

TATIANE AKEMI RAMALHO YAMASHITA

**Dimensionamento de um biodigestor para produção de biogás a partir de resíduos
alimentícios de uma cantina universitária**

Guaratinguetá - SP

2019

Tatiane Akemi Ramalho Yamashita

Dimensionamento de um biodigestor para produção de biogás a partir de resíduos alimentícios de uma cantina universitária

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^ª Dr^ª Isabel Cristina de Barros Trannin

Co-Orientador: Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza

Guaratinguetá - SP

2019

Yamashita, Tatiane Akemi Ramalho
Y19d Dimensionamento de um biodigestor para produção de biogás a partir
de resíduos alimentícios de uma cantina universitária/ Tatiane Akemi Ramalho
Yamashita – Guaratinguetá, 2019.
58f.: il.
Bibliografia: f.52-58

Trabalho de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019.
Orientadora: Prof^ª Dr^ª Isabel Cristina de Barros Trannin
Co-orientador: Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza

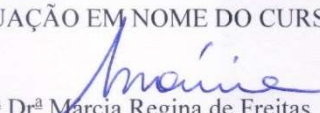
1. Saneamento Ambiental 2. Reciclagem de resíduos. 3. Bioenergia. 4.
Sustentabilidade.

CDU 628

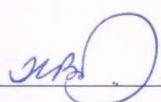
TATIANE AKEMI RAMALHO YAMASHITA

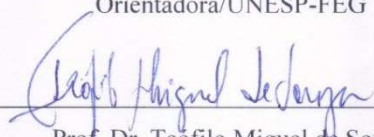
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA CIVIL"

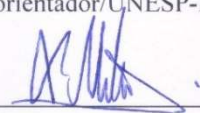
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM NOME DO CURSO


Profª Drª Marcia Regina de Freitas
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


Profª Drª Isabel Cristina de Barros Trannin
Orientadora/UNESP-FEG


Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza
Coorientador/UNESP-FEG


Eng. Msc. Arthur Ribeiro Melão
Melão Engenharia

Novembro de 2019

DADOS CURRICULARES

TATIANE AKEMI RAMALHO YAMASHITA

NASCIMENTO 08.09.1995 – São Roque / SP

FILIAÇÃO Alfredo Toshiaki Yamashita
 Fernanda Coelho Ramalho

2015/2020 Curso de Graduação em Engenharia Civil

 Universidade Estadual Paulista – “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de
 Guaratinguetá - SP

2013/2014 Curso técnico/profissionalizante em Desenho de Construção Civil

 Escola Técnica Estadual Fernando Prestes, Sorocaba - SP

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos que estão na busca e na produção do
conhecimento científico.
Em especial, aos que me auxiliaram e apoiaram na finalização desta
monografia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente por ser um ser racional, dotado da capacidade de sentir e praticar a gratidão. Agradeço à existência e a todos que tive oportunidade de conviver durante esta experiência enriquecedora vivida ao longo de toda a minha graduação e aos contribuíram com meu desenvolvimento profissional e pessoal durante toda minha jornada.

Agradeço a minha estrutura apoiada nesta dinâmica chamada vida, pela minha base familiar Fernanda, Kaori, Silvio, Eva, João, Flávio, Jina, Eiko, Yumi, Guilherme e Toshiaki.

Agradeço aos idealizadores e orientadores deste trabalho, Prof^ª Dr^a Isabel Cristina de Barros Trannin e Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza, por desenvolverem atividades além de suas atribuições, para que este estudo fosse possível. Agradeço a eles e demais professores e pesquisadores, que foram minha fonte de conhecimento e inspiração. Pessoas dotadas de paciência e sabedoria, capazes de transmitir sua bagagem e transformar seu entorno.

Agradecimentos aos meus professores Carmem, Toninho, Toyoko, Eunice, Rosemeire, Albertin, Elizabeth, Gislaine, Sandra, Irene, Thiede, Fabrício, Samuel, Virgínia, Romário, Vanessa do Matto, Alê, Fernando. Agradecimentos aos professores e doutores Rafael, Ernesto, Otto, Ronaldo, Yzumi, Mariana e Daniel.

Aos técnicos e funcionários da FEG, Flávio, Teodoro, Boi, Formiga, Gabi e Mara, agradeço a competência e dedicação no trabalho. Agradecimentos ao Engenheiro MSc. Arthur Melão, pela oportunidade e orientação durante o estágio.

Às amigas que me acompanharam durante este período, ao unificado 154, repúblicas e apês, Rep Happy, República Adega Abate Inferno Toma Lá, República Papagatas, República WC Kzona, República Só na Manteiga, República Mocó, República O.NU, República Susexo, República Chatuba e à Moradia.

Aos meus familiares, amigos, técnicos e professores que me acompanharam durante este período e que não foram nomeados aqui. Agradeço à instituição UNESP, pela estrutura e pela oportunidade.

“Os engenheiros usam a ciência para resolver seus problemas *se* a ciência estiver disponível. Porém, com a ciência disponível ou não, o problema deve ser resolvido e qualquer forma que a solução tome sob essas condições chama-se Engenharia”

Joseph Edward Shigley

RESUMO

O Brasil possui elevado percentual de matéria orgânica contida nos resíduos sólidos urbanos que, geralmente, é disposto inadequadamente em aterros e lixões. Avanços na gestão adequada de resíduos vêm exigindo mudanças conceituais e de gestão, visando o reaproveitamento e a minimização dos impactos gerados por estes resíduos. Este trabalho teve como objetivo dimensionar um biodigestor anaeróbio, baseado no modelo chinês, visando a metanização da matéria orgânica dos resíduos alimentares provenientes da cantina da Faculdade de Engenharia da UNESP, *campus* de Guaratinguetá, para o aproveitamento do biogás no próprio estabelecimento. O biodigestor foi construído com materiais acessíveis no mercado, a baixos custos, fáceis de serem trabalhados e mantidos. Com o desenvolvimento deste trabalho foi possível quantificar uma perda de cerca de 21% dos alimentos servidos no sistema de *self service* e prato feito, desconsiderando as perdas geradas na cozinha. Foi possível identificar a necessidade de orientações referente a segregação do resíduo, permitindo o tratamento da fração orgânica, que apresentou grande potencial de produção de biogás, principalmente quando foram pré-tratadas por trituração. Apesar disto, verificou-se a necessidade da co-digestão para melhorar a eficiência e tempo de retenção do processo, bem como, a avaliação dos custos de implementação e operação, fundamentado em padrões de dimensionamento e considerando diferentes tipos de substratos e suas particularidades. Além do biogás, a biodigestão produz composto orgânico e chorume que, após serem estabilizados, podem ser utilizados como biofertilizantes e devem ser avaliados quanto suas aplicações e necessidade de pós tratamento. O uso da biodigestão permite a redução da carga contaminante e do volume de matéria orgânica enviada aos aterros sanitários, a diminuição do consumo de combustíveis fósseis e de fertilizantes, além do tratamento da fração orgânica do resíduo urbano, contribuindo para o desenvolvimento de uma gestão adequada e descentralizada dos resíduos urbanos.

PALAVRAS-CHAVE: Saneamento. Gestão de Resíduos. Biomassa. Energia Renovável. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Brazil has a high percentage of organic matter contained in urban solid waste that is generally improperly disposed of in landfills and dumps. Advances in proper waste management have required conceptual and management changes aimed at reusing and minimizing the impacts generated by these wastes. This study aimed to size an anaerobic biodigester based on the chinese model, point to the methanization of organic matter from food waste from the UNESP School of Engineering, Guaratingueta campus, for the use of biogas in the establishment itself. The biodigester was built with affordable materials that are easy to work with and maintain. With the development of this work it was possible to quantify a loss of about 21% of the food served in the self service and a la cart menu, disregarding the losses generated in the kitchen. It was possible to identify the need for guidance about waste segregation, allowing the treatment of the organic fraction, which presented great potential for biogas production, especially when they were pretreated by grinding. Despite this, was possible to prove the need for co-digestion to improve process efficiency and retention time, as well as the evaluation of implementation and operational costs, based on sizing standards and considering different types of substrates and their particularities. In addition to biogas, biodigestion produces organic compost and slurry which, after stabilization, can be used as biofertilizers and should be evaluated for their applications and need for post treatment. The use of biodigestion allows the reduction of the contaminant load and the volume of organic matter sent to landfills, the reduction of fossil fuel and fertilizer consumption, and the treatment of the organic fraction of urban waste, contributing to the development of proper management and decentralized urban waste.

