não seria finalizado como realmente deveria.

A nossa amiga Srta. Sophia Augusto Eugenio Ramos, que nos ajudou no início do nosso trabalho, pela parceria durante esta caminhada.

A Srta. Amanda Souza Fernandes, que deu início ao projeto em 2021 com a Iniciação Científica e forneceu dados e apoio neste trabalho.

A todos os familiares e amigos que estiveram presentes, ajudando desde o recolhimento dos resíduos sólidos até a montagem do nosso estande do Eureka.

Aos nossos novos amigos da feira, pela gentileza proporcionada ao nos disponibilizar ajuda nessa etapa final.

“O sucesso é a soma de pequenos esforços repetidos dia após dia.”

Robert Collier

RESUMO

A digestão anaeróbia é um processo químico-biológico no qual bactérias consomem matéria orgânica na ausência de oxigênio, transformando-a em resíduo decomposto e biogás, tais produtos podem ser usados como fertilizante e gás para queima. O biogás por si só apresenta diversas aplicabilidades: seja como gás doméstico, iluminação, aquecimento e até mesmo usar da energia liberada da queima para movimentar um gerador, por conta disso, a digestão anaeróbia se apresenta como uma alternativa mais sustentável ao descarte de restos orgânicos, visto que estes correspondem a mais de 50 % dos resíduos sólidos urbanos. Neste contexto, o presente relatório se propõe a estudar, dimensionar e construir um biodigestor residencial de baixo custo com o objetivo de aproveitar parte do resíduo sólido, sendo o foco de abastecimento do modelo construído frutas descartadas em feiras, para produção de gás natural, utilizá-lo no cozimento de alimentos baseando-se na demanda de gás de uma residência com até 4 pessoas e construir uma tecnologia de economia circular com simples implementação e manutenção. Foram feitos os cálculos da produção diária de resíduos, quantidade necessária de água, volume da câmara de armazenamento e a produção diária de biogás. Ao longo dos experimentos foi observado que os alimentos que apresentam maior rendimento foram as frutas cítricas, sendo elas: laranja, mexerica, abacaxi, maracujá e limão. Os modelos de biodigestores no mercado têm custo entre R\$ 1600,00 até R\$ 5000,00 e os valores são baseados na quantidade de pessoas na residência, sistema de tratamento, instalação e a garantia do produto. O custo inicial para implementação do seguinte projeto foi de R\$ 1305,82. O biodigestor confeccionado tem capacidade de produzir 2 kg de biogás por mês, que equivale a aproximadamente 15 % de um botijão comum usados em residências urbanas (13 kg), levando em conta que este custa em média R\$ 110,42 e que são consumidos cerca de 6,5 kg de gás GLP por mês, é possível economizar R\$ 36,96. O tempo de *payback* encontrado foi de 39 meses, um tempo considerável, mas que pode ser reduzido com implementos de sistemas que estimulem a atividade de decomposição na câmara. Ao final, o biodigestor torna-se acessível para famílias de classe C e superior, com alimentação mais seletiva, mais indicado para residências onde há grande demanda de frutas.

Palavras-chaves: Reaproveitar o lixo. Biodigestor. Biogás. Resíduos sólidos urbanos. Economia circular.

ABSTRACT

Anaerobic digestion is a chemical-biological process in which bacteria consume organic matter in the absence of oxygen, transforming it into decomposed waste and biogas, such products can be used as fertilizer and gas for burning. Biogas by itself has several applications: whether as domestic gas, lighting, heating or even using the energy released from burning to move a generator, because of this, anaerobic digestion presents itself as a more sustainable alternative to the disposal of organic waste, since these correspond to more than 50% of urban solid waste. In this context, this report proposes to study, dimension and build a low-cost residential biodigester with the objective of taking advantage of part of the solid waste, with the focus of supplying for the built model being discarded fruits at fairs, for natural gas production, and reuse it for cooking food based on the gas demand of a house with up to 4 people and build a circular economy technology with simple implementation and maintenance. Calculations were made of the daily production of waste, the required amount of water, the volume of the storage chamber and the daily production of biogas. Throughout the experiments, it was observed that the foods with the highest yield were citrus fruits, namely: orange, tangerine, pineapple, passion fruit and lemon. The models of biodigestors on the market cost between R\$ 1600.00 and R\$ 5000.00 and the values are based on the number of people in the home, treatment system, installation and product warranty. The initial cost for implementing the following project was R\$ 1305.82. The manufactured biodigester has the capacity to produce 2 kg of biogas per month, which is equivalent to approximately 15% of a common cylinder used in urban homes (13 kg), considering that it costs an average of R\$ 110.42 and that it is consumed around 6.5 kg of LPG gas per month, it is possible to save R\$ 36.96. The payback time found was 39 months, a considerable time, but which can be reduced with system implements that stimulate the decomposition activity in the chamber. In the end, the biodigester becomes accessible to families of class C and higher, with more selective food, more suitable for homes where there is a great demand for fruit.

Keywords: Reusing garbage. Biodigester. Biogas. Urban solid waste. Circular economy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Refinaria de biometano de Konnern	4
Figura 2 - Tanques de concreto que fazem parte da planta de Be'er Tuvia	5
Figura 3 - Instalações da usina de Tatura	6
Figura 4 - Fogão à biogás	7
Figura 5 - Usina de Sacramento	8
Figura 6 - Planta de La Farfana	9
Figura 7 - Plantas de tratamento de resíduos orgânicos.....	13
Figura 8 - Produção de biogás por tipo de planta	13
Figura 9 - Processos de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.....	15
Figura 10 - Biodigestor em uma fazenda.....	19
Figura 11 - Biodigestor modelo chinês	21
Figura 12 - Biodigestor modelo indiano	22
Figura 13 - Biodigestor modelo tubular.....	23
Figura 14 - Dimensões da bombona plástica em mm	32
Figura 15 - Dimensionamento do comprimento do volume de resíduo e da água em mm....	33
Figura 16 - Pré-montagem do biodigestor	35
Figura 17 - Biodigestor pronto posicionado	35
Figura 18 - Biodigestor posicionado com bomba de vácuo para drenagem de gás	36
Figura 19 - Alimentos dentro da bombona	37
Figura 20 - Aparecimento de cristais no filtro de soda cáustica	38
Figura 21 - Funcionamento adequado do filtro	39
Figura 22 - Câmara de gás cheia.....	41
Figura 23 - Bico de Bunsen	41

Figura 24 - Gráfico do volume de biogás gerado por dia	43
Figura 25 - Curva do total de biogás gerado ao longo do experimento.....	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABiogás - Associação Brasileira de Biogás e Biometano

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

CIBiogás - Centro Internacional de Energias Renováveis

DA - Digestão anaeróbia

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

GIZ - (*Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH*)

MW - Megawatt

ONG - Organizações da sociedade civil

ONU - Organização das nações unidas

PME - Programa de Mobilização Energética

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

PROBIOGÁS - Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil

PTI - Parque Tecnológico Itaipu

RSU - Resíduos sólidos urbanos

LISTA DE SÍMBOLOS

TRH - Tempo de retenção hidráulica

CO_V - Carga orgânica volumétrica

ST - Taxa de sólidos totais e sólidos totais

P_u - Produção de resíduo diário no Brasil por habitante

F - Fração orgânica do resíduo

SV - Sólidos voláteis

ST_d - Sólidos totais após diluição

ρ - Massa específico do resíduo

P_d - Produção de resíduo orgânico diário no Brasil por habitante

N - Número de pessoas atendidas

C_{st} - Carga de sólidos totais adicionada diariamente no biodigestor

ST_o - Sólidos totais antes da diluição

M_t - Massa total de alimentação diária

V_a - Volume de água adicionado ao resíduo diariamente

$V_{digestor}$ - Volume do tanque do digestor

V_A - Volume de resíduo mais o volume de água

V_R - Volume de resíduo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO DA LITERATURA	3
2.1	CENÁRIO MUNDIAL	3
2.1.1	EUROPA	3
2.1.2	ORIENTE MÉDIO	4
2.1.3	OCEANIA	5
2.1.4	ÁFRICA	6
2.1.5	AMÉRICA DO NORTE	7
2.1.6	AMÉRICA DO SUL	8
2.2	HISTÓRIA DO BIOGÁS NO BRASIL	9
2.2.1	PROGRAMAS DE INCENTIVO DO BIOGÁS AO LONGO DOS ANOS	9
2.3	LEGISLAÇÃO	11
2.4	TRATAMENTO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS POR BIODIGESTORES	12
2.5	DIGESTÃO ANAERÓBICA	14
2.5.1	ETAPAS DA DIGESTÃO ANAERÓBICA	15
2.5.1.1	Hidrólise	15
2.5.1.2	Acidogênese	16
2.5.1.3	Acetogênese	16
2.5.1.4	Metanogênese	16
2.5.1.5	Sulfetogênese	17
2.6	TIPOS DE BIODIGESTORES	17
2.6.1	BIODIGESTOR RESIDENCIAL	17
2.6.2	BIODIGESTOR TIPO BATELADA	18
2.6.3	BIODIGESTOR TIPO CONTÍNUO	20
2.6.4	BIODIGESTOR MODELO CHINÊS	20
2.6.5	BIODIGESTOR MODELO INDIANO	21
2.6.6	BIODIGESTOR TUBULAR	22
3	DESENVOLVIMENTO	25
3.1	PRÉ DIMENSIONAMENTO	25
3.1.1	CÁLCULO DA PRODUÇÃO DIÁRIA TOTAL DE RESÍDUO	26

3.1.2	CÁLCULO DO VOLUME DE ÁGUA NECESSÁRIO	27
3.1.3	TEMPO DE RETENÇÃO HIDRÁULICO	28
3.1.4	CÁLCULO DO VOLUME DO TANQUE DO DIGESTOR	28
3.1.5	PRODUÇÃO DIÁRIA DE BIOGÁS	29
3.1.6	CÁLCULO DO PAYBACK	29
4	CONSTRUÇÃO	31
4.1	MATERIAIS E CONSTRUÇÃO DO PRÓTOTIPO	31
4.2	ABASTECIMENTO.....	36
5	RESULTADOS	41
5.1	LEVANTAMENTO DA CURVA DE GERAÇÃO DE BIOGÁS E CÁLCULO DO PAYBACK	42
6	CONCLUSÃO	45
	REFERÊNCIAS	47
	APÊNDICE A	50

1 INTRODUÇÃO

A próxima geração possui como desafio a preservação do meio ambiente e a busca por melhores soluções para combater o aumento do efeito estufa. Uma dessas soluções consiste na geração de energia elétrica por meio de fontes renováveis.

Juntamente com a evolução das fontes renováveis veio a preocupação com o aumento da demanda de energia elétrica no mundo e com isso a exploração por novos recursos, tornando novamente a poluição um assunto de extrema importância.

Essas fontes de energias surgiram como uma nova proposta a solução dos problemas mencionados. São várias as opções de energia limpa, sendo elas: energia solar, eólica, hídrica, maremotriz, ondo motriz e a geotérmica.

Dentro dessas fontes de energia limpas, tem-se um exemplo promissor, os projetos de biodigestores e a utilização do biogás. O avanço do desenvolvimento do projeto vem sendo considerado com relevância nas matrizes energéticas fora do Brasil, devido aos três pilares em que ele promove: desenvolvimento social, ambiental e econômico. A aplicação do biodigestor independe do local que se é utilizado, capaz de funcionar para todos os casos, mas existem lugares onde elas são mais efetivas, como locais abaixo do nível do mar ou mais quentes por natureza, o que possibilita o processo anaeróbico ser mais rápido. Em alguns países com maior geração de resíduos orgânicos, o biodigestor acaba até tornando-se uma necessidade, por conta da grande geração de lixo e pouco reaproveitamento (GERON, 2014).

O biodigestor serve como um recipiente para resíduos orgânicos que seriam despejados no lixo e somente se decomporia ao ar livre. Visando o melhor funcionamento e possibilitando um melhor resultado, são sugeridos tratamentos específicos a ser realizados nestes resíduos antes de inseri-los no biodigestor (DUARTE, 2020). Este apresenta uma ideia simples que possibilita inúmeras soluções, e em sua grande maioria, de fonte renovável, não agredindo o meio ambiente. Pode-se citar que além de ser uma câmara onde são depositados resíduos orgânicos, seus produtos são utilizados para diversos fins, como geração de energia elétrica e fertilizantes.