KEYWORDS: Sanitation. Waste Management. Biomass. Renewable energy. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Massa total de resíduos recebidos em diferentes unidades de destinação.	18
Figura 2 – Componentes e esquema de funcionamento do biodigestor no modelo indiano.	25
Figura 3 - Componentes e esquema de funcionamento do biodigestor no modelo chinês.....	25
Figura 4 - Fontes energéticas utilizadas no Brasil.....	28
Figura 5 - Diagrama das principais tecnologias de transformação energética da biomassa.....	29
Figura 6 - Planta da Faculdade de Engenharia, da UNESP, campus de Guaratinguetá, com setor 10 em destaque	31
Figura 7 - Imagem de satélite da Faculdade de Engenharia, da UNESP, campus de Guaratinguetá e, no destaque, a área da cantina.	32
Figura 8 - Coleta e armazenamento em balde com tampa, dos resíduos alimentares produzidos na cantina da FEG/UNESP e pesagem em balança digital.....	33
Figura 9 - Esquema do biodigestor baseado no modelo chinês com seus respectivos componentes.	34
Figura 10 - Luvas de 100 mm cortadas (à esquerda) para a conexão do tubo de alimentação à caixa d'água, parte externa (centro) e detalhe da vedação interna em silicone (à direita).	35
Figura 11 - Triturador de resíduos orgânicos TR 200, fabricado pela Trapp utilizado no estudo (à esquerda) e resíduos alimentares triturados (à direita).	36
Figura 12 - Borda da caixa d'água com o adesivo selante aplicado.....	36
Figura 13 - Detalhe da ligação à tampa da caixa d'água do sistema de coleta de biogás (à esquerda) e saída adaptada para coleta de biogás antes de passar pelo filtro de carvão ativado (à direita).....	37
Figura 14 - Sistema do biodigestor construído com caixa d'água de 150 litros.....	38
Figura 15 - Amostras de chorume coletadas para análise de pH aos 15 dias após o início do processo de biodigestão.	39
Figura 16 - Aspecto dos resíduos alimentares após oito semanas no biodigestor.....	44
Figura 17 - Bombona utilizada como câmara de biodigestão (à esquerda) e o novo biodigestor finalizado (à direita).....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição e proporção dos gases presentes no biogás	22
Tabela 2 - Massa de resíduos alimentares (kg) coletada na cantina da FEG/UNESP, nas semanas de maior consumo de alimentos do primeiro semestre de 2019.....	40
Tabela 3 - Quantidade de resíduo alimentar coletada na cantina da FEG/UNESP e introduzida no biodigestor.	41
Tabela 4 - Custos dos materiais utilizados no biodigestor construído com caixa d'água de 150 litros.	42
Tabela 5 - Potencial metanogênico de diferentes resíduos orgânicos	44
Tabela 6 - Custos dos materiais utilizados no biodigestor construído com bombona de 50 litros.	47

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira das Empresas de Limpeza e Resíduos Especiais
C/N	Relação carbono/nitrogênio
CO ₂	Gás carbônico
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NBR	Norma Brasileira Registrada
NH ₃	Amônia
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
PVC	Poli Cloreto de Vinila
RSO	Resíduo Sólidos Orgânicos
RSU	Resíduo Sólido Urbano
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SV	Sólidos Voláteis

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	15
2.1 OBJETIVO GERAL.....	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3. REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1 PANORAMA ATUAL DA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS	16
3.2 BIODIGESTÃO NO TRATAMENTO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS.....	20
3.3 PRODUÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE BIOMASSA	26
4. MATERIAL E MÉTODOS	31
4.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	31
4.2 QUANTIFICAÇÃO DO RESÍDUO ALIMENTAR PRODUZIDO	32
4.3 METODOLOGIA.....	33
4.3.1 Montagem do biodigestor	33
4.3.2 Análises físicas e químicas	38
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5.1 QUANTIDADE DE RESÍDUOS ALIMENTARES GERADOS PELA CANTINA.....	40
5.2 CUSTOS E NECESSIDADES DO BIODIGESTOR DE RESÍDUOS ALIMENTARES	41
5.3. CONSTRUÇÃO DE BIODIGESTOR EXPERIMENTAL E ANÁLISES PREVISTAS	45
6. CONCLUSÕES.....	50
REFERÊNCIAS	52
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	58

1. INTRODUÇÃO

De acordo com a última edição do Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2017, publicado pela Associação Brasileira das Empresas de Limpeza e Resíduos Especiais – ABRELPE, cerca de 51% dos resíduos sólidos urbanos coletados nas cidades brasileiras são orgânicos e totalizam aproximadamente 36,5 milhões de toneladas por ano (ABRELPE, 2018). Dados apresentados neste panorama evidenciam que, apesar da existência da Lei nº 12.305/2010, que exige a destinação e disposição final ambientalmente adequada dos resíduos, cerca de 41% dos resíduos coletados foram enviados a aterros controlados e lixões, por 40% dos municípios brasileiros no ano de 2017.

Embora os resíduos orgânicos sejam biodegradáveis e promovam a ciclagem de nutrientes no solo, quando em grande volume e dispostos de maneira inadequada, podem representar sérios riscos ambientais e à saúde pública, através da geração de chorume, que pode contaminar águas e solo, pela emissão de gases tóxicos e agravantes do efeito estufa, além de favorecer a proliferação de vetores de doenças.

Apesar destes riscos, no Brasil, são poucas as iniciativas de tratamento das sobras de alimentos, que correspondem a menos de 1% do total de resíduo gerado e que, segundo dados da ABRELPE (2018), têm potencial de reduzir as emissões de gases de efeito estufa correspondente à retirada de 7 milhões de automóveis das ruas, com benefícios diretos para a saúde de 76 milhões de pessoas.

O tratamento da matéria orgânica contida em resíduos vem sendo realizada em países desenvolvidos, por meio de processos de baixo custo, como a compostagem, e de tecnologias avançadas, como a digestão anaeróbia, que é uma alternativa mais atraente e sustentável para o tratamento desse tipo de resíduo, em função da geração e aproveitamento energético do biogás, que passa a ser uma fonte limpa e renovável (MERSONI; REICHERT, 2017).

A biodegradação da matéria orgânica pode ocorrer por processos aeróbios e anaeróbios. A digestão anaeróbia, que é objeto deste trabalho, é uma opção de tratamento e estabilização da fração orgânica dos resíduos sólidos, sendo um processo biológico que ocorre na ausência de oxigênio, sob condições adequadas e em estágios subsequentes, com atuação de diferentes grupos de microrganismos em cada estágio (GOMES, 2010).

Durante este processo, a ação dos microrganismos gera como produto o biogás, composto em sua maior parte por metano (CH_4) e, em menores proporções, de dióxido de carbono (CO_2), hidrogênio (H_2), sulfeto de hidrogênio (H_2S), amônia (NH_3), entre outros gases e água (SILVA, 2014). A presença do metano, confere ao biogás um elevado poder calorífero, permitindo seu aproveitamento como fonte de calor pela queima direta (cocção) ou como um componente na geração de energia elétrica.

Este estudo utilizou um sistema de biodigestão anaeróbio, fundamentado no modelo chinês, para a produção de biogás a partir de resíduos orgânicos alimentares provenientes da cantina da Faculdade de Engenharia da UNESP, *campus* de Guaratinguetá, visando inicialmente, o aproveitamento desta fonte de energia pelo próprio empreendimento. O modelo chinês de biodigestor foi selecionado por ser mundialmente conhecido e amplamente utilizado em pequenas propriedades e por ocupar pouco espaço.

Em lugar da construção em alvenaria foram utilizados materiais de baixo custo, disponíveis no mercado e, portanto, de fácil acesso, execução e manutenção, para que o modelo de biodigestor possa ser replicado em residências e outros empreendimentos de pequeno porte, incentivando o aproveitamento energético de resíduos orgânicos alimentares. Além disso, houve interesse por parte dos proprietários da concessão de uso da cantina universitária, na execução deste projeto, visando a redução de custos com a compra de gás, com a geração de energia renovável.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho teve como objetivo geral dimensionar e analisar o desempenho de um biodigestor anaeróbio fundamentado no modelo chinês, para a produção de biogás a partir de resíduos orgânicos alimentares provenientes da cantina da Faculdade de Engenharia da UNESP, *campus* de Guaratinguetá (FEG), visando o aproveitamento desta fonte de energia pelo próprio empreendimento.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Com base na fundamentação técnica e científica obtida na revisão de literatura, na quantidade e características dos resíduos alimentares gerados pela cantina da FEG, dimensionar um sistema de biodigestão anaeróbio adaptado do modelo chinês, utilizando materiais adequados, de baixo custo, acessíveis no mercado e de fácil execução e manutenção.
- Analisar a viabilidade da replicação do sistema de biodigestão dimensionado, por pequenos geradores, com base na quantidade e no tipo de resíduo orgânico, considerando as peculiaridades dos resíduos alimentícios em confronto com a atual forma de gestão dos resíduos pelo empreendimento.
- Gerar informações sobre os tipos de resíduos com potencial de processamento por biodigestão e parâmetros de dimensionamento com materiais disponíveis no mercado e de baixo custo, que permitam a execução adequada de biodigestores anaeróbios por outros empreendimentos.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 PANORAMA ATUAL DA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT define como resíduos sólidos e semi-sólidos os materiais resultantes de atividades de diversas origens que possuem características que inviabilizam seu “lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água” ou que exigem tratamento técnico e economicamente inviáveis (ABNT, 2004).

Com conceito análogo, a Lei nº 12.305 de 2010, que institui a “Política Nacional de Resíduos Sólidos” – PNRS, traz a definição do termo rejeito, que se refere ao resíduo sólido no qual esgotou-se todas as possibilidades de tratamento e recuperação disponíveis, devendo ser adotada uma “disposição final ambientalmente adequada” somente ao rejeito e os demais resíduos sólidos uma “destinação ambientalmente adequada” seja através da reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação ou aproveitamento energético (BRASIL, 2010).

Os resíduos podem ser classificados segundo a origem, como os resíduos domiciliares, hospitalares, de limpeza pública ou ainda entre “secos” e “úmidos”, onde os secos representam materiais recicláveis e os úmidos o resíduo orgânico. A NBR 10.004/2004 dá diretrizes para a classificação baseada nos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, classificando os resíduos em: Resíduos perigosos – Classe I e Resíduos não perigosos – Classe II, que podem ser subdivididos em Resíduos não inertes – Classe II A e em Resíduos inertes – Classe II B.

A quantidade de resíduo produzido sofre variações de acordo com a localização geográfica, porte populacional e do poder de consumo, que vem aumentando consideravelmente, após o desenvolvimento do sistema de produção em larga escala em consequência da Revolução Industrial e da sociedade de consumo que se desenvolveu após a Segunda Grande Guerra (COLOMBO, 2008).

Com o estabelecimento da economia linear, baseada na extração, processamento, uso e descarte, os resíduos se transformaram em um grave problema no mundo moderno, visto que o modelo favorece o esgotamento acelerado das matérias primas e a geração de grande volume de resíduos. Estes resíduos muitas vezes são descartados de maneira inadequada, trazendo prejuízos em diversas esferas, como poluição atmosférica; contaminação do solo e da água; entupimento de redes de drenagem; proliferação de vetores transmissores de doenças, além de

tirar determinados compostos do ciclo natural de decomposição e absorção pelo meio, obstruindo o processo de equilíbrio ambiental.

A produção de resíduos, estejam eles no estado sólido, líquido ou gasoso, é algo inerente a qualquer atividade e está diretamente relacionada com a urbanização, desenvolvimento econômico e com o crescimento populacional. Segundo o Banco Mundial, na edição de 2018 do *What a Waste*, em 2016 foram produzidos cerca de 2,01 bilhões de toneladas de resíduos no mundo, dos quais 44% corresponderam à matéria orgânica e 33% a materiais recicláveis secos, como plástico, papel e papelão, metal e vidro.

Em países considerados como referência na gestão de resíduos, como a Alemanha, desde 2005 tornou-se proibido o envio de resíduo doméstico ou industrial sem tratamento para aterros, que recebem menos de 1% do resíduo gerado no país. Além da carga cultural, há um intenso incentivo a programas de recuperação de 63% dos resíduos sólidos urbanos, sendo 46% pela adoção de práticas de reciclagem e 17% por compostagem (DOMINGUES, 2014).

No Brasil, cada habitante produz em média 0,95 kg de resíduo sólido por dia, de onde estima-se um total de 74,8 milhões de toneladas gerados no ano (SNIS, 2019). Deste montante, cerca de 51% são compostos de materiais orgânicos e 32% de materiais recicláveis secos (IPEA, 2012), que somados representam um potencial de tratamento de cerca de 83% do resíduo produzido no país.

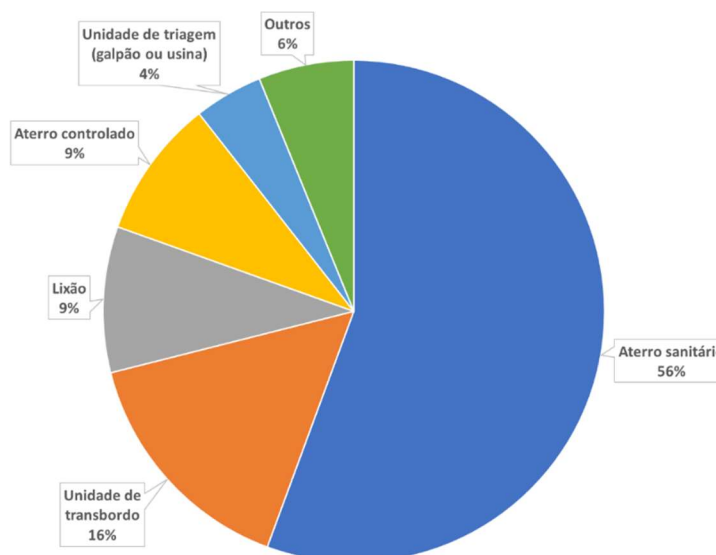
Entretanto, uma das principais dificuldades encontradas na promoção da gestão adequada dos resíduos sólidos é a inexistência da separação nas fontes geradoras, considerando que a coleta seletiva é uma ferramenta fundamental na execução de projetos de recuperação e tratamento dos materiais recicláveis e orgânicos, que usualmente são descartados juntamente com o rejeito, tornando as técnicas de reciclagem e reutilização economicamente inviáveis.

Apesar da alta taxa de cobertura de coleta regular de resíduos sólidos no Brasil, que atinge 98,8% de toda a população, somente 32,5% dos municípios brasileiros possuem o serviço de coleta seletiva, conforme relatado no “diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos”, publicado em 2019, pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS (SNIS, 2019).

Além disso, os resíduos sólidos coletados no país, usualmente são destinados a unidades de processamento para disposição no solo como lixões, aterros controlados ou sanitários que, em conjunto, recebem cerca de 74,0% do total de resíduos coletados, conforme apresentado na

Figura 1 (SNIS, 2019). A disposição do resíduo sólido urbano no solo, resulta em inúmeros impactos ambientais negativos e representa custos elevados, com materiais que poderiam ser valorizados por técnicas de reciclagem e de reutilização e, com isso, desencadear diversos avanços sociais, econômicos e ambientais em nosso país.

Figura 1 - Massa total de resíduos recebidos em diferentes unidades de destinação.



Fonte: Adaptado do SNIS (2019).

Atualmente, a existência dos lixões é proibida pela PNRS, que exigiu a desativação desse tipo de unidade de recebimento até 2014, quatro anos após a publicação da lei, porém teve o prazo prorrogado até o ano de 2021, por meio do Projeto de Lei do Senado - PLS nº 425 de 2014, por falta de adequação em função da limitação de recursos financeiros, bem como, de programas visando a eliminação dos lixões.

Os aterros controlados, por sua vez, ainda que se configurem uma alternativa melhor que os lixões, não podem ser considerados uma unidade de destinação ambientalmente adequada, pois são áreas de disposição, em que não são empregados os recursos de engenharia disponíveis para a captação e tratamento do gás e do lixiviado, não evitando assim, os problemas ambientais de contaminação.

Os aterros sanitários, que receberam cerca de 59% do lixo coletado no país, é a forma mais segura dentre as mais utilizadas no Brasil, pois recebem infraestrutura capaz de coletar e tratar o chorume, dutos que coletam os gases gerados pela decomposição, que podem ser utilizados na produção de energia, além do sistema de operação e monitoramento que devem ser executados conforme a NBR 8.419/1992. Entretanto, considerando os custos de

investimento, a implantação de um aterro se mostra vantajosa somente em locais de grande porte populacional ou quando compartilhado por alguns municípios (MMA, 2010), além de não permitir o reaproveitamento dos materiais enterrados.

Dados acerca da recuperação de resíduos sólidos acabam sendo subestimados em função da ausência de informações, principalmente, por conta da falta de registros regulares por parte das prefeituras e associações de catadores, além dos trabalhadores informais. Entretanto, estima-se que em 2017 foram recuperados apenas 2,1% do total de resíduo coletado no Brasil de acordo com o SNIS (2019), incidindo, principalmente, no chamado “lixo seco”, composto por materiais potencialmente recicláveis, como papel, plástico, vidro, ferro e alumínio.

Localidades com níveis mais elevados de consumo produzem mais resíduos por habitante e, à medida que os países vão se tornando mais industrializados, a porcentagem de matéria orgânica contida no resíduo diminui e aumenta o consumo de plásticos, metais e papel (DOMINGUES, 2014).

O Brasil produz uma alta quantidade de resíduo orgânico, revelando um elevado potencial de tratamento dessa fração que, apesar de ser biodegradável e promover a ciclagem de nutrientes ao solo, quando em grande volume e dispostos de maneira inadequada, podem representar sérios riscos ambientais e à saúde pública, pela geração de chorume, que misturado a outros materiais, pode contaminar águas e solo, gerar emissão de gases tóxicos e agravantes do efeito estufa, além de favorecer a proliferação de vetores de doenças.