Houve a implementação desse projeto em cada um dos continentes, apresentando diversas finalidades, entre elas: tratamento de efluente, conversão de biometano em energias elétrica, sistema de captação de tratamento de biogás, coleta de dejetos humanos para produção de biogás, implementação de biodigestores para reduzir custos das produções da empresa, usina de biogás autossuficiente e o biogás utilizado em táxis (BGS, s.d.).

A história do biogás no Brasil difere dos outros países. Desde o princípio ele não foi devidamente explorado e as pesquisas desse conteúdo estiveram estagnadas por um tempo. Entretanto, devido ao alto crescimento dessa energia ao redor do mundo, o governo brasileiro passou a incentivar sua aplicação dentro do país através do mercado de crédito de carbono e principalmente a iniciativa privada.

Juntamente com a exploração dessa tecnologia vem a preocupação com a sustentabilidade e a parte financeira. Biodigestores comerciais de 300 litros custam por volta de R\$ 1300,00 sem incluir o gasto de sua instalação e manutenção (Portal da terra, s.d.). A média salarial nacional de quem tem carteira assinada atualmente é por volta de R\$ 2447,00, em 2021 (FDR, 2022). A implementação de biodigestores residenciais ainda não é uma solução viável para todos pela questão financeira.

O objetivo deste trabalho é dimensionar, projetar e construir um biodigestor de baixo custo para uso residencial. O dimensionamento será feito com base na quantidade de resíduos gerados por uma família de quatro pessoas. Após a estimativa dessa quantidade, será calculada a capacidade do biodigestor e, conseqüentemente, a quantidade de biogás gerada em um período. Por fim, será feita uma análise financeira para estimar a economia mensal que o biodigestor pode gerar se o biogás for utilizado para atividades cotidianas, como cozinhar, ao invés do gás natural ou GLP.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Os tópicos apresentados nesta seção visam introduzir uma perspectiva geral dos projetos de biodigestores ao redor do mundo, sendo aplicados desde uma central de captação de purificação do biogás até a geração de eletricidade e fertilizantes. Tais iniciativas fora do Brasil influenciaram na evolução das pesquisas e investimentos dessa área no país.

Os biodigestores podem ser classificados de acordo com a sua finalidade, sendo consumo direto de biogás ou geração de energia. Dentro das opções de biodigestores é o tipo residencial que será abordado posteriormente neste trabalho, através do estudo dos tratamentos de resíduos orgânicos até as etapas da digestão anaeróbica necessárias ao dimensionamento.

2.1 CENÁRIO MUNDIAL

Nesta seção são apresentados os investimentos realizados ao redor do mundo abordando o tema de biodigestores, cada um com a sua finalidade e necessidade buscada. O intuito desse tema é demonstrar a importância do crescimento desses projetos na Europa, Oriente Médio, Oceania, África e América do Norte e como isso incentivou o crescimento dessa proposta no Brasil.

2.1.1 EUROPA

Na Europa, o projeto que se destacou no continente foi o realizado na região leste da Alemanha. A usina de biogás Könnern, representa o início europeu pela diversificação da matriz energética do continente. Essa usina é capaz de distribuir biometano em regiões distantes de onde é produzido e fornece 15 milhões de m³ por ano à rede nacional de gás, sendo a sua geração de biogás constituída por rejeitos do setor agrícola e da criação de animais (BGS, s.d.).

A Figura 1 mostra quatro módulos, cada qual composto por quatro biodigestores, quatro tanques de armazenamento e depósito de chorume e um edifício com um separador, uma unidade central de bombeamento e um compressor para o biogás (WELTEC BIOPOWER, s.d.).

Figura 1 - Refinaria de biometano de Könnern



Fonte: BGS equipamentos para biogás, 2018¹

2.1.2 ORIENTE MÉDIO

No Oriente Médio, o projeto da usina e biogás Be'er Tuvia em Israel, inaugurada em 2012, apresenta uma geração de energia elétrica a partir de dejetos bovinos e aves, cerca de dejetos de 14000 vacas e 15% dos dejetos de todas as fazendas de frango da região. A usina é capaz de gerar 4MW de energia e abastecer cerca de 6000 residências. Sua construção resultou da necessidade do correto tratamento de dejetos que antes eram despejados incorretamente. Além de melhorar as questões socioambientais da população, o fertilizante gerado ao final do processo, auxilia na agricultura local (BGS, s.d.). A Figura 2 apresenta os tanques vedados onde ocorre a biodigestão e geração do biogás.

¹ <https://www.bgsequipamentos.com.br/biodigestores-ao-redor-do-mundo/>

Figura 2 - Tanques de concreto que fazem parte da planta de Be'er Tuvia



Fonte: BGS equipamentos para biogás, 2018²

2.1.3 OCEANIA

Dentro da Oceania, precisamente na Austrália, existe a estação de tratamento de efluente Tatura. Em 2007, implantou-se um sistema de captação e tratamento do biogás. O projeto é capaz de gerar 5000 MWh por ano de energia elétrica para a cidade. O esgoto utilizado para a geração do biogás passa por uma purificação com compostos ferrosos e depois é encaminhado ao gerador de eletricidade. A parte inovadora desse projeto consiste na aplicação de um sensor na rede elétrica local o qual permite ao consumidor saber ao final qual foi o percentual do seu consumo mensal e se veio de fontes ambientalmente corretas (BGS, s.d.). A Figura 3 mostra a instalação completa de geração de energia.

² <https://www.bgsequipamentos.com.br/biodigestores-ao-redor-do-mundo/>

Figura 3 - Instalações da usina de Tatura



Fonte: BGS equipamentos para biogás, 2018³

2.1.4 ÁFRICA

A África apresenta um problema ambiental relacionado a precariedade do saneamento básico e com a falta de um sistema de coleta e tratamento de efluentes. Em Kimera, no Quênia a prática mais comum era colocar seus dejetos em sacos e jogá-los em becos. A iniciativa para a solução desse problema consiste na construção de prédios com instalações sanitárias para a produção de biogás. A solução foi criada por uma ONG local em parceria com a ONU. O sucesso dessa implantação deve-se não apenas ao fato da aprimoração do saneamento básico da região, mas também aos constantes esforços em educar a população sobre o funcionamento desse sistema de coleta (BGS, s.d.). A Figura 4 demonstra o seu funcionamento.

³ <https://www.bgsequipamentos.com.br/biodigestores-ao-redor-do-mundo/>

Figura 4 - Fogão à biogás



Fonte: BGS equipamentos para biogás, 2018⁴

2.1.5 AMÉRICA DO NORTE

Dentro da América do Norte, em Sacramento na Califórnia, o biodigestor instalado é alimentado diariamente com 25 toneladas de restos de alimentos vindos dos colaboradores, sendo eles: supermercados, restaurantes e indústrias. Capaz de gerar então o gás natural, eletricidade e o fertilizante agrícola. A usina usa biodigestão anaeróbica de alto teor, permitindo a redução do tamanho do biodigestor assim como o seu custo de operação, visando manter a eficiência para geração do biogás (BGS, s.d.). A Figura 5 apresenta a planta do biodigestor.

⁴ <https://www.bgsequipamentos.com.br/biodigestores-ao-redor-do-mundo/>

Figura 5 - Usina de Sacramento



Fonte: BGS equipamentos para biogás, 2018⁵

2.1.6 AMÉRICA DO SUL

Na América do Sul, o projeto que mais se destacou foi o implantado no Chile. A empresa La Farfana, a maior estação privada de tratamento de efluentes do Chile, é responsável por tratar cerca de 60 % do esgoto gerado em Santiago.

Após a geração do biogás, ele é transportado até uma central onde passa por processo de purificação, resultando em um gás natural responsável por atender o consumo de 10 % dos clientes industriais e domésticos da empresa (BGS, s.d.). A Figura 6 apresenta a planta da estação de tratamento dos efluentes.

⁵ <https://www.bgsequipamentos.com.br/biodigestores-ao-redor-do-mundo/>

Figura 6 - Planta de La Farfana



Fonte: BGS equipamentos para biogás, 2018⁶

2.2 HISTÓRIA DO BIOGÁS NO BRASIL

Dentro da América do Sul existe também a implementação de projetos de biodigestores no Brasil. O incentivo governamental para melhores facilitações de projetos é recente e vem ganhando crédito até hoje. Em seguida uma ordem cronológica dos fatos.

2.2.1 PROGRAMAS DE INCENTIVO DO BIOGÁS AO LONGO DOS ANOS

O biogás inicia a sua história no Brasil em 1979 devido à crise de petróleo, e desde essa época, a aplicação acerca dessa energia renovável no país evoluiu. A Granja do Torto por exemplo, em Brasília, recebeu um dos primeiros biodigestores do país.

Em 1982, João Figueiredo (UNIÃO, 1982) desenvolveu o Programa de Mobilização Energética (PME), obtido através da estimulação do governo federal na aplicação de materiais simples e baixo custo de construção possibilitados através da criação de biodigestores em áreas rurais, principalmente por visar na substituição dos derivados de petróleo que já eram utilizados.

Durante a década de 90, o biogás voltou a ser uma alternativa para a redução de gases do efeito estufa com o auxílio dos créditos de carbono, o qual é representado como uma moeda

⁶ <https://www.bgsequipamentos.com.br/biodigestores-ao-redor-do-mundo/>

no mercado de carbono. Um crédito de carbono representa uma tonelada de carbono que não foi emitida para atmosfera e dentro desse mercado, as empresas que ultrapassarem os limites das emissões podem comprar esses créditos de carbono para compensar suas emissões (SUSTAINABLE CARBON, 2015).

A partir do século 21, o governo federal e as empresas privadas passaram a dar maior importância ao biogás, auxiliando no desenvolvimento dele pela América do Sul e com o auxílio do mercado de crédito de carbono, entre 2005 e 2013, instalou-se 1000 biodigestores no Brasil.

A seguir marcos históricos de projetos e leis do biogás no Brasil (CIBIOGAS, 2020).

- 2009 – Assinado o projeto para modelagem do Laboratório de Biogás no PTI (Parque Tecnológico Itaipu);
- 2010 – Instituiu-se a Política Nacional de Resíduos Sólidos com o objetivo de prevenir e reduzir a geração de resíduos sólidos;
- 2010 – Implantação do primeiro laboratório de Biogás no Brasil;
- 2011 – Lançamento do primeiro curso em Atualização de Energias de biogás, pelo CIBiogás;
- 2012 – Aprovada a lei que permitiu ao consumidor brasileiro autorização para gerar a própria energia elétrica a partir de alternativas renováveis. Houve também nesse ano o lançamento de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (ABC);
- 2013 – Associação Brasileira de Biogás e Biometano (ABiogás) foi criada;
- 2014 – CIBiogás lançou o projeto Mobilidade a Biometano, voltado a redução dos gases de efeito estufa por meio dos veículos a biometano;
- 2016 – Entrega do projeto do EMBRAPA, PTI, CIBiogás e Centro Internacional de Hidroinformática, que promoveu estudos e soluções paratecnológicas para uso integrado de biogás, biofertilizantes e organominerais, obtidos a partir de dejetos animais dos diferentes sistemas de produção agropecuários;
- 2017 – Programa Federal RenovaBio, tendo como principal meta nacional anual a descarbonização para o setor de combustíveis;

- 2018 – Nova lei sancionada para regulamentação dos investimentos da geração de energia renovável e ao incentivo as cadeias produtivas.

2.3 LEGISLAÇÃO

Para entender um pouco mais sobre a legislação que está em vigor no Brasil não se pode deixar de mencionar senão o principal pilar que é a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) - Lei nº 12.305/10- definido pelo Ministério do Meio Ambiente, que visa frear os impactos ambientais, sociais e econômicos causados pelo não planejamento no setor sanitário, mais especificamente, resíduos sólidos. Fica acordado que os responsáveis pela produção destes resíduos também deverão fazer o pós-processamento dos mesmos - Logística Reversa dos resíduos e embalagens. Também tem como objetivo a extinção dos aterros e a criação de projetos à nível nacional de incentivo organizacional em relação a elaboração de Planos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos em diferentes níveis governamentais. Enfim, o ponto central deste projeto de lei é de atingir pelo menos 20 % o número de reciclagem no país (Ministério do Meio Ambiente, 2010).