Apesar destes riscos, no Brasil, são poucas as iniciativas de tratamento das sobras de alimentos, que representam menos de 1% do total de resíduo gerado, embora sua recuperação represente um elevado potencial para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Neste aspecto, segundo dados da ABRELPE (2018), o tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos, correspondente à retirada de 7 milhões de automóveis das ruas, com benefícios diretos para a saúde de 76 milhões de pessoas.

Em países desenvolvidos, o tratamento da matéria orgânica contida em resíduos sólidos urbanos, vem sendo realizada por meio de processos de baixo custo, como a compostagem ou com o uso de tecnologias, que permitam a reciclagem, incineração para geração de energia ou a digestão anaeróbia.

Existem normas nacionais que estabelecem diretrizes para o tratamento da matéria orgânica e aplicação dos produtos gerados neste processo, como a Resolução do Conama nº

375, que define critérios e procedimentos para uso de lodos de esgoto e produtos gerados nas estações de tratamento de esgoto, visando aplicações agrícolas e a Resolução Conama nº 481, que estabelece critérios e procedimentos visando o controle de qualidade do processo de compostagem de resíduos orgânicos.

A compostagem e a digestão anaeróbia são formas de degradar a matéria orgânica em ambiente controlado, mantendo determinados parâmetros dentro de faixas ótimas, gerando produtos que podem ser reaproveitados. São práticas de tratamento do resíduo orgânico que, além de configurarem uma solução para o saneamento básico, estão em conformidade com a legislação, garantindo uma destinação ambientalmente adequada do resíduo.

A biodigestão anaeróbia, consiste na transformação de compostos orgânicos complexos em compostos orgânicos e inorgânicos mais simples, configurando uma solução vantajosa ao saneamento local, assim como, ao suprimento autônomo de energia. Apresenta ainda vantagens devido à diminuição da emissão de CO₂ comparada aos tratamentos aeróbios, além da geração do biogás, que pode ser utilizado como fonte de energia limpa e renovável (MERSONI; REICHERT, 2017).

Por fim, a Lei nº 11.445/2007 – Lei Nacional de Saneamento Básico, considera a limpeza urbana e o manejo de resíduos sólidos como parte dos serviços de saneamento básico, ao lado do abastecimento de água, esgotamento sanitário e manejo de águas pluviais e drenagem urbana. Portanto, a gestão de resíduos é uma área que necessita de fundamentação dos diversos campos do conhecimento humano e é um desafio a ser enfrentado pelas gerações atuais e futuras.

3.2 BIODIGESTÃO NO TRATAMENTO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS

A decomposição da matéria orgânica pode ser feita por meio de processos aeróbios, onde os compostos orgânicos são oxidados gerando água, dióxido de carbono e sais minerais ou por processos anaeróbios que geram metano, álcoois, sulfetos e amônias, oxidados por nitratos, sulfatos e dióxido de carbono, devido à ausência de oxigênio (PROSAB, 2003).

O processo de bioestabilização dos resíduos sólidos em aterros ocorre em três processos sucessivos, onde durante a primeira fase ocorre a decomposição aeróbia, com o consumo do oxigênio presente no sistema. Na segunda fase, onde estabeleceu-se as condições anaeróbias,

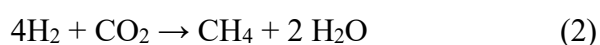
ocorrem três processos de transformação de compostos mais complexos em compostos mais simples, denominadas: fase de hidrólise, acidogênese e acetogênese (PROSAB, 2003).

Na fase de hidrólise, ocorre a quebra de partículas orgânicas complexas como carboidratos, proteínas e gorduras em compostos menores e mais solúveis, como açúcares, aminoácidos, álcoois, monossacarídeos, ácidos graxos, purinas e pirimidinas (RODRIGUES, 2018).

Na fase seguinte, os produtos gerados durante a hidrólise são transformados por bactérias acidogênicas em ácidos orgânicos como, ácido acético, propiônico, butírico, isobutírico, fórmico, hidrogênio e dióxido de carbono (RIZZONI *et al.*, 2012). Por fim, durante a acetogênese, os produtos gerados durante a acidogênese são convertidos em substratos para a produção do metano, dentre eles o acetato, H_2 e CO_2 (PROSAB, 2003).

Neste processo, ocorre também a formação do líquido comumente chamado de chorume, que possui características variáveis conforme o tipo de matéria orgânica utilizada, condições ambientais locais, tempo de disposição, conforme Giordano, Filho e Carvalho (2011), e pode ser reaproveitado através da recirculação no sistema auxiliando o processo de degradação ou aplicado como biofertilizante. O chorume é um líquido escuro, formado pela água contida na matéria orgânica e pelos processos biológicos envolvidos na degradação, representando um grave problema ambiental quando lixivia em meio ao solo ou através de águas superficiais e subterrâneas (SERAFIM *et al.*, 2003).

Com o desenvolvimento de cada etapa são atingidas as condições para a terceira fase, denominada metanogênese, que pode ocorrer pela redução do ácido acético em metano e dióxido de carbono, ou pela redução do dióxido de carbono em metano e água, conforme as equações (1) e (2). Neste processo, ocorre o consumo do excesso de hidrogênio e dos produtos da fermentação, resultantes das fases anteriores e, durante esta última etapa, ocorre também a sulfetogênese, onde os compostos constituídos por enxofre são utilizados na oxidação por bactérias sulforedutoras (SOUZA; PERES, 2019).



O metano, por ser pouco solúvel, fica em estado gasoso, podendo ser tratado e aproveitado na geração de energia, conferindo o poder calorífico do biogás, em função das

ligações químicas entre os átomos de hidrogênio e carbono, que liberam grande quantidade de energia térmica na reação com o oxigênio (GARCILASSO, 2010).

Além do metano, o biogás possui outros produtos energéticos presentes, como o hidrogênio (H_2) e traços de monóxido de carbono (CO), e outros gases em menores proporções como o dióxido de carbono (CO_2), o sulfeto de hidrogênio (H_2S), a amônia (NH_3), entre outros gases e água. Conforme Silva (2014), a composição do biogás possui faixas de concentração de determinados elementos que permanecem, aproximadamente, as mesmas, há décadas, conforme pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição e proporção dos gases presentes no biogás

Elemento	% do Volume (1979)	% do Volume (2008)
CH_4	54,0 a 70,0	50,0 a 75,0
CO_2	27,0 a 45,0	25,0 a 45,0
H_2O	-	2,0 a 7,0
H_2	1,0 a 10,0	< 1,0
N_2	0,5 a 3,0	< 2,0
CO	0,1	-
O_2	0,1	< 2,0
NH_3	-	< 1,0
H_2S	Traços a 1,0	< 1,0

Fonte: Silva (2014).

Quanto mais elevada a concentração de água, H_2S e outros componentes, menor será o poder calorífico do biogás, necessitando de alguma forma de tratamento para eliminar as impurezas e remover as substâncias que conferem características corrosivas, podendo danificar equipamentos como compressores e motores de combustão, sendo necessária a purificação deste gás para seu uso como fonte de energia em fogões, aquecedores e motores (RORATTO *et al.*, 2014). Para a remoção do H_2S do biogás e obtenção do biometano indica-se o uso de filtro de carvão ativado e para separação do CO_2 do metano, são empregadas membranas poliméricas disponíveis no mercado (SOUZA; PERES, 2019).

A duração de cada fase, bem como a qualidade e quantidade de lixiviado e gás produzidos, dependem de fatores como composição dos resíduos utilizados, distribuição espacial dos componentes orgânicos, disponibilidade de nutrientes, grau de compactação inicial e características químicas dos resíduos (TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H; VIGIL, 1973).

A velocidade das reações está diretamente relacionada com a temperatura. Assim, em temperaturas elevadas as reações ocorrem em maior velocidade, entretanto, variações bruscas podem interferir no desenvolvimento e na atividade microbiana, interferindo na produção de metano. A temperatura influencia também as espécies e o crescimento dos microrganismos, que se desenvolvem em diferentes faixas térmicas como psicrófila (abaixo de 20°C), mesófila (30 a 40°C) ou termófila (50 a 65°) (RODRIGUES, 2018).

O pH, que representa o grau de acidez ou alcalinidade do meio, varia de acordo com a produção dos ácidos durante a acidogênese e acetogênese, conforme Horiuchi apud Rodrigues *et al.* (2018), que são neutralizados pelo carbonato em efeito tampão, controlando a acidez do meio (PROSAB, 2003). Da mesma forma que ocorre com a temperatura, as faixas de pH propiciam o desenvolvimento de diferentes grupos de microrganismos, sendo as metanogênicas, adaptadas a um substrato de pH entre 6,5 e 8,0 (ROCHA, 2016).

A matéria orgânica a ser decomposta, deve fornecer elementos que criem condições para o desenvolvimento dos agentes envolvidos no processo. A relação carbono/nitrogênio (C/N) é um parâmetro que pode ser utilizado para representar esse balanço nutricional, pois as bactérias necessitam desses elementos na obtenção de energia e na construção de estruturas celulares. Em diferentes proporções, também são necessários nutrientes como fósforo, enxofre, cálcio, magnésio, potássio, zinco e ferro (RODRIGUES, 2018).

Em geral, os materiais orgânicos já possuem microrganismos necessários ao processo de decomposição, porém o uso de inoculantes garante rápida colonização dos materiais e uma fase inicial bem-sucedida, com elevação da temperatura em curto espaço de tempo, reduzindo o tempo de decomposição (INÁCIO; MILLER, 2009).

Estudo comparativo realizado por Evangelisti *et al.* apud Zhang (2014), utilizando análise de ciclo de vida, indicou a biodigestão anaeróbia como melhor forma de tratamento para o resíduo alimentar comparada ao aterramento, com produção de energia elétrica, e incineração, para produção de calor e energia.

3.2.1 Tipos de biodigestor

Os biodigestores são instalações que permitem a decomposição da matéria orgânica em meio anaeróbio, reproduzindo as etapas que ocorrem com o aterramento dos resíduos de forma

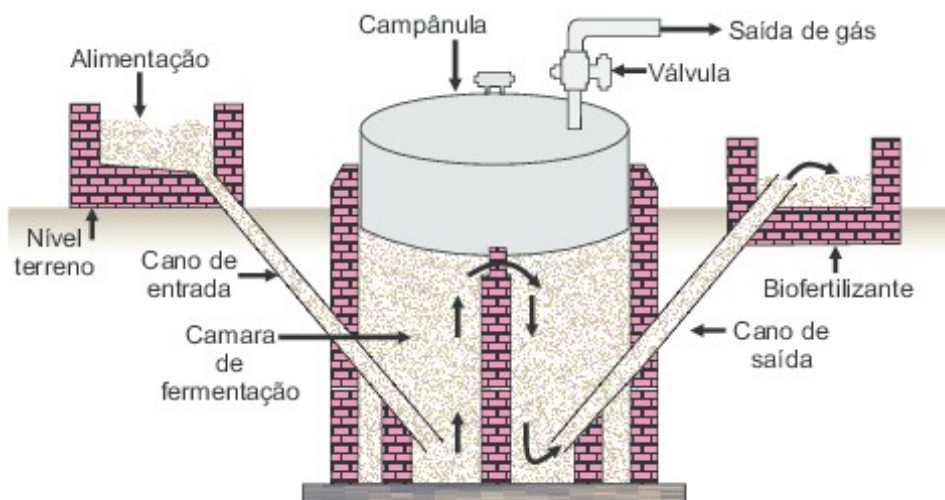
controlada, em condições favoráveis e otimizadas, conforme Silva (2014), visando o aproveitamento dos produtos gerados pelo processo de degradação.

O uso desse tipo de instalação é registrado desde a segunda metade do século XIX, com o conhecimento da existência do biogás, datado do século anterior. Na Índia, em 1857, desenvolveu-se o biodigestor que deu bases teóricas e experimentais da digestão anaeróbica, sendo amplamente difundido no país ao longo do século XX até ser adotado pela China (ARAÚJO, 2017).

Os biodigestores podem ser caracterizados, conforme seu sistema de alimentação, que pode ocorrer em “batelada” ou de maneira “contínua”. Os modelos de alimentação em batelada, não possuem entradas ou saídas específicas, recebendo e degradando a matéria orgânica em uma câmara de fermentação, construída em alvenaria. O gás produzido é armazenado no próprio biodigestor, o que torna sua construção mais simples, conforme Silva (2014), e sua retirada é feita após um período de retenção suficiente para a produção do biogás, devendo ser totalmente descarregado e limpo, para então, iniciar um novo processo de alimentação no biodigestor (FRIGO *apud* OLIVEIRA, 2019). Esse sistema assemelha-se ao funcionamento dos aterros sanitários, onde os resíduos são depositados e produzem gases durante alguns anos, mesmo após sua desativação e sem a recarga de matéria orgânica (SILVA, 2014).

Nos sistemas contínuos, a alimentação é feita em intervalos curtos de tempo, sem abertura do biodigestor, sendo os mais conhecidos, o modelo indiano e o chinês (SILVA, 2014). O modelo indiano, de construção mais simples, possui uma caixa de alimentação, por onde o resíduo é conduzido até a câmara de fermentação que opera em duas etapas, fazendo o material movimentar-se em seu interior, como pode ser observado na Figura 2 (OLIVEIRA, 2019). À medida que o gás vai sendo produzido, sua campânula, que funciona como um gasômetro e fica em contato com a biomassa ou com a água, tende a se deslocar mantendo a pressão interna constante (ARAÚJO, 2017). Esse modelo de biodigestor possui saída para o gás e caixa de descarga para retirada do material fermentado.

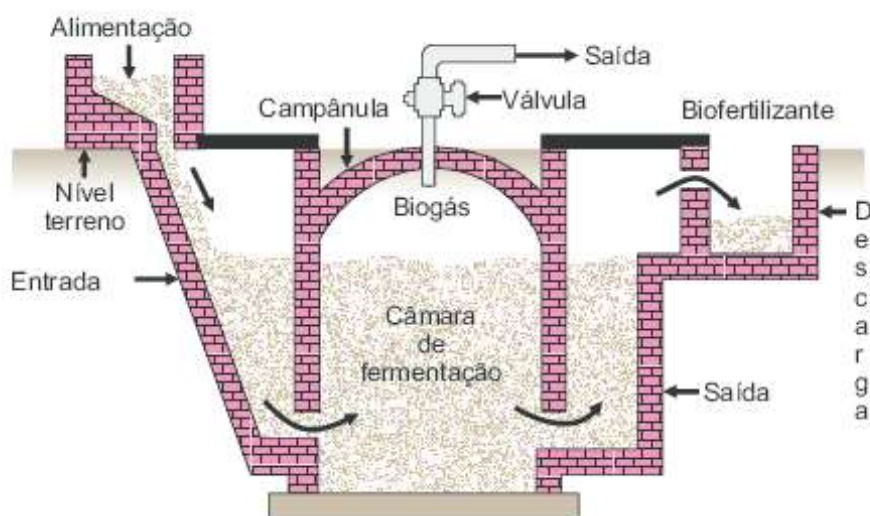
Figura 2 – Componentes e esquema de funcionamento do biodigestor no modelo indiano.



Fonte: Cassini, Coelho e Pecora (2014).

No modelo chinês, que teve como base o indiano, o gás é produzido a pressões mais elevadas, sendo de 0,03 a 0,12 mca no modelo indiano e de 1 mca no modelo chinês, conforme Silva (2014), podendo até dispensar o uso de compressores dependendo da aplicação. Através de uma caixa de entrada, a biomassa é conduzida até a câmara de fermentação cilíndrica de teto abobadado e impermeabilizado, construído em alvenaria, conforme pode ser visto na Figura 3 (ARAÚJO, 2017). Diferente do modelo indiano, onde a pressão interna induz o movimento da campânula, neste modelo, o volume é constante e a pressão causa o deslocamento do material até uma caixa de saída.

Figura 3 - Componentes e esquema de funcionamento do biodigestor no modelo chinês.



Fonte: Cassini, Coelho e Pecora (2014).

Os biodigestores podem, ainda, ser projetados de forma a dividir os processos bioquímicos em dois ou mais estágios, através do uso de câmaras ou reatores separados e conectados, ou de uma câmara separada internamente. Nesses sistemas, a hidrólise e a acidificação ocorrem em uma etapa e a acetogênese e metanogênese em outra, permitindo um aumento da produtividade, conforme a operação (PROSAB, 2003). Em sistemas de um estágio, todas as etapas ocorrem em uma única câmara, tendo uma construção mais simplificada (VANDEVIVERE *et al. apud* ROCHA, 2016).

Com a necessidade de redução de custos de investimento na instalação dos biodigestores, diversas alternativas vêm sendo desenvolvidas, principalmente no meio rural onde há grande disponibilidade de resíduos vegetais e dejetos animais (SILVA, 2014). No setor industrial, são utilizados reatores de fermentação, muitas vezes, com uso de inoculantes, agitadores e até aquecedores, além de modelos residenciais, que cada vez mais, buscam promover o tratamento descentralizado do resíduo, visando seu aproveitamento energético.

No entanto, com base na literatura, verificou-se que ainda faltam padrões de dimensionamento dos sistemas de biodigestão, considerando que a maioria dos biodigestores comercializados, têm sido utilizados de maneira empírica, para diferentes tipos de resíduos orgânicos, sem considerar suas particularidades.

3.3 PRODUÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE BIOMASSA

Um dos produtos gerados pela decomposição anaeróbia da matéria orgânica é o biogás, um gás incolor, inodoro quando retiradas determinadas impurezas, insolúvel e de baixa densidade, constituído principalmente de gás metano, gás carbônico e outros gases em menores proporções (PROSAB, 2003). O biogás pode ser produzido naturalmente, através do processo digestivo de certos animais, em pântanos, oceanos e águas doces, ou pela ação antrópica por meio de biodigestores ou em aterros sanitários.