Outra questão a ser abordada pela legislação é que tipo de resíduo que se enquadra nos quesitos para serem considerados aptos a serem colocados no biodigestor, como por exemplo, resíduos domiciliares, industriais e até resíduos perigosos (corrosivos, tóxicos). A categoria que não se encaixa seriam os resíduos radioativos, que possuem uma legislação específica.

Com isso, é perceptível que os Planos de Resíduos Sólidos se diferenciam da Política Nacional de Resíduos Sólidos. Já a PNRS pode ser definida como um documento/lei feito de base e oferecendo os instrumentos para somente depois ser colocada em prática (LIMA, s.d.).

A VGR resíduos diz que essa legislação veio para influenciar a forma com que é feito o gerenciamento de resíduos nas empresas que agora deverão reduzir a geração de resíduos e aumentar a reciclagem e reaproveitamento dos mesmos e dar uma nova finalidade visando as questões ambientais, além de adotar hábitos cotidianos mais sustentáveis. Eles também

falam que a PNRS movimentou a economia dos resíduos. Agora o que antes era considerado como uma desvantagem se tornou um ponto forte que promove tanto o meio social quanto econômico.

Tendo em vista os incentivos citados acima para o tratamento de resíduos sólidos orgânicos no Brasil, e investimentos em tecnologias para geração de energia sustentável, os biodigestores podem significar uma solução simples e eficiente para este problema. Nos seguintes tópicos será explicitado os aspectos técnicos na digestão anaeróbica e digestores.

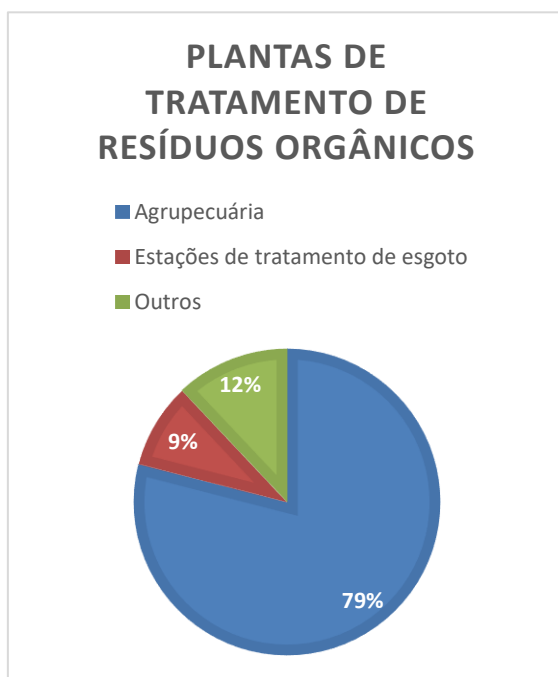
2.4 TRATAMENTO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS POR BIODIGESTORES

O uso da tecnologia de digestão anaeróbica é amplamente conhecido e utilizado seja para o tratamento de resíduos sólidos afim de se dar uma finalidade ao rejeito orgânico, produzindo fertilizantes ou para geração de energia se utilizando do biogás produzido no processo de degradação do material. Tendo isso em vista, diversos setores podem se beneficiar desta metodologia. No meio urbano pode realizar um descarte sustentável do lixo orgânico de residências. No setor industrial para evitar desperdícios de material orgânico que foi produto rejeitado ou não utilizado de um processo de produção, e no setor agropecuário, em situações em que um produto não atende as especificações para ser vendido no mercado, há a possibilidade de geração de energia para reutilização no mesmo processo (NAZARO, 2016).

Nesse quesito destaca-se o Projeto Brasil Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil, PROBIOGÁS – que vem incentivando a inserção da tecnologia de biodigestores nos setores agropecuário, urbano e industrial no Brasil. Desenvolvido pela Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades e a GIZ (*Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH*), o projeto tem como objetivo a ampliação do uso do biogás na matriz energética nacional e conseqüentemente, a redução da emissão de gases de efeito estufa. O PROBIOGÁS incentiva a capacitação de profissionais brasileiros em diversos níveis para atuarem nesse processo, trazendo consigo outros benefícios como a geração de empregos e o fortalecimento do mercado de biogás no Brasil.

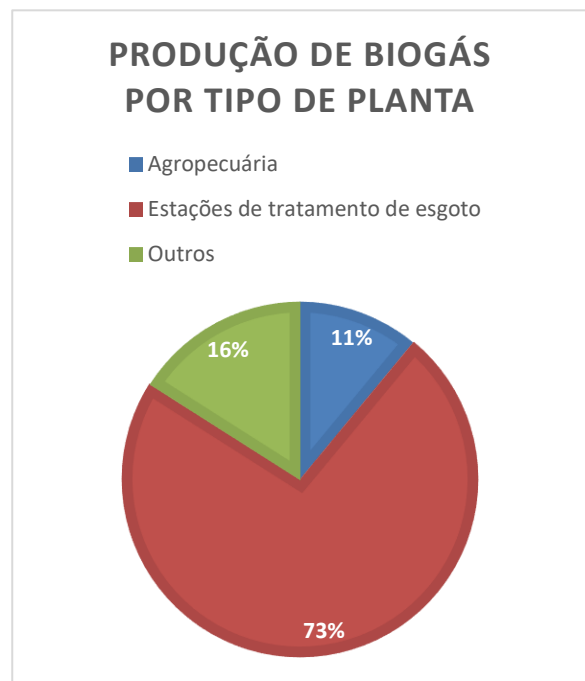
De acordo a CIBiogas (2020), um instituto dedicado ao desenvolvimento do biogás como recurso energético limpo e competitivo, o Brasil conta com 675 plantas de geração de biogás sendo que 638 encontram-se em operação para fins energéticos. A principal aplicação do biogás produzido se direciona para a geração de energia elétrica, térmica, mecânica e biometano. A principal fonte de substrato vem do setor agropecuário, com 79 % das plantas, porém sua contribuição no volume total de biogás é de apenas 11 %, a maior parte da produção vem dos resíduos sólidos urbanos (RSU) ou efluentes de estações de tratamento de esgoto, que apesar de representarem 9 % das plantas, são responsáveis por 73 % do total de biogás produzido. A Figura 8 e a Figura 7 ilustram essa distribuição.

Figura 7 - Plantas de tratamento de resíduos orgânicos



Fonte: Adaptado de CIBiogas (2020)

Figura 8 - Produção de biogás por tipo de planta



Fonte: Adaptado de CIBiogas (2020)

O uso de biodigestores é justificado pelos benefícios ambientais que podem proporcionar mesmo em casos em que não geram lucro. O método de descarte de resíduos mais usual, isso é, os aterros sanitários, além de não serem economicamente viáveis também geram grandes passivos ambientais. Já o tratamento por biodigestores além de não gerarem esses passivos ambientais, tratam o resíduo e tem subprodutos valorizados (NAZARO, 2016).

As principais vantagens do uso de biodigestores para o processamento de biomassa são:

- Diminuição da liberação de gases de efeito estufa;
- Possibilidade do uso dos efluentes do processo como biofertilizantes;
- Aproveitamento do gás metano como combustível;
- Baixo consumo de energia no processo;
- Tratamento de resíduos, promovendo a diminuição da carga orgânica.

2.5 DIGESTÃO ANAERÓBICA

A digestão anaeróbia (DA), ou biodigestão, é um processo metabólico, bioquímico onde bactérias anaeróbicas interagem com material orgânico na ausência de oxigênio para transformar compostos orgânicos complexos (carboidratos, proteínas e lipídeos) em CH_4 , N_2 , NH_3 , H_2S , CO_2 , entre outros gases e ácidos orgânicos de baixa massa molecular (LEITE, LOPES, *et al.*, 2009). As bactérias responsáveis pelo processo de DA não sobrevivem em um meio onde se encontram moléculas livres de oxigênio. Decorrente da presença de oxigênio na matéria prima, leva se um tempo para que essas moléculas sejam consumidas e o processo de biodigestão inicie se em si (TEIXEIRA, 2005).

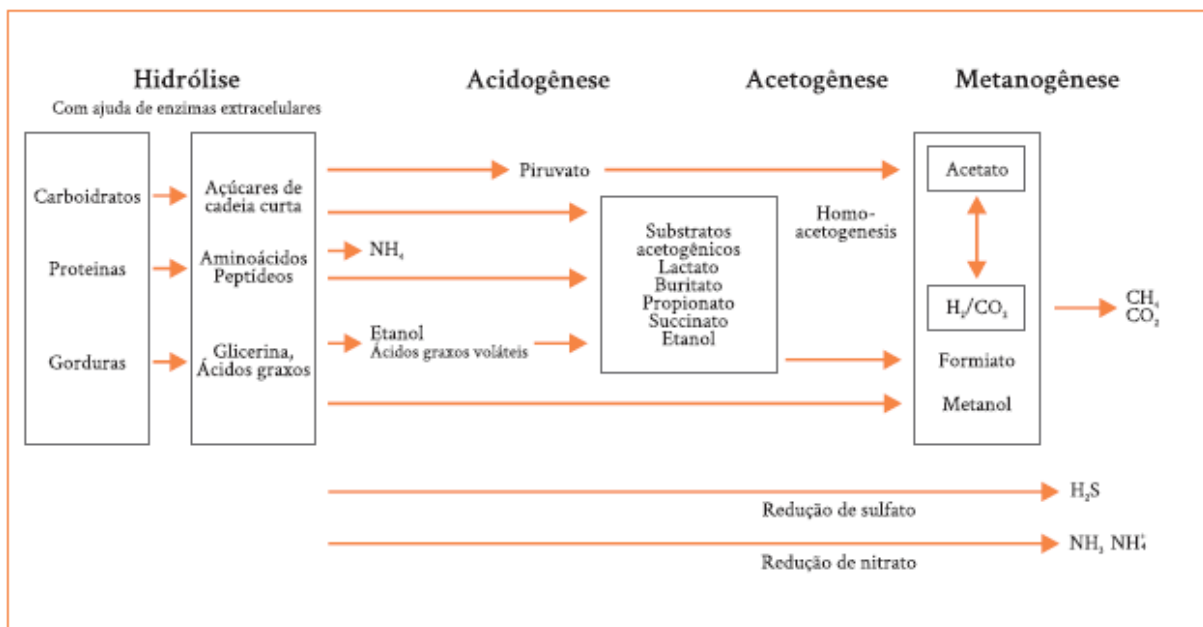
A DA ocorre em processos naturais, nos ambientes anóxicos como cursos de água, sedimentos, solos encharcados e até mesmo no intestino de mamíferos (WARD, 2008). Todos os compostos orgânicos podem ser degradados por via anaeróbica, sendo que o processo se mostra mais eficiente e econômico quando as substâncias são facilmente biodegradados.

O processo de digestão não ocorrerá na presença de oxigênio e também na de nitratos e sulfatos, por funcionarem como aceptores finais de elétrons. De acordo Silva (2009) os aceptores finais de íons utilizados no processo de biodigestão são nitrato (NO_3^-) e sulfatos (SO_4^-) que serão reduzidos a gás nitrogênio e a gás sulfídrico (H_2S), respectivamente; e CO_2 , que é reduzido a metano.

2.5.1 ETAPAS DA DIGESTÃO ANAERÓBICA

A digestão anaeróbica pode ser dividida em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Cada uma dessas etapas é realizada por diferentes grupos de microrganismos, simultaneamente e com diferentes condições ambientais (KUNZ, STEINMETZ, *et al.*, 2019). O produto de um determinado grupo de bactérias será utilizado como alimento para outro grupo de microrganismos, assim, vários produtos intermediários são constantemente produzidos e logo em seguida processados. A Figura 9, demonstra as quatro etapas da digestão anaeróbica.