As emissões derivadas de fontes naturais vêm se mantendo moderadamente constantes, comparado às emissões advindas de processos antrópicos que, realizadas de maneira descontrolada e em locais inapropriados, representa um dos principais problemas relacionados à decomposição do resíduo, causando prejuízos à saúde humana e ao meio ambiente, em função da formação de ozônio troposférico ou da exposição a alguns componentes, que podem causar

câncer e outras doenças, além do risco de incêndios e explosões em instalações próximas aos aterros, uma vez que o biogás é altamente inflamável (OMS *apud* GARCILASSO, 2010).

Os aterros sanitários construídos no país, conforme norma vigente, devem possuir um sistema de drenagem de gás que, por ser altamente combustível, necessita ser continuamente drenado para evitar explosões. Os aterros podem possuir sistemas passivos, com drenos que emitem os gases para a atmosfera, ou sistemas ativos com uso de exaustores e compressores, tendo em vista seu aproveitamento energético (ENSINAS, 2003).

No Brasil, a maioria dos aterros utiliza o sistema de drenos passivos, onde o gás é captado e queimado de forma constante. Essa prática, além de ineficiente, com estimativa de queima de apenas 20% do biogás e emissão do restante dos gases à atmosfera (GARCILASSO, 2010), representa também um desperdício de recursos e de energia.

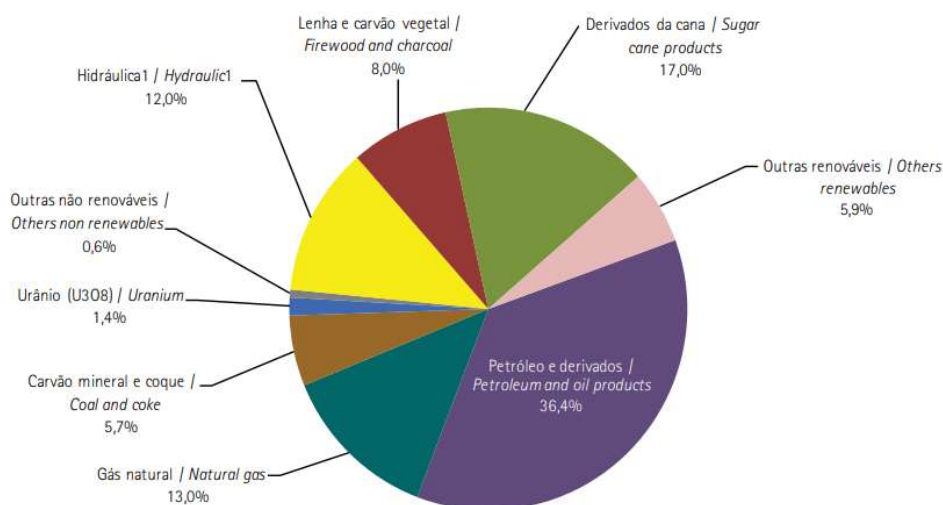
A captação e uso do biogás como fonte de energia, vem se mostrando viável do ponto de vista econômico, energético e ambiental, por reduzir os custos e aumentar a eficiência na gestão de resíduos, além de permitir a diversificação da matriz energética, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis. Apesar disto, entre 2004 e 2015, foram implantadas apenas nove usinas termelétricas que utilizaram o biogás gerado em aterros sanitários, que produziram 86,3 MW de energia elétrica (NASCIMENTO, M. C. B *et al.*, 2019).

Neste aspecto, é preciso considerar que, a matriz energética brasileira é constituída, basicamente, por fontes não renováveis, que somam 54,4% da oferta interna de energia e são derivadas, principalmente, do petróleo e do gás natural, fazendo com que este setor seja um dos maiores contribuintes da emissão de gases de efeito estufa (Figura 4).

Embora a energia elétrica seja um indicador de desenvolvimento de um país, junto aos serviços de saneamento básico, transportes e telecomunicações, a crescente demanda energética possui aspectos negativos, como esgotamento dos recursos utilizados na geração de energia e impactos ambientais causados ao longo de toda a cadeia, desde a produção até o consumo.

A busca por explorar a biomassa como uma alternativa na produção de energia, vem crescendo junto ao desenvolvimento de uma consciência ambiental e do aumento da demanda energética, que ocorre em escala mundial, sendo apontada como um mercado de potencial crescimento, tanto interno quanto externo, nos próximos anos, e que no Brasil, correspondeu a 8,4% da geração de energia elétrica em 2018, conforme relatou o Ministério de Minas e Energias (MME, 2018), com possibilidade de geração de 1179 MW (EPE, 2014).

Figura 4 - Fontes energéticas utilizadas no Brasil.



Fonte: EPE (2018).

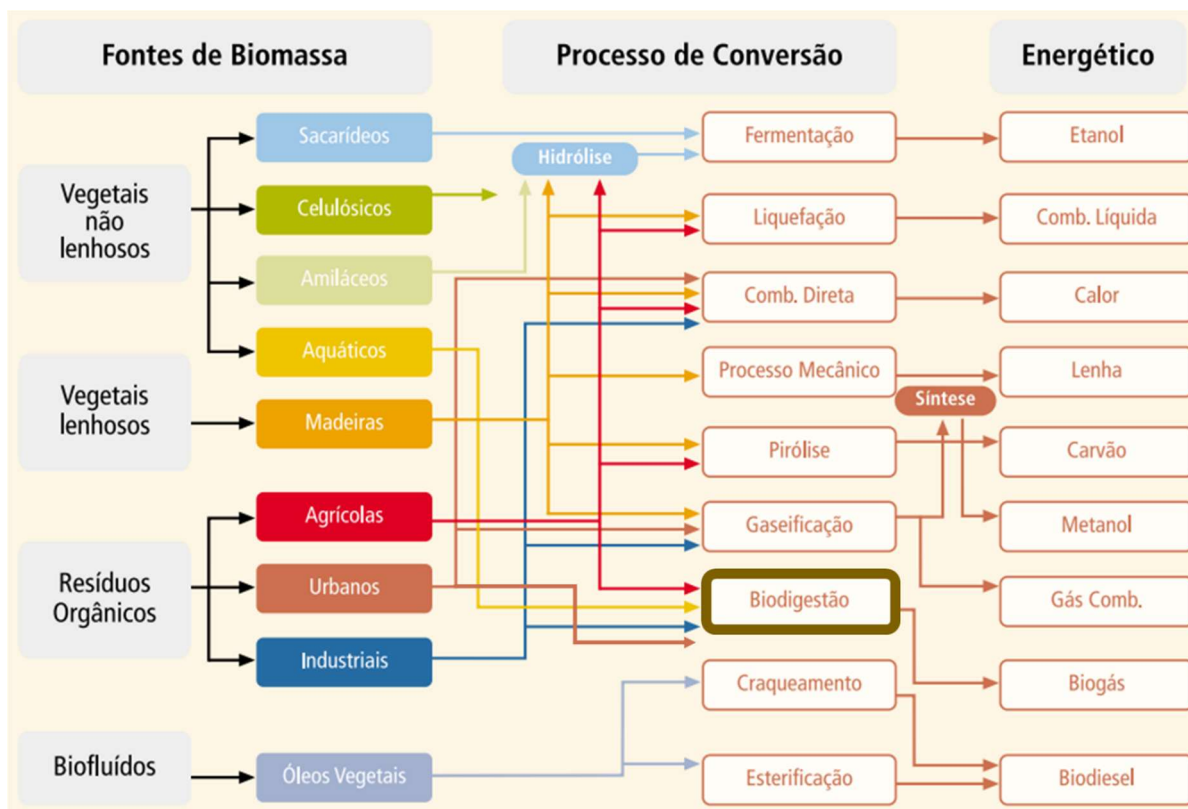
A biomassa se refere à toda matéria orgânica, de origem animal ou vegetal, que tem aplicações na produção de energia e, nesse sentido, os resíduos orgânicos urbanos são considerados biomassa. A bioenergia contida nestes materiais pode ser aproveitada por meio da combustão direta, de processos termoquímicos (gaseificação, pirólise, liquefação e transesterificação) ou de processos biológicos (digestão anaeróbia e fermentação) (ANEEL, 2005).

A Figura 5 apresenta um esquema com as principais tecnologias para obtenção de energia a partir da biomassa e a biodigestão, em destaque no “Processo de Conversão”, que representa um meio de transformação de diversas fontes de biomassa em biogás que, por possuir elevado poder calorífico, pode ser utilizado como fonte de calor pela queima ou para movimentar geradores de energia elétrica.

Apesar da grande disponibilidade de resíduos orgânicos e da existência de sistemas e equipamentos disponíveis no mercado, capazes de tratar estes materiais, os estudos estão focados, principalmente, em resíduos agropecuários e em grandes geradores, sendo relativamente poucos os projetos em operação, visando o aproveitamento de biogás a partir de resíduos orgânicos urbanos no Brasil.