Figura 9 - Processos de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese



Fonte: Adaptado de Deublein e Steinhauser (2011)

2.5.1.1 Hidrólise

Nesta etapa enzimas extracelulares excretadas pelas bactérias hidrolíticas degradam compostos de alta massa molecular e cadeia complexa como lipídios, polissacarídeos e proteínas em substâncias orgânicas solúveis e mais simples de serem processadas nas próximas etapas. As características das moléculas é o que determina a velocidade de degradação na etapa de hidrólise, quanto mais complexas e difíceis de serem degradadas, a hidrólise apresenta maior importância na velocidade global de degradação, podendo ser a

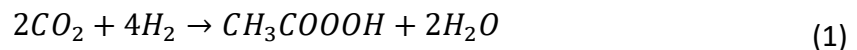
etapa limitante na velocidade da DA. Carboidratos demoram algumas horas para serem processados, já proteínas e lipídeos podem demorar alguns dias (KUNZ, STEINMETZ, *et al.*, 2019).

2.5.1.2 Acidogênese

Os monômeros gerados na etapa de hidrólise são usados como substratos por diferentes bactérias anaeróbicas e facultativas, sendo degradados na fase de acidogênese a ácidos orgânicos de cadeia curta, álcoois, óxidos de nitrogênio, sulfeto de hidrogênio, hidrogênio e dióxido de carbono. Os carboidratos são transformados em piruvato, em seguida é convertido em ácido láctico e etanol. Os ácidos graxos são oxidados a acetato. Já os aminoácidos são degradados em pares, onde um deles doador de elétrons e o outro como receptor (KUNZ, STEINMETZ, *et al.*, 2019). Essa reação tem como resultado o acetato, amônia, dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio. Os ácidos graxos voláteis são os principais produtos de organismos fermentativos (por exemplo as bactérias fermentativas *Clostridium* e *Bacteroids*) (SIQUEIRA, 2010).

2.5.1.3 Acetogênese

Na terceira fase da digestão anaeróbica, bactéria acetogênicas são responsáveis pela oxidação dos produtos gerados na fase de acidogênese, produzindo ácidos orgânicos. De acordo com Kunz (2019) ácidos de cadeias longas são transformados em ácidos com um ou dois átomos de carbono (fórmico e acético), e simultaneamente produzindo H₂ e CO₂. Com isso as bactérias reagem consumindo estas duas moléculas a fim de manter o equilíbrio da reação (KUNZ, STEINMETZ, *et al.*, 2019).



2.5.1.4 Metanogênese

Na etapa seguinte (etapa gasosa) é onde as arqueas metagênicas convertem o carbono contido na biomassa em dióxido de carbono e metano. Os grupos de arqueas metagênicas envolvidas neste processo podem ser divididas em dois grupos: o primeiro chamado de

acetoclásticas composto por dois gêneros: *Methanosarcina* e *Methanosaeta*; e o segundo grupo hidrogenotróficas: *Methanobacterium*, *Methanospirillum* e *Methanobrevibacter* (SIQUEIRA, 2010). O primeiro converte acetato em metano e são responsáveis por 70 % do metano produzido na digestão anaeróbica, enquanto o segundo converte hidrogênio em metano e gás carbônico, produzindo 30 % do total de metano no processo inteiro (KUNZ, STEINMETZ, *et al.*, 2019).

2.5.1.5 Sulfetogênese

Na etapa final, durante a oxidação, o sulfato e outros compostos a base de enxofre são utilizados como receptores de elétrons, produzindo sulfetos. Por meio da ação de um grupo de microrganismos anaeróbicos, chamadas de bactérias sulforedutoras, reduzem compostos sulfarados (por exemplo: sulfato, sulfito) a sulfeto. Essas bactérias quando na presença de sulfatos, passam a competir com outros microrganismos fermentativas pelo substrato presente no ambiente, tal competição se torna mais acentuado quando a concentração de sulfato aumenta em relação a demanda química de oxigênio (SIQUEIRA, 2010).

2.6 TIPOS DE BIODIGESTORES

Os biodigestores podem ser classificados de acordo sua finalidade: seja para o consumo direto do biogás ou geração de energia. Ou pela sua estrutura, forma e frequência de alimentação de material orgânico, coleta e separação do biogás e do produto orgânico, concentração de sólidos no reator e sistemas de agitação.

2.6.1 BIODIGESTOR RESIDENCIAL

Para usos domiciliar, o biogás pode ser usado para diversas finalidades como: cozimento, aquecimento de água e iluminação. Para estes fins é possível usar biodigestores pequenos (com câmara de digestão de 50 m³), já para o aproveitamento de energético seria necessário máquinas com maiores dimensões (NAZARO, 2016).

Em diversos países a tecnologia do biodigestor vem ganhando destaque como energia renovável devido a diversas vantagens ambientais que vem com seu uso, como alternativa de

uso em relação a combustíveis sólidos e maior disponibilidade de matéria prima proveniente da biomassa residual gerada em diversas atividades. Países da Europa e América do Norte vêm aplicando leis e campanhas ambientais a fim de estimular o uso de biodigestores, assim como investimentos na produção de biogás para tratamento de efluentes e geração de energia elétrica (AQUINO, 2014).

Em países desenvolvidos o uso do biodigestor tinha como objetivo ser uma alternativa para tratar efluentes e produtos orgânicos e gerar energia de forma limpa. Enquanto em países em desenvolvimento, como a China e a Índia, o biodigestor foi visto como uma tecnologia capaz de aproveitar a energia proveniente do biogás para trazer a população mais carente recursos essenciais para sobrevivência como aquecimento e energia elétrica. Além disso, o aproveitamento da biomassa residual diminui problemas de saneamento básico causados pela má gestão de resíduos sólidos urbanos. Para atender a essas necessidades os biodigestores residenciais são pequenas plantas, com o principal foco do biogás para o cozimento, além de terem baixo custo de implantação e manutenção (NAZARO, 2016).

Nesse contexto, existem vários tipos de biodigestores residenciais usados por todo o mundo. Nos países em desenvolvimento os modelos usados em domicílio são classificados biodigestores de baixa taxa ou primeira geração, já que são projetados para comportar resíduos orgânicos residenciais. Para uma manutenção mais simples e de menor custo, são desprovidos de tecnologias mais complexas como sistemas de aquecimento e agitação, com o foco na acessibilidade capaz de solucionar problemas de fornecimento de energia. Os três tipos de biodigestores mais utilizados nessa área são: biodigestor modelo chinês, biodigestor modelo indiano e os biodigestores tubulares (SASSE, 1988). Os digestores podem ainda ser classificados em relação ao seu regime de alimentação, sendo de dois tipos: batelada e contínuo.

2.6.2 BIODIGESTOR TIPO BATELADA

Nos biodigestores tipo batelada (não-contínuo) são modelos nos quais é colocado uma grande quantidade de matéria orgânica de uma vez, isso é, a recarga ocorre apenas uma vez por ciclo. Em seguida, fecha-se o sistema impedindo a entrada de oxigênio e mantém-se assim por um

período de 40 dias a 60 dias. Depois que toda a biomassa for consumida, a produção do biogás diminui e é possível retirar o produto restante para ser utilizado como fertilizante, porém é recomendado deixar no digestor 20 % do produto para garantir que no próximo ciclo haja microrganismos suficientes (EMAS Jr., 2020).

Sua estrutura é formada apenas pela câmara de digestão (feita de alvenaria) e pelo medidor de gás (gasômetro). Por isso se encaixa no padrão de digestores residenciais, possuindo um sistema simples e fácil manutenção. Por conta de seu regime de alimentação geralmente é empregada em lugares onde haja periodicidade na produção de biomassa, como por exemplo em granjas de aves (Figura 10Figura 10).

Figura 10 - Biodigestor em uma fazenda



Fonte: EMAS JR. Consultoria, 2004⁷

⁷ <https://emasjr.com.br/blog/2020/03/16/entenda-os-tipos-de-biodigestor-e-qual-e-o-mais-adequado-para-voce/>

2.6.3 BIODIGESTOR TIPO CONTÍNUO

Diferentemente da batelada, biodigestores do tipo contínuo são alimentados sucessivamente através de dutos de alimentação, o biogás e biofertilizante também é retirado do digestor por meio de um sistema de dutos e canos.

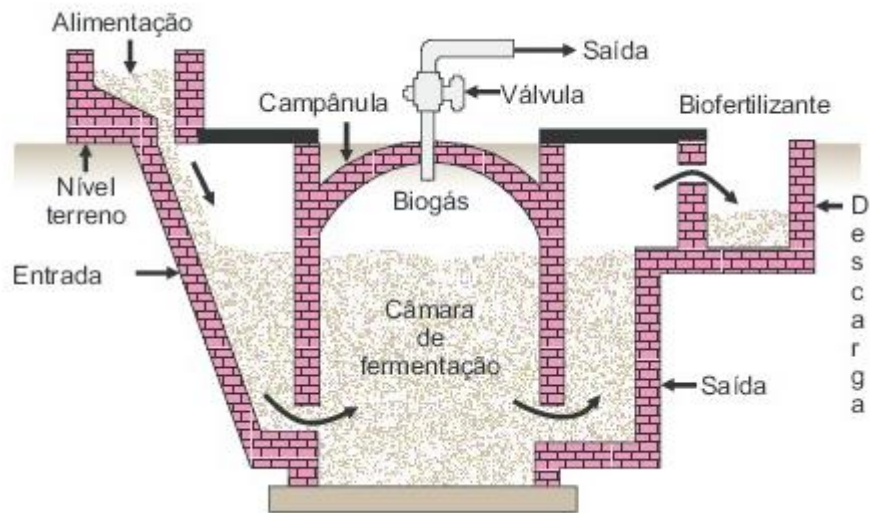
Sua construção e forma no solo varia também. Sistemas verticais costumam ficar enterrados, sua alimentação é feita por baixo e a extração do gás é realizada na parte superior, demandam maior cuidado de implantação e manutenção pelo risco de contaminação. Já nos sistemas horizontais, a alimentação e extração dos produtos são realizados nas laterais, podendo ficar enterrado ou não. Para evitar a contaminação é recomendado a construção em áreas sem a presença de lençóis freáticos. Outra recomendação para este modelo é utilização de materiais de fácil decomposição, triturá-los se possível e diluição, evitando assim entupimento dos dutos e a formação de crostas internas (EMAS Jr., 2020).

2.6.4 BIODIGESTOR MODELO CHINÊS

O modelo chinês do biodigestor é normalmente construído sob o solo, formado por uma câmara cilíndrica em alvenaria (tijolo), onde ocorre a fermentação, com teto abobado para o armazenamento do biogás. O princípio de funcionamento desse digestor se baseia no de uma prensa hidráulica: à medida que gás é gerado, a pressão interna na câmara aumenta e desloca o material digerido para a caixa de saída até que o gás seja consumido e com o alívio de pressão há o retorno de material orgânico (DEGANUTTI, PALHACI, *et al.*, 2002).

Por ser construído em alvenaria esses modelos são geralmente de baixo custo, porém é necessário que a estrutura seja bem vedada e impermeabilizada para que não haja risco de vazamento de gás. O substrato deve ser inserido entre curtos períodos para que o reator possa ser do tipo contínuo, garantindo assim melhor funcionamento. E a concentração de sólidos no substrato deve ser de 8 %, para evitar entupimentos na entrada do sistema e facilitar sua circulação. A Figura 11 mostra um biodigestor em corte, e seus principais componentes.

Figura 11 - Biodigestor modelo chinês



Fonte: Adaptado de Emas Jr., (2020)

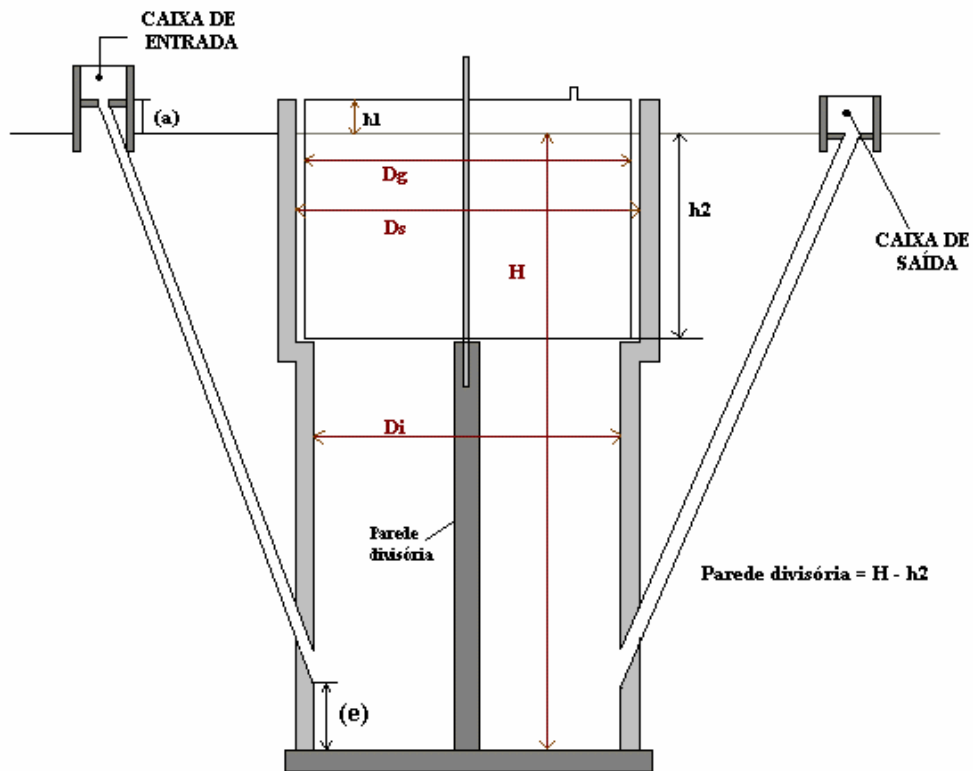
2.6.5 BIODIGESTOR MODELO INDIANO

O modelo indiano é caracterizado por possuir como câmara de biogás uma cúpula móvel, que flutua o tanque de fermentação. A cúpula tem como finalidade armazenar o gás sem aumento da pressão, assim à medida que é gerado e não consumido o gasômetro é deslocado verticalmente para cima e com o consumo do gás, descende. Pelo fato de a câmara estar acima do substrato ou do selo de água, reduz as perdas de gás durante a produção (DEGANUTTI, PALHACI, *et al.*, 2002).

Assim como no modelo chinês, a fim de atingir melhor funcionamento do reator é recomendável que o digestor seja alimentado de forma contínua, com resíduos orgânicos diluídos em água. A concentração de sólidos totais também deve ser de 8 % para facilitar o escoamento nos dutos.

No quesito construtivo, pode-se considerar esse modelo como de fácil construção, todavia o gasômetro de metal pode encarecer o custo final, e a distância da propriedade pode dificultar o transporte e adicionar ainda mais gastos. A Figura 12 mostra um biodigestor em corte, e seus principais componentes.

Figura 12 - Biodigestor modelo indiano

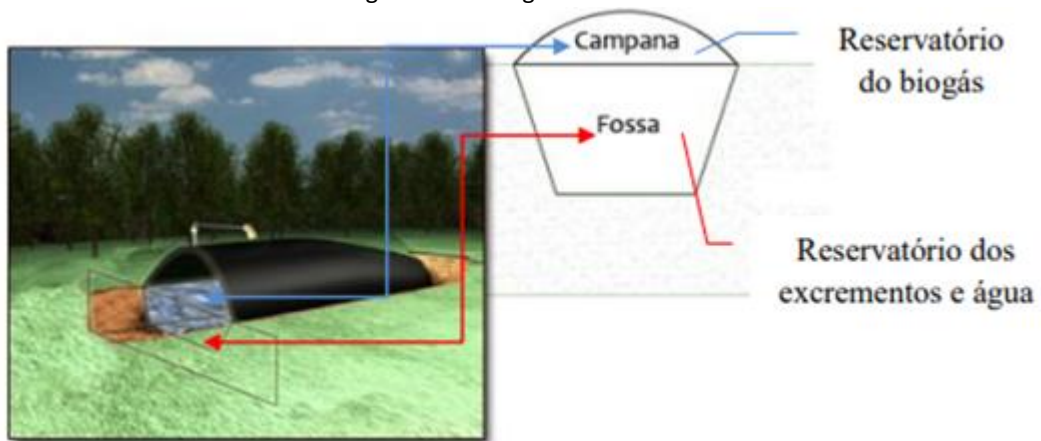


Fonte: Adaptado do Deganutti et. Al, (2002)

2.6.6 BIODIGESTOR TUBULAR

Os biodigestores tubulares são divididos em duas partes, uma para fase líquida e uma para fase gasosa. A parte superior é chamada de campana, onde é armazenada o biogás produzido pela fermentação do composto orgânico, este por sua vez, fica armazenado na parte inferior denominada fossa, destinada à mistura líquida que entra no sistema (água mais excremento de animais). Para este tipo de construção é comum alteração da relação líquida gás para atender a necessidade de produção do biogás, ou seja, para se adequar a matéria disponível ambiente (RIBEIRO, 2011).

Figura 13 - Biodigestor modelo tubular



Fonte: Adaptado de Ribeiro, (2011)

3 DESENVOLVIMENTO

Dentre todos os modelos de biodigestores listados anteriormente o seguinte projeto foi baseado no biodigestor batelada por conta da alimentação cíclica, com foco de estudo na alimentação por frutas cítricas.

3.1 PRÉ DIMENSIONAMENTO

A metodologia aplicada para o dimensionamento do biodigestor baseou se na análise da configuração de reatores já existentes e no Tempo de Retenção Hidráulica (TRH) ou Carga Orgânica Volumétrica (CO_v) que dependem da temperatura, do tipo de substrato e do teor de sólidos totais (NAZARO, 2016). Nessas variáveis são considerados os aspectos cinéticos e hidrodinâmicos do sistema, definido isso as características construtivas são definidas pelo projetista. As principais variáveis do projeto usadas como parâmetro para a construção de um digestor anaeróbico são a vazão de alimentação do reator, temperatura de processamento no reator e o tempo de retenção hidráulica.

Como foi explicitado na revisão bibliográfica, a digestão anaeróbica é um processo realizado por um grupo complexo de microrganismos na ausência de oxigênio, em qual as etapas ocorrem consecutivamente e os produtos de uma etapa são usados nas subseqüentes, tornando o manuseio desse sistema muito difícil. Para atingir os resultados esperados é necessário atingir todas as condições adequadas, visto que uma alteração em dos fatores que afetam a digestão pode comprometer todo o processo.

É proposto nesse projeto a construção de um biodigestor que busque o equilíbrio entre simplicidade e uma boa produção para uma residência urbana média, com maior facilidade de manuseio e baixo custo de implantação e manutenção. Portanto, será considerado como composição do resíduo orgânico as frutas cítricas e o volume do abastecimento ser suficiente para suprir a produção de gás de cozinha para uma casa com 4 moradores. O gás gerado na decomposição poderá ser usado para aplicações comuns dentro residência, como: em queimadores para cozimento de alimentos, iluminação e até mesmo aquecimento de água. Foi decidido dimensionar o reator apenas para a primeira aplicação, considerando o foco do

projeto em simplicidade, já que para as outras opções exigiriam múltiplas instalações de tubulações de gás em uma casa e no caso da última necessitaria de uma caldeira para aquecimento, que pode ser inviável numa casa já construída. Para fins de cálculos, será considerado que um fogão com quatro bocais iguais permanecerá aceso 3 horas por dia.

Para a determinação do total de resíduos orgânicos gerado por residência foram considerados os dados da ABRELPE coletados em 2021, onde é afirmado que foram coletados 82,5 milhões de toneladas de resíduo ao ano referentes a 211.182 pessoas atendidas, isso é, 1,07 quilogramas por habitante por dia. Já para as características do resíduo orgânico como massa específica e taxa de sólidos totais (ST) foram adotadas conforme determinadas por Brown e Li (2013).

3.1.1 CÁLCULO DA PRODUÇÃO DIÁRIA TOTAL DE RESÍDUO

De acordo os dados da ABRELPE (2021) cada brasileiro produz em média 1,07 kg de resíduo sólido por dia e que o biodigestor desse projeto pretende atender uma residência com uma família de 4 pessoas, o cálculo para determinar o total de resíduo orgânico produzido por dia pode ser determinado pela Equação (2):

$$P_d = \frac{P_u \cdot F \cdot N}{100} \quad (2)$$

Na qual:

P_d : Produção de resíduo orgânico diário no Brasil por habitante (kg/hab/dia);

P_u : Produção de resíduo diário no Brasil por habitante (kg/hab/dia);

F: Fração orgânico do resíduo (%);

N: Número de pessoas atendidas.

De acordo com a Abrelpe (2021) a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos corresponde a 51,4 %. Considerando este dado e a equação 2, pode se afirmar que em uma residência de 4 pessoas é gerado 2,20 kg de resíduo orgânico por dia. Esta massa será alimentada no biodigestor diariamente.

3.1.2 CÁLCULO DO VOLUME DE ÁGUA NECESSÁRIO

Para Brown e Li (2013), o resíduo produzido em residências de áreas urbanas tem um teor de sólidos totais (ST_o) de aproximadamente 21,9 %, é necessário que esse substrato seja diluído até um ST de 12 % afim de atender os requerimentos de projeto. A carga de sólidos totais adicionada diariamente será de:

$$C_{st} = \frac{P_d \cdot ST_o}{100} \quad (3)$$

Na qual:

C_{st} : Carga de sólidos totais adicionada diariamente no biodigestor (kg/dia);

ST_o : Sólidos totais antes da diluição (%).

Pela equação 3, conclui se que são adicionados diariamente 0,4818 kg de sólidos totais no biodigestor. Com isso, pode se encontrar a massa total (carga de sólidos totais + água para diluição) que entra no tanque de digestão:

$$M_t = \frac{C_{st} \cdot 100}{ST} \quad (4)$$

Na qual:

M_t : Massa total de alimentação diária (kg/dia);

Com isso, pode se afirmar que entra no tanque uma massa total de 4,015 kg diariamente. Considerando a massa específica com 1000 kg/m^3 , e a quantidade de resíduos sólidos geradas todos os dias (2,20 kg) é possível calcular ao volume de água necessário para diluir o substrato até atingir um teor de sólido totais de 12%:

$$V_a = \frac{M_t - P_d}{\rho_{\text{água}}} \quad (5)$$

Na qual:

V_a : volume de água adicionado ao resíduo diariamente (m^3 /dia);

Com isso, conclui-se que são necessários 1,815 L ($0,001815 m^3$) de água para 2,20 kg de resíduos sólidos, atingindo o requerimento de ST = 12 %.

3.1.3 TEMPO DE RETENÇÃO HIDRÁULICO

O tempo de Retenção hidráulica é uma variável influenciada por diversos aspectos, dentre eles, os pertinentes (considerando a aplicação deste projeto) são a temperatura e o tipo de substrato (AL SEADI, BIOSANTECH, *et al.*, 2013). O tempo em dias pode ser estimado conforme a fase térmica na qual se encontra o substrato e a água, isso é, qual tipo de organismo está mais ativo no momento. Em temperaturas baixas ($10\text{ }^\circ\text{C}$ a $20\text{ }^\circ\text{C}$), as bactérias psicrófilas se desenvolvem e são mais ativas, na faixa de $32\text{ }^\circ\text{C}$ a $42\text{ }^\circ\text{C}$ os mesófilos são os principais atuadores na biodigestão e, por fim, em temperaturas entre $43\text{ }^\circ\text{C}$ a $55\text{ }^\circ\text{C}$ o grupo mais ativo é a termófila (CARELI, DUARTE e PEREIRA, 2011) . Para resíduos sólidos urbanos (RSU) pode estimar o TRH de acordo com a Tabela 1:

Tabela 1 - Fases térmicas da digestão anaeróbica e tempos de retenção

Fase térmica	Temperatura	Tempo de Retenção
Psicrófila	$< 20\text{ }^\circ\text{C}$	70 dias a 80 dias
Mesófila	$32 - 42\text{ }^\circ\text{C}$	30 dias a 40 dias
Termófila	$43 - 55\text{ }^\circ\text{C}$	15 dias a 20 dias

Fonte: Adaptado de AL SEADI et al., 2013

Para o biodigestor construído neste projeto, a temperatura de funcionamento no interior da câmara de digestão será de $37\text{ }^\circ\text{C}$, portanto, a TRH estimada será de 36 dias.