As principais dificuldades apontadas pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento – PNUD (2010), refere-se à viabilidade técnica e econômica, além de problemas operacionais do sistema, indicando a necessidade de aperfeiçoamentos tecnológicos e incentivo ao emprego dessa fonte de energia de maneira descentralizada.

Figura 5 - Diagrama das principais tecnologias de transformação energética da biomassa



Fonte: Adaptado de ANEEL (2005).

No Brasil, ainda existem problemas estruturais relacionados à coleta e tratamento da matéria orgânica, expressa pelo baixo grau de desenvolvimento da área de saneamento básico do país, além de dificuldades na aquisição de equipamentos que apresentam custos elevados, por serem, em grande parte, importados, o que também dificulta a manutenção (PNUD, 2010).

Normalmente, os investimentos em fontes de energia não renováveis costumam ser mais dispendiosos que as fontes tradicionais, conforme problematiza o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (2010), contudo, considerando todo o contexto explorado, referente à produção, gerenciamento e potencial energético dos resíduos, o desenvolvimento de estudos de métodos de tratamento da fração orgânica visando o aproveitamento do biogás deve ser incentivado e fundamentado em referências técnicas, legais e econômicas, viabilizando a disseminação de projetos de tratamento e aproveitamento do resíduo urbano do país de forma descentralizada.

Ainda assim, alguns instrumentos legais instituídos no Brasil incentivam o tratamento dos resíduos sólidos urbanos – RSU, visando o aproveitamento energético, como a Lei nº 12305/2010 da Política Nacional de Resíduos Sólidos. Anterior à esta lei, o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica – PROINFA, instituída pela Lei nº 10.483

de 2002, também incentiva a participação de produtores independentes no aproveitamento da biomassa em pequenas centrais hidrelétricas e eólicas.

Em 2012, um grande impulsionamento foi dado para o setor, através da criação do Sistema de Compensação de Energia Elétrica – SCEC, estabelecida pela Resolução Normativa nº 482, que permite o repasse da energia excedente ao sistema de distribuição de energia elétrica e que foi aperfeiçoada e alterada em 2015 pela Resolução Normativa nº 687. Ainda em 2012, a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, por meio da chamada nº 14, criou um projeto com o objetivo de dar bases tecnológicas e infraestrutura técnica para iniciativas voltadas para geração de energia elétrica a partir do biogás de resíduos ou efluentes líquidos, de maneira integrada e sustentável. Esse projeto teve como consequência inúmeros benefícios, constituindo-se em uma oportunidade de promover a sustentabilidade social e ambiental do desenvolvimento municipal no país, por meio do estímulo a uma gestão mais apropriada dos resíduos sólidos urbanos.

O aproveitamento energético do biogás promove a utilização ou reaproveitamento de recursos renováveis; colabora com a não dependência de fonte de energia fóssil; aumenta a oferta e possibilita a geração descentralizada de energia próxima aos centros de carga; promove economia no processo de tratamento de esgoto, aumentando a viabilidade da implantação de serviços de saneamento básico (PNUD, 2010).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Os resíduos alimentares utilizados neste estudo foram fornecidos pela cantina da Faculdade de Engenharia, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), *campus* de Guaratinguetá (FEG). O *campus* é composto por onze setores e cinco blocos, que abrangem áreas específicas, com diferentes finalidades. A cantina está localizada no setor 10, constituído pelo bloco V, administração, cantina, seção técnica de saúde (STS), os prédios dos departamentos de Engenharia Civil e Engenharia Mecânica, guarita I e II, vigilância e almoxarifado, destacados na Figura 6.

Figura 6 - Planta da Faculdade de Engenharia, da UNESP, *campus* de Guaratinguetá, com setor 10 em destaque



Fonte: Setor administrativo da UNESP, *campus* de Guaratinguetá (2017).

O *campus* atende a 1689 alunos, regularmente matriculados nos cursos de graduação, 484 alunos de pós-graduação, 340 alunos no colégio técnico e 327 funcionários em atividade, dentre eles professores e técnicos dos cursos de graduação e colégio técnico. Também é preciso considerar, que existem prestadores de serviços terceirizados, que por ser de número variado, não foram contabilizados.

A cantina possui uma área construída de 138,36 m² e funciona de segunda a sábado, no período das 7h às 22h de segunda a sexta-feira e das 7h às 13h no sábado, servindo itens de café da manhã, almoço, lanches e jantar, sendo um gerador de resíduos, majoritariamente, orgânico (Figura 7).

Figura 7 - Imagem de satélite da Faculdade de Engenharia, da UNESP, *campus* de Guaratinguetá e, no destaque, a área da cantina.



Fonte: Google Earth (2019).

Durante o preparo das refeições e sucos são gerados resíduos como cascas de legumes, de ovos e de laranja, talos e folhas de verduras. O período de almoço se inicia por volta das onze horas e termina, aproximadamente, às quatorze horas. Os principais resíduos coletados na cantina, utilizados para abastecer o biodigestor, foram as sobras dos pratos e as cascas de laranja, utilizadas no preparo de sucos, contendo também restos de salgados fritos e assados, bolos, pães e lanches, que são servidos durante todo o período de funcionamento do estabelecimento.

4.2 QUANTIFICAÇÃO DO RESÍDUO ALIMENTAR PRODUZIDO

Os resíduos alimentares gerados pela cantina são descartados junto com outros resíduos sólidos e coletados pelo serviço municipal de limpeza de Guaratinguetá. Nesse estudo, obteve-se a informação de que são servidas cerca de 60 kg de refeições diariamente, considerando em média 45kg em sistema de *self service* e cerca de 15kg em prato feito, além de sanduíches, salgados, entre outros resíduos alimentares que, segundo a NBR 10.004/2004, são classificados como Resíduos da Classe II A – não perigosos e não inertes, com possibilidade de tratamento.

Inicialmente os resíduos alimentares foram segregados pelos funcionários da cantina e armazenados em um balde com tampa para impedir possíveis contaminações (Figura 8). Para um correto dimensionamento do sistema, os resíduos foram pesados em uma balança digital do Departamento de Engenharia Civil, durante a última semana de junho e a primeira semana de

julho, considerando estas duas semanas como pico de consumo de alimentos por corresponder ao período de avaliações semestrais dos alunos do colégio técnico, que são os maiores consumidores da cantina, somando-se ao consumo de alunos, docentes e funcionários da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá (Figura 8).

Figura 8 - Coleta e armazenamento em balde com tampa, dos resíduos alimentares produzidos na cantina da FEG/UNESP e pesagem em balança digital.



Fonte: Autora.

Esse procedimento de separação, coleta e pesagem dos resíduos alimentares gerados pela cantina foi continuado durante a alimentação dos biodigestores projetados neste estudo, conforme sua capacidade, visando o controle da quantidade de resíduos inseridos e da relação de gases gerados pelo sistema.

4.3 METODOLOGIA

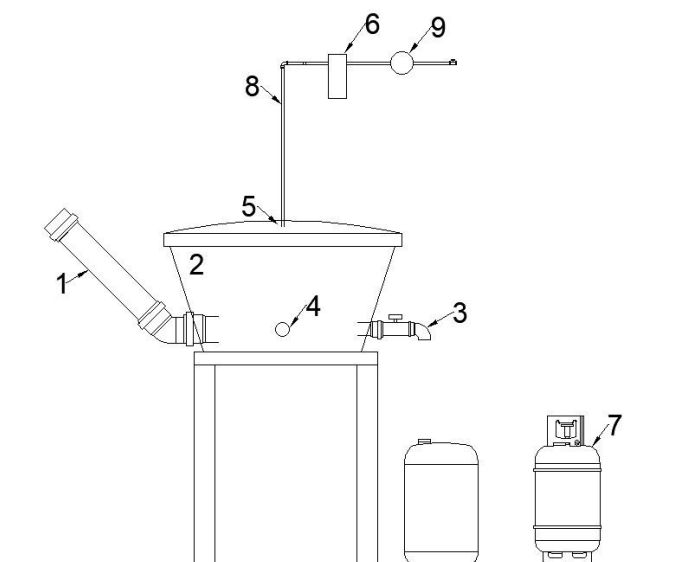
4.3.1 *Montagem do biodigestor*

A metodologia de tratamento adotada foi a biodigestão anaeróbia, com a montagem de um sistema, inicialmente, baseado no modelo chinês de biodigestão, possuindo um sistema de digestão de uma fase, onde todos os processos bioquímicos ocorrem em uma câmara.

Com base na quantidade de resíduo gerado foi elaborado o sistema de biodigestão com materiais acessíveis e de baixo custo, utilizando elementos adequados para substituir determinados os componentes do modelo chinês. A Figura 9 apresenta de forma esquemática o

biodigestor, com seus respectivos componentes, identificados numericamente e descritos a seguir.

Figura 9 - Esquema do biodigestor baseado no modelo chinês com seus respectivos componentes.