3.1.4 CÁLCULO DO VOLUME DO TANQUE DO DIGESTOR

O volume do tanque do biodigestor pode ser calculado a partir do volume de água para diluição (V_a), a massa específica do resíduo sólido adotada de $1213\text{ kg}/m^3$ (SILVA e SANTOS, 2010) e um tempo de Retenção hidráulica de 36 dias através da equação 6:

$$V_{digestor} = \left(\frac{P_d}{\rho_{residuo}} + V_a \right) \cdot TRH \quad (6)$$

Na qual:

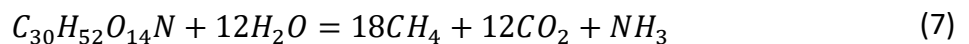
$V_{digestor}$: Volume do tanque do digestor (m³);

$\rho_{residuo}$: Massa específica do resíduo sólido 9 (kg/m³).

Desta forma, o volume necessário do tanque do digestor para aplicação deste projeto deve ser igual a 0,1306 m³ (130,6 L).

3.1.5 PRODUÇÃO DIÁRIA DE BIOGÁS

Para estimar a produção de biogás diária foi usada a equação química de decomposição de RSU elaborado por Tchobanoglous (1993). Através desta foi possível calcular que para cada 1 kg de resíduo sólido consumido que equivale a (1,54 mol), são gerados 0,443 kg de biogás (27,68 mols). Portanto, para 2,20 kg de resíduo produzido diariamente (3,38 mols), são gerados 0,975 kg de biogás (60,89 mols).



$$650,316 \frac{g}{mol} \qquad 16,01 \frac{g}{mol}$$

3.1.6 CÁLCULO DO PAYBACK

Para se calcular o tempo até o *payback*, será considerado um funcionamento contínuo do biodigestor, gerando em média 20 câmaras por mês, por conta de dias com clima mais ameno, quando a geração de gás diminui. O volume da câmara pode ser calculado pela fórmula 8:

$$V = 2 \cdot a^2 \cdot \pi^2 \cdot b \quad (8)$$

sendo 'a' o raio da seção interna da câmara, e 'b' a distância do eixo central (Toro) até o centro da seção da câmara, para a câmara de ar (165/70R13), sendo essa a especificação da câmara com $0,032\text{m}^3$. Considerando também que a densidade do GLP é de $2,50\text{ kg/m}^3$ na CNTP, e que uma família consome em média 1 botijão de 13 kg de gás a cada 2 meses, é possível inferir que 6,5 kg de gás são consumidos mensalmente.

4 CONSTRUÇÃO

A seguir será compilado os resultados das equações explicitadas na seção anterior, usando os dados obtidos por pesquisa como ponto de partida foi possível dimensionar o volume do tanque de digestão, massa de resíduos sólidos orgânicos produzidos diariamente, volume e massa diários de água e resíduos que alimentam o biodigestor e massa de biogás produzidos a cada alimentação do digestor.

4.1 MATERIAIS E CONSTRUÇÃO DO PRÓTOTIPO

Logo a seguir na Tabela 2 é mostrado os valores usados como base para a construção do biodigestor residencial para uma família de 4 pessoas, assim como a referência de cálculo em cada etapa.

Tabela 2 – Resultado dos cálculos realizados no desenvolvimento

Número da equação	Valor e medida calculada da equação
2	2,20 kg de resíduos sólidos por dia
3	0,482 kg/dia carga de sólidos totais e 4,01 kg massa total
5	0,00181 m ³ (1,815 L) de volume de água
6	0,1306 m ³ (130,6 L) de volume mínimo de tanque
7	0,975 kg de biogás

Fonte: Os autores

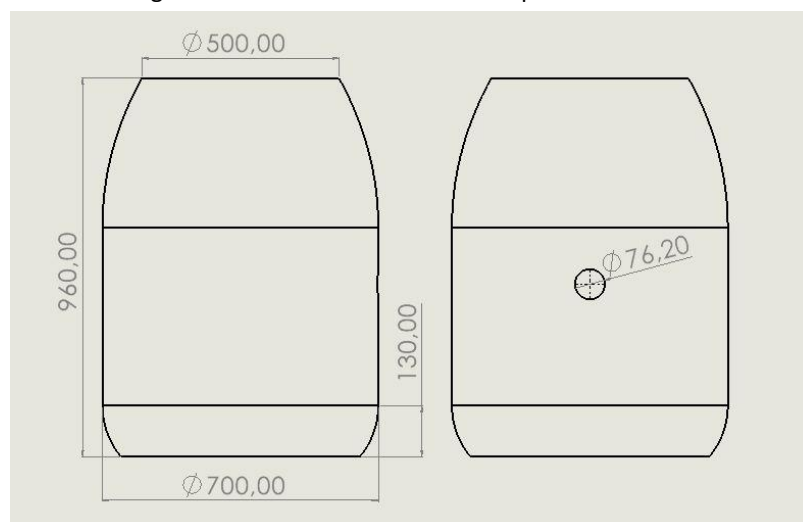
O sistema do biodigestor escolhido para armazenar os resíduos de uma residência de 4 pessoas e ser capaz de gerar o seu próprio gás, é composto por uma unidade geradora (bombona de plástica), um filtro de soda cáustica, um filtro de palha de aço e a câmara de armazenamento do gás. Sendo a unidade geradora totalmente vedada, com um tubo de PVC de 100 mm pelo centro, que servirá como via de alimentação. Os alimentos serão armazenados no fundo da bombona e o que já foi processado é liberado pelo cano de saída.

Na tampa da bombona tem um registro para a saída do gás conectado a uma mangueira que leva até o filtro de soda cáustica, responsável pela liberação do gás metano e do gás sulfídrico. A mistura encontrada dentro do vidro com a solução é composta por 3,2 L de água e 400 mL de soda cáustica com concentração de 12,5 mol/L (500 g/L). Será analisado a cada abastecimento como está o nível dessa solução através de uma marcação no vidro e posteriormente a troca da solução quando necessário.

Ambos os gases, metano e sulfídrico, passarão pela mangueira até chegar ao filtro de palha de aço, composto por dois pacotes de palha de aço que posteriormente serão trocados a cada 15 dias. O gás sulfídrico será retido nesse filtro e a partir desse ponto o biogás estará purificado e pronto para uso. A etapa final consiste no armazenamento do gás em uma câmara de borracha de aro 13. Tal modelo de construção foi baseado no do canal chamado Oficina de Quintal.

Com o levantamento do volume mínimo do tanque sendo de 130,6 L, optou se pela compra de uma bombona plástica de 200 L com as seguintes dimensões especificadas na Figura 14, mais detalhes de desenho do sistema completo encontra se no APÊNDICE A.

Figura 14 - Dimensões da bombona plástica em mm

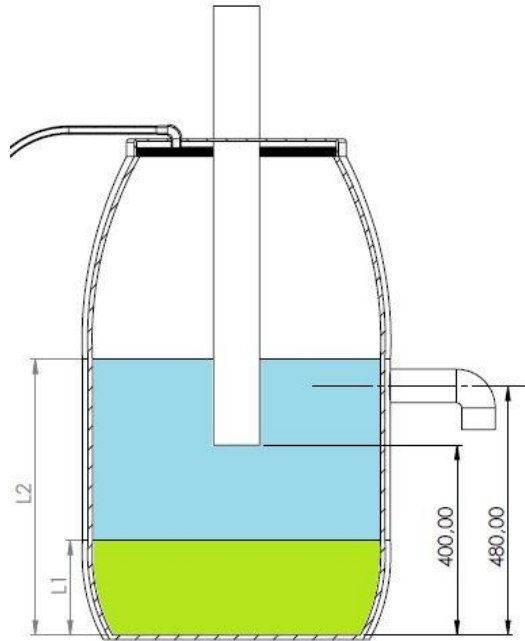


Fonte: Os autores

O funcionamento adequado do biodigestor depende da vedação completa de todo o sistema de geração de gás e para isso o tubo de alimentação deve estar submerso em água, sendo

assim capaz de impossibilitar a perda de gás produzido na bombona. A Figura 15, representa a distância necessária do tubo de alimentação em relação a base da bombona.

Figura 15 - Dimensionamento do comprimento do volume de resíduo e da água em mm



Fonte: Os autores

As equações a seguir detalham os tamanhos adequados para implementação do tubo de saída, por onde sairá o fertilizante, assim como o L1, espaço total de armazenamento de resíduos sólidos das frutas e o L2 sendo o volume de água necessário para o funcionamento do biodigestor durante um mês. Ambos os comprimentos L1 e L2 podem ser obtidos pelas seguintes equações:

$$V_R = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot L1}{4} \quad (9)$$

$$V_A = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot L2}{4} \quad (10)$$

Na qual:

V_R : Volume de resíduo;

V_A : Volume de resíduo mais o volume de água;

D : diâmetro médio da bombona plástica entre as sessões evidenciados na Figura 14.

Com isso, conclui se que o volume de resíduo sendo de $0,001814 m^3$ e o volume de água de $0,001815 m^3$ obteve se um valor de L1 igual a 282,78 mm e L2 sendo 565,72 mm. A seguir na Tabela 3, apresenta se o preço e especificação de todos os itens necessários para a construção do biodigestor.

Tabela 3 - Lista de materiais

Unidade	Item	Dimensão	Preço médio (R\$)
1	Bombona plástica	200,0 L	R\$ 700,00
1	Tubo de PVC para esgoto Ø100mm	1,5 m de tubo	R\$ 21,98
1	Adaptador Flange	Ø50,0mm	R\$ 8,39
2	Cotovelo PVC	Ø50,0mm	R\$ 0,94
1	Válvula esfera PVC	Ø1". ½	R\$ 28,00
1	Tubo de PVC de Ø50mm	1,0 m	R\$ 27,00
2	CAP PVC Tampão Marrom	Ø50,0mm	R\$ 17,98
1	CAP PVC Tampão Branco	Ø100,0mm	R\$ 11,99
1	Adaptador Curto	50,0mm	R\$ 8,39
2	Palha de aço Bombril	n° 1	R\$ 15,00
2	Torneira para jardim	Ø½"	R\$ 29,99
1	Frasco grande de vidro	4,0 L	R\$ 30,00
4	Niple de plástico	Ø¾"	R\$ 6,60
4	Luva branca roscada	Ø½"	R\$ 20,00
1	Câmara de ar (pneu)	Aro 13	Doação
1	Mangueira p/ gás GLP	3,0 m	R\$ 25,50
2	Espigão macho de metal	Ø½"x Ø3/8"	R\$ 33,70
13	Abraçadeira p/ mangueira	Ø½"	R\$ 14,40
2	Tubo Sikaflex	300 ml	R\$ 280,00
1	Tubo de cola Tigre p/ PVC	175 g	R\$ 26,00

Fonte: Os autores

Ao todo, o gasto para sua construção foi de R\$ 1305,82, e a seguir na Figura 16 à 15, é apresentado a montagem inicial e a construção final do biodigestor.

Figura 16 - Pré-montagem do biodigestor



Fonte: Os autores

Figura 17 - Biodigestor pronto posicionado



Fonte: Os autores

Figura 18 - Biodigestor posicionado com bomba de vácuo para drenagem de gás



Fonte: Os autores

4.2 ABASTECIMENTO

O abastecimento do biodigestor é feito três vezes na semana, sendo adicionados um total de 2,20 kg de resíduos orgânicos com adição de 1,8 L de água, por dia. Em maior parte, nas alimentações foram usadas frutas cítricas, tal escolha se deve por conta dos resultados obtidos com um modelo similar de menor escala (FERNANDES e LIMA, 2021) onde seu abastecimento com cascas de laranjas obteve bons resultados. E a partir dessa escolha foi desenvolvido o estudo com frutas, sendo elas: abacaxi, maracujá, laranja e limão resultando em uma geração contínua de gás. Todos os alimentos podres foram retirados das feiras, triturados e pesados na balança digital G-Tech Glass 10.

O primeiro teste de abastecimento permitiu a descoberta dos equívocos dos cálculos para o distanciamento do tubo de alimentação em relação a base da bombona. Durante o dimensionamento não foram considerados fatores em relação a água: a taxa de vaporização e o quanto cada tipo de resíduo orgânico absorve de água. Por conta disso a primeira produção

de gás teve um pico alto de geração no começo e depois de uma semana cessou a sua geração, resultado obtido devido a escolha de triturar o bagaço de cana de açúcar com adição das frutas cítricas. O bagaço possibilita uma geração mais alta de gás em conjunto com as altas temperaturas do ambiente em que se encontra o sistema do biodigestor, porém ao mesmo tempo ele é responsável por absorver muita água e assim impedir a decomposição das frutas para geração do gás, como mostrado na Figura 19.

Figura 19 - Alimentos dentro da bombona



Fonte: Os autores

Seguindo com os experimentos e utilizando novamente o bagaço de cana de açúcar, foram acrescentados 2 litros de água a mais do que o requisitado para uma semana, para assim ser possível comparar se a adição iria resolver os problemas de diminuição da decomposição dos resíduos. Conforme abastecimento, o biodigestor em 15 dias dificultou em armazenar uma quantia muito alta de resto de frutas e assim resultou no entupimento do cano de alimentação.

Uma solução para auxiliar durante este processo seria a implementação de um misturador para rotacionar os alimentos e assim ter espaço suficiente para acréscimos de futuros resíduos.

Como a bombona é prática e leve, optou-se por rotacionar a bombona e adicionar os alimentos aos poucos. Conforme o volume atingia um nível considerável, aumentava-se a dificuldade em manusear a bombona já cheia de alimentos, por isso, foi cortado o tubo de

alimentação, resultando em uma altura de 710 mm entre o fim do tubo e a base da bombona, para futuramente não apresentar dificuldades durante o abastecimento.

O modelo correto de funcionamento consiste no tubo de alimentação estar submerso em água, impedindo o biogás de escapar pela entrada e permitindo a saída apenas pela válvula instalada na tampa da bombona. Mesmo levando em conta a pequena produção de gás que será perdida ao cortar o tubo de alimentação, sua produção ainda é promissora, resultando em uma escolha prática para continuar com a evolução do projeto.

O último desafio durante todos os experimentos é demonstrado na Figura 20. A geração desses cristais deve se ao fato da escolha dos alimentos da semana para o abastecimento. Dessa vez foi depositado laranja e mexerica, causando uma reação entre a acidez dos alimentos e a própria soda cáustica armazenada nesse recipiente. A solução final foi seguir com frutas cítricas, porém utilizando uma quantia bem menor e mais abacaxi e maracujá para comprovar a produção de novos cristais.

Figura 20 - Aparecimento de cristais no filtro de soda cáustica



Fonte: Os autores

Como comparativo de funcionamento entre o filtro de soda cáustica, na Figura 21, é mostrado a formação de bolhas, resultado da produção de gás realizado na bombona. Para a produção de gás ser contínua é requisito o filtro de soda cáustica apresentar tal funcionamento.

Figura 21 - Funcionamento adequado do filtro



Fonte: Os autores

5 RESULTADOS

Logo abaixo na Figura 22 Figura 22 - Câmara de gás cheia percebe se o armazenamento do gás gerado com a adição do bagaço de cana de açúcar e as frutas cítricas, realizados no primeiro teste de abastecimento.

Figura 22 - Câmara de gás cheia



Fonte: Os autores

Um dos testes feitos com o gás produzido e armazenado no botijão foi testar a qualidade da chama e verificar sua utilização ao cozinhar algum alimento. Como auxiliar durante essa etapa, é demonstrado na Figura 23 utilizado para fazer pipoca.

Figura 23 - Bico de Bunsen



Fonte: Os autores

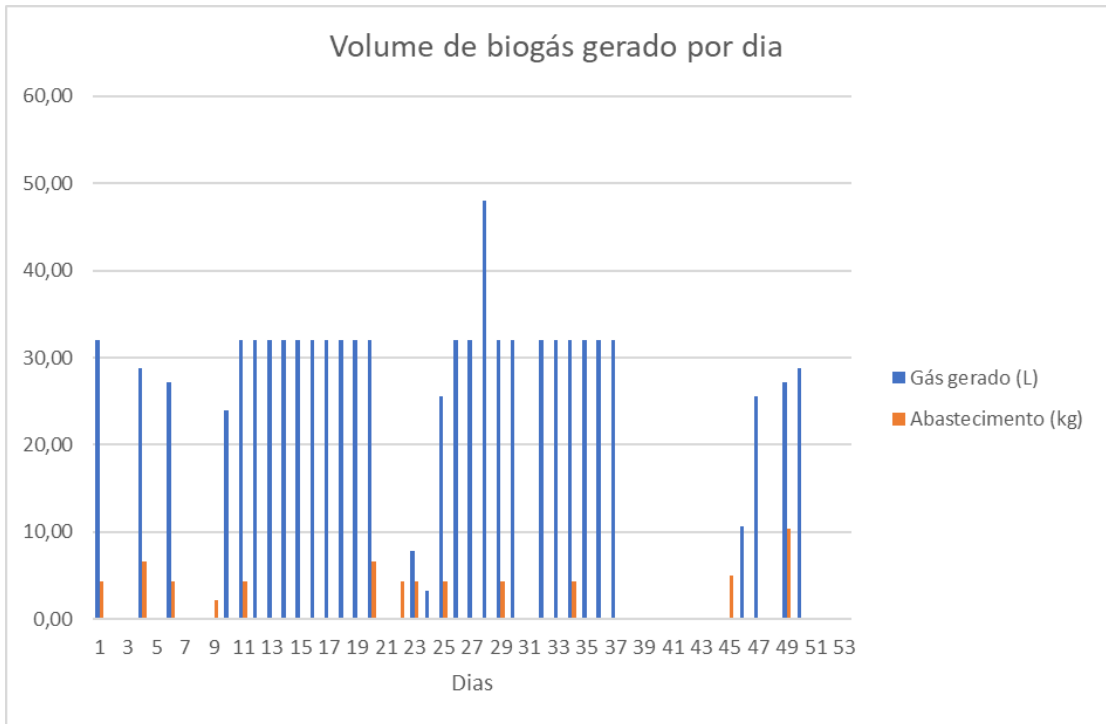
O gás armazenado durante os experimentos foi suficiente para fazer o teste com o bico de Bunsen e só não foi possível gerar a chama no fogão industrial por conta da falta da válvula de retenção do botijão para nivelar a quantidade de gás certa para passar para o fogão e assim ser capaz de utilizar o fogão industrial.

Uma das intenções para complementar o trabalho seria o teste de poder calorífico e a cromatografia do gás, onde iria ser feito o estudo da qualidade da chama, assim como os componentes químicos dentro do gás armazenado através da decomposição das frutas cítricas porém, por conta do valor alto para adquirir os insumos necessários para tais experimentos não foi possível concluir esses estudos.

5.1 LEVANTAMENTO DA CURVA DE GERAÇÃO DE BIOGÁS E CÁLCULO DO PAYBACK

Depois de 5 meses de experimentos e testes, mesmo com os eventuais obstáculos e dificuldades não previstos, todos foram contornados e/ou resolvidos a fim de manter o biodigestor funcionando. Os dados coletados desde o primeiro abastecimento até o último realizado na presente data, seguem compilados nos dois gráficos a seguir. O primeiro (Figura 24) é o volume de biogás produzido por dia, a quantidade coletada foi considerada através do quão cheio estava a câmara de borracha, nos dias no qual ela não encheu completamente foram considerados uma estimativa porcentual aproximada. O segundo (Figura 25) mostra o total, em litros, de biogás gerado durante todo o experimento.

Figura 24 - Gráfico do volume de biogás gerado por dia



Fonte: Os autores

Figura 25 - Curva do total de biogás gerado ao longo do experimento



Fonte: Os autores

Ao observar a Figura 24, pode observar que em quase todos os ciclos de geração foi atingido a capacidade máxima de volume disponível na câmara, sendo que nos dias mais quentes (6 de setembro até 20 de setembro e 1 de outubro até 18 de outubro) foram obtidos os maiores rendimentos na produção, com até 5 câmaras cheias após um abastecimento. As eventuais quedas na taxa produção se devem aos dias frios ou alguma interrupção do sistema, como filtro de soda caustica entupido após a formação de cristais, troca da câmara de armazenamento, modificações no tubo de alimentação. Até o último teste, como pode ser visto na pela Figura 25, foi gerado um total de 928,95 L de biogás, isso é, 371,58 kg. Durante os 5 meses de experimentos foi adicionado um total de 82 kg de resíduos de frutas e 72,7 litros de água.

Iniciando o cálculo de *payback*, obtêm-se que 25 câmaras armazenam 0,8 m³ que são 2 kg de gás, dito isso, por mês o biodigestor supre 15,38 % de um botijão de gás de 13 kg. Considerando o dado que um botijão de gás custa em média R\$ 110,42 reais, pode-se concluir que são economizados R\$ 33,96 reais por mês, por fim, dividindo o valor total de custo do biodigestor de R\$ 1305,82 pelo valor economizado mensalmente de R\$ 33,96, o *payback* será realizado em aproximadamente 39 meses e se todos o sistema de geração de gás for usado corretamente o biodigestor tem estrutura para aguentar durante o tempo de retorno financeiro.

6 CONCLUSÃO

O biodigestor produzido demonstrou-se viável para sua aplicação dentro de uma residência de 4 pessoas, e assim auxiliando na redução de custos com o gás de cozinha. Comparando-se o que foi estipulado inicialmente na metodologia, 0,975 kg de biogás por dia com o que realmente foi encontrado, aproximadamente 0,08 kg por dia, é visível uma diferença considerável, provavelmente pelos cálculos não levarem em conta a composição exata do biogás, que varia de acordo o tipo de resíduo orgânico utilizado no biodigestor. Mesmo assim, considerando o preço médio do botijão (de 13 Kg) de R\$ 110,42, é possível economizar 30,75 % dos gastos mensais em gás de cozinha. O custo inicial ainda é baixo comparado com o valor de mercado, que encontra-se por volta de R\$ 1600,00 a R\$ 5.000,00 e geralmente são modelos enterrados o que impede a sua aplicação em uma residência que não possui nem espaço para um jardim.

O tempo de *payback* encontrado foi de 39 meses, que é um período relativamente elevado quando se considera o preço deste projeto e os modelos mais baratos de biodigestores no mercado, porém, compensa pelo fato da simples manutenção e vida do produto. Conforme explicitado na construção, os materiais usados são facilmente encontrados em lojas de ferramentas e derivados, e quando bem cuidado, a única manutenção rotineira a ser realizado no biodigestor seria troca do conteúdo dos filtros e vedação.

A proposta final deste projeto é trazer uma alternativa para o gasto com o gás de cozinha e demonstrar que o espaço para sua aplicação dentro de uma residência pequena e até mesmo os alimentos utilizados de fácil acesso, ajudam na praticidade da aplicação desse sistema na sua própria casa.