Fonte: Autora.

Para a alimentação do sistema foi utilizada uma tubulação de PVC de 100 mm (1), que conduz o resíduo alimentar até a caixa d'água de 150 L (2), onde ocorre a biodigestão anaeróbia. Os produtos gerados pela decomposição podem ser coletados através das aberturas instaladas na caixa d'água para retirada do efluente (3), do composto (4) e do biogás (5). Esse projeto incluiu o tratamento do biogás por meio de um filtro de carvão ativado (6), que pode ser armazenado em um botijão (7), coletado através do sistema em tubulação de cobre (8), com controles de saída regulada por válvulas e registros. Para verificar a pressão de saída do gás, foi instalado um manômetro (9) no sistema de coleta do gás.

Para atender ao objetivo de redução de custos e utilizar materiais alternativos e acessíveis na região, foi feita uma adaptação na conexão entre o tubo de entrada de alimentos e a caixa d'água, com uso de recortes de luvas de PVC, como pode ser observado na Figura 10. Essa adaptação possibilitou a substituição da flange de 100 mm, para realizar a conexão do tubo de alimentação, o que gerou uma redução de custos de \$200,00 (valor médio de mercado) para \$10,00 na construção do biodigestor. Posteriormente, foi aplicado silicone acético, de uso geral, com propriedades antifungo e antimoho, tanto na parte interna quanto na parte externa da conexão, para garantir a vedação do sistema.

Figura 10 - Luvas de 100 mm cortadas (à esquerda) para a conexão do tubo de alimentação à caixa d'água, parte externa (centro) e detalhe da vedação interna em silicone (à direita).



Fonte: Autora.

Os resíduos alimentares foram introduzidos no biodigestor continuamente, inicialmente, colocados inteiros, o que gerou certa dificuldade na alimentação do biodigestor durante a passagem do material pela curva instalada na caixa d'água. A alimentação do sistema com os resíduos alimentares sem trituração foi testada, pensando na praticidade, considerando que para que empreendimentos de grande porte adotem essa prática, o sistema operacional deve ser facilitado.

Entretanto, visando a eficiência da biodigestão e da alimentação do sistema, optou-se por utilizar um triturador de resíduos orgânicos disponível no Departamento de Engenharia Civil da FEG. O triturador de resíduos orgânicos TR 200, fabricado pela Trapp, utilizado neste estudo é indicado para trituração de galhos e podas em geral (Figura 11).

O tamanho das partículas também é um parâmetro que interfere no funcionamento do biodigestor e, conforme Izumi apud Zhang *et al.* (2014), interfere, significativamente, na biodigestão de resíduos alimentares, sendo indicado algum tipo de pré-tratamento de forma a acelerar o processo de hidrólise, considerada a etapa de limitação do processo, que pode ser melhorada utilizando dois ou mais estágios (ZHANG *et al.*, 2019).

Figura 11 - Triturador de resíduos orgânicos TR 200, fabricado pela Trapp utilizado no estudo (à esquerda) e resíduos alimentares triturados (à direita).



Fonte: Autora.

A caixa d'água de PVC com volume de 150 litros foi adotada para substituir a câmara de biodigestão que, normalmente, é construída em alvenaria em modelos como o indiano e o chinês, onde todo o resíduo alimentar inserido passa por biodegradação anaeróbia. Para garantir a completa vedação entre a tampa e a caixa d'água e gerar condições anaeróbias, para o desenvolvimento das bactérias metanogênicas, foi aplicado ao longo de toda borda superior da caixa d'água, um adesivo selante de poliuretano, “PU para-brisas”, utilizado no setor automotivo para fixação de vidros em para-brisas (Figura 12). Esse selante foi utilizado, porque após a secagem, se converte em uma borracha flexível, que além de vedar, pode permitir a abertura da tampa do biodigestor para eventuais limpezas e manutenções.

Figura 12 - Borda da caixa d'água com o adesivo selante aplicado.



Fonte: Autora.

Para a coleta do chorume, foi feita a conexão de uma torneira PVC 3/4, com uso de uma flange de PVC 50 mm e uma peça redutora rosqueável, instalada na parte inferior da caixa d'água. Na parte interna desta conexão, foi associado um filtro de nylon por onde o efluente pode ser conduzido e coletado até um reservatório.

A conexão da saída do composto da caixa d'água foi feita de maneira análoga à saída do chorume, no entanto, foi adotado um registro esfera de PVC para permitir a saída sem entupimentos e, assim como o chorume, o composto gerado pode ser aplicado como biofertilizante.

Por meio de uma abertura na tampa da caixa d'água foi instalado um sistema de coleta de gás, conectado por meio de um flange de PVC 3/4 e, para fins de análises experimentais, foi adaptada uma saída no sistema de coleta de gás, com controle realizado por um registro, a fim de obter dados sobre a composição do gás produzido pela decomposição anaeróbia (Figura 13). Em um sistema comercial de biodigestão para tratamento de matéria orgânica essa saída não seria necessária e o gás poderia ser conduzido diretamente ao filtro de carvão ativado, para retirada de impurezas do biogás (Figura 14). De acordo com Souza e Peres (2019), o carvão ativado, por meio de adsorção, remove determinados compostos indesejáveis de forças moleculares fracas presentes no biogás, para que então, o gás metano purificado, possa ser coletado e utilizado.

Figura 13 - Detalhe da ligação à tampa da caixa d'água do sistema de coleta de biogás (à esquerda) e saída adaptada para coleta de biogás antes de passar pelo filtro de carvão ativado (à direita)



Fonte: Autora.

Figura 14 - Sistema do biodigestor construído com caixa d'água de 150 litros.



Fonte: autora.

4.3.2 Análises físicas e químicas

O biodigestor foi dimensionado e construído para possibilitar a coleta de chorume, de composto e de biogás (antes e após passar por filtro de carvão ativado), gerados pela biodigestão dos resíduos alimentares da cantina, para que estes produtos fossem periodicamente coletados e caracterizados por parâmetros quantitativos e qualitativos, por meio de análises químicas, físicas e biológicas, seguindo as metodologias descritas no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005), e por meio de cromatografia gasosa para análises do biogás, a serem realizadas nos Laboratórios da FEG/UNESP. No entanto, até a apresentação deste trabalho estas análises não foram realizadas, porque o experimento ainda está em fase inicial, sendo enfatizado neste trabalho de graduação, os aspectos de dimensionamento do biodigestor, usando como parâmetro o modelo chinês e as peculiaridades dos resíduos alimentares.

Neste período inicial do experimento, além das pesagens, para a determinação da quantidade de resíduos alimentares inserida na câmara do biodigestor, foi realizado o acompanhamento da variação do pH do chorume gerado, que é um parâmetro que pode indicar o desenvolvimento de determinados microrganismos. Amostras de chorume foram retiradas através da torneira instalada na caixa d'água e foram analisadas em um pHmetro da marca Digimed, modelo DM 20 (Figura 15), disponível no laboratório de Química do *campus*.

Figura 15 - Amostras de chorume coletadas para análise de pH aos 15 dias após o início do processo de biodigestão.



Fonte: Autora.

Além do emprego da cromatografia gasosa para analisar a composição do biogás e quantificar o metano produzido, também está prevista uma análise do biogás por fotolorimetria, para quantificar amônia, sulfeto de hidrogênio, gás carbônico e metano, além de um analisador de diferença por volume adaptado do método de Orsat, disponibilizado pela Embrapa, que indica a composição de gás carbônico e metano apenas. Este método de deslocamento de volume assume que o biogás produzido é composto apenas por metano e dióxido de carbono, conforme Rodrigues (2018), e se mostra aceitável pois outros gases estão dissolvidos em meio aquoso quando o pH da solução está neutro.

Os resultados das análises do biogás obtidos por meio de cromatografia serão comparados aos obtidos pelo método de deslocamento de volume, considerando que o equipamento disponibilizado pela Embrapa é de baixo custo e pode ser adquirido mais facilmente por empreendimentos que implantarem o sistema de biodigestão e necessitarem fazer o monitoramento da qualidade do biogás.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através da pesagem, foi possível montar um sistema de tratamento do resíduo alimentar baseado na quantidade gerado pela cantina. O sistema de biodigestão produzido foi baseado em modelos já conhecidos e montado visando custos reduzidos e fácil operação, de forma a viabilizar sua replicação e disseminar o tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos de pequenos e médios geradores.

A seguir encontram-se os resultados obtidos com o desenvolvimento deste trabalho, expondo-se os custos e conceitos levantados referente ao tratamento do resíduo alimentar.

5.1 QUANTIDADE DE RESÍDUOS ALIMENTARES GERADOS PELA CANTINA

Para dimensionar o volume da caixa d'água a ser utilizada no sistema de biodigestão, foi realizada a coleta e pesagem do resíduo alimentar gerado pela cantina durante as semanas de maior consumo. Na Tabela 2, são apresentados os totais de resíduos orgânicos coletados ao longo