REFERÊNCIAS

- ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2021**. [S.l.]. 2021.
- AL SEADI, T. et al. The Biogas Handbook. In: WELLINGER, A.; MURPHY, J.; BAXTER, D. **The Biogas Handbook**. 1ª. ed. Filadélfia: Woodhead Publishing Series, 2013. Cap. 2, p. 19-47.
- AQUINO, G. T. D. O uso do biogás no âmbito rural como proposta de desenvolvimento sustentável. **Revista Científica da Faculdade de Educação e Meio Ambiente** , 2014.
- ARRUDA, M. H. Dimensionamento de Biodigestor para Geração de Energia Alternativa , 2002.
- BGS. **Biodigestores ao redor do mundo**. Disponível em: <<https://www.bgsequipamentos.com.br/biodigestores-ao-redor-do-mundo/>>.
- BGS. **site da BGS equipamentos para biogás**, 2018. Disponível em: <<https://www.bgsequipamentos.com.br/>>.
- BGS. **site da BGS equipamentos para biogás**, s.d. Disponível em: <<https://www.bgsequipamentos.com.br/biodigestores-ao-redor-do-mundo/#:~:text=Continuando%20com%20a%20busca%20de,de%20energia%20para%20a%20rede.>>>.
- BIODIGESTOR caseiro. Vídeo completo incluindo confecção de filtros e área de armazenamento. Direção: Oficina de Quintal. [S.l.]: [s.n.]. 2021.
- BRASIL, C. D. L. D. **Câmara dos deputados**, 1982. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1980-1987/decreto-87079-2-abril-1982-436644-publicacaooriginal-1-pe.html>>.
- BROWN, D.; LI, Y. Solid state anaerobic co-digestion of yard waste and food waste. **ELSEVIER**, 29 Janeiro 2013. 6.
- CARELI, R. T.; DUARTE, E. R.; PEREIRA, A. L. A. Metabolismo microbiano. In: DUARTE, E. R. **Microbiologia Básica para Ciências Agrárias**. 1º. ed. Monte Carlos: Instituto de Ciências Agrárias da UFMG, v. I, 2011. Cap. 5, p. 61-71.
- CIBIOGAS. **Energias renováveis**, 2020. Disponível em: <[https://cibiogas.org/blog-post/biogas-no-brasil-historia-e-perspectiva-de-futuro/#:~:text=O%20biog%C3%A1s%20no%20Brasil%20se%20iniciou%20com%20a%20crise%20do,anaer%C3%B3bia%20da%20mat%C3%A9ria%20org%C3%A2nica\)%3B>](https://cibiogas.org/blog-post/biogas-no-brasil-historia-e-perspectiva-de-futuro/#:~:text=O%20biog%C3%A1s%20no%20Brasil%20se%20iniciou%20com%20a%20crise%20do,anaer%C3%B3bia%20da%20mat%C3%A9ria%20org%C3%A2nica)%3B>)>. Acesso em: 10 Abril 2022.
- DEGANUTTI, R. et al. **Biodigestores Rurais: Modelo Indiano, Chinês e Batelada**. Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho. Bauru, p. 5. 2002.
- DUARTE, T. O. Produção científica sobre biodigestores como ações práticas de Educação Ambiental, p. 14, 2020.

DUARTE, T. O. Produção científica sobre biodigestores como ações práticas de Educação Ambiental. **ANAP Brasil**, p. 1984-3240, 2020.

ECYCLE , 2010. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/politica-nacional-de-residuos-solidos-pnrs/>>.

ECYCLE, E. eCycle. **O que é Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)?** Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/politica-nacional-de-residuos-solidos-pnrs/>>.

EMAS Jr. **Site da EMAS Jr. Consultoria**, 16 mar. 2020. Disponível em: <<https://emasjr.com.br/blog/2020/03/16/entenda-os-tipos-de-biodigestor-e-qual-e-o-mais-adequado-para-voce/>>. Acesso em: 10 Abril 2022.

FDR. **site da fdr**, 25 Fevereiro 2022. Disponível em: <<https://fdr.com.br/2022/02/25/renda-media-do-brasileiro-e-pior-da-historia-confira-numeros/>>.

FERNANDES, A. S.; LIMA, J. D. S. B. **Modelagem analítica, construção e manuseio de um biodigestor de baixo custo para uso residencial**. Instituto Mauá de Tecnologia. São Caetano do Sul, p. 10. 2021.

GERON, V. L. O uso do biogás no âmbito rural como proposta de desenvolvimento sustentável. **FAEMA**, p. 140-149, 2014.

KUNZ, A. et al. O Processo de Biodigestão. In: KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. D. **Fundamentos da Digestão Anaeróbia, Purificação do Biogás, Uso e Tratamento do Digestato**. 2ª. ed. Concórdia: Sbera, Embrapa, 2019. Cap. 1, p. 15-19.

LEITE, V. D. et al. Tratamento anérobico de resíduos orgânicos com baixa concentração de sólidos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, p. 190-196, 2009.

LIMA, H. Tudo o que você precisa saber sobre a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), s.d. Disponível em: <<https://blog.eureciclo.com.br/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-politica-nacional-de-residuos-solidos-pnrs/>>.

MINISTÉRIO do Meio Ambiente, 2010. Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos.html>>.

NAZARO, M. S. **DESENVOLVIMENTO DE UM BIODIGESTOR RESIDENCIAL PARA PROCESSAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS**. Florinópolis. 2016.

PORTAL da terra. **site Portal da terra**, s.d. Disponível em: <<https://www.portaldaterra.com.br/tratamento-de-esgoto-300-litros>>.

PORTAL do Biogás. **INCENTIVOS LEGAIS PARA A CONSTRUÇÃO DE BIODIGESTORES NO BRASIL**. Disponível em: <<https://www.portaldobiogas.com/incentivos-legais-para-construcao-de-biodigestores-brasil/>>.

PORTAL DO BIOGÁS, 2013. Disponível em: <<https://www.portaldobiogas.com/incentivos-legais-para-construcao-de-biodigestores-brasil/>>.

REIS, L. **cibiogas.org**, 2020.

RIBEIRO, D. D. S. **Determinação das dimensões de um biodigestor em função da proporção gás/fase líquida**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte. Natal, p. 49-56. 2011.

SASSE, L. **Biogas Plants**. Eschborn. 1988.

SILVA, M. C.; SANTOS, G. O. **Densidade aparente de resíduos sólidos recém coletados**. Congresso Norte-Nordeste de Pesquisa e Inovação. [S.l.]: Anais do V CONNEPI. 2010.

SILVA, W. R. **Estudo cinético do processo de digestão anaeróbica de resíduos sólidos vegetais**. João Pessoa. 2009.

SIQUEIRA, L. M. **Influência da taxa de carregamento orgânico na degradação anaeróbica da vinhaça em reator de leito fluidizado**. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, p. 130. 2010.

SUSTAINABLE CARBON, 2015. Disponível em: <<https://www.sustainablecarbon.com/como-sao-gerados/>>.

TCHOBANOGLIOUS, G. Engineering principles and management issues. In: _____ **Integrated solid waste management**. Boston: McGraw-Hill, 1993. p. 978.

TEIXEIRA, V. H. **Biogás**. Lavras: Ed. Minas Gerais, 2005.

UNIÃO, D. O. D. Câmara dos deputados, 1982. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1980-1987/decreto-87079-2-abril-1982-436644-publicacaooriginal-1-pe.html>>.

VG Resíduos Ltda. VG Resíduos Ltda. **Como Política Nacional de Resíduos Sólidos influencia o meu negócio?**, 02 Setembro 2020. Disponível em: <<https://www.vgresiduos.com.br/blog/como-politica-nacional-de-residuos-solidos-influencia-o-meu-negocio/>>.

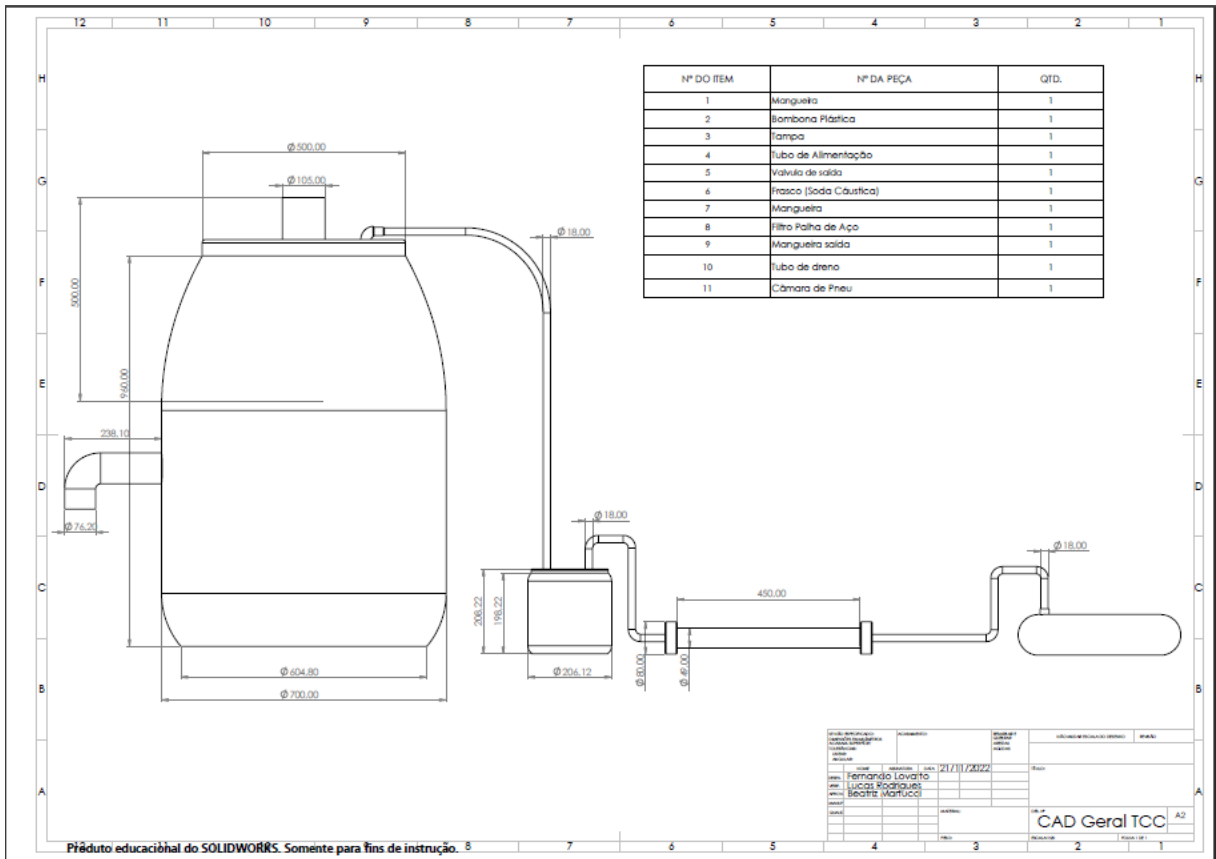
VGR. **Site da:** VGR, 02 Setembro 2020. Disponível em: <<https://www.vgresiduos.com.br/blog/como-politica-nacional-de-residuos-solidos-influencia-o-meu-negocio/>>. Acesso em: 26 Maio 2022.

VGR resíduos , s.d. Disponível em: <<https://www.vgresiduos.com.br/>>.

WARD, A. J. Optimization of the anaerobic digestion of agricultural resources. **Bioresource Technology**, p. 7928-7940, 2008.

WELTEC BIOPOWER, s.d. Disponível em: <<https://www.weltec-biopower.com/plant-operation-service/own-plants/koennern.html>>.

APÊNDICE A



TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE INCLUSÃO DO NOME DOS AUTORES NA DIVULGAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Manifestamos nossa opção individual pela inclusão (SIM) ou omissão (NÃO) dos nossos nomes como autores do Trabalho de Conclusão de Curso, a seguir identificado, quando da inserção do mesmo no Repositório Institucional do IMT para divulgação pública.

INTEGRANTE (AUTOR) DO TCC		RA	SIM	NÃO
1	Beatriz Freitas Marquetti	1602131-2	X	
2	Lucas Rodrigues Santos	1800282-0	X	
3	Fernando Renato Curo	16.022432	X	
4				
5				
6				

Título do TCC: Projeto e dimensionamento de biodigestores de baixo custo	Cod.do TCC: MCN04
Prof. Orientador: João de Pa. Brant Lima	Ano do TCC: 2022

Na falta de entrega dessa autorização, ou opção da omissão por todos os autores, será indicado o nome do Prof. Orientador(a) como autor nos registros bibliográficos.

São Caetano do Sul, 02 de Dezembro de 2022

Beatriz Marquetti

Ass. do(a) autor(a) 1

[Assinatura]

Ass. do(a) autor(a) 2

[Assinatura]
Ass. do(a) autor(a) 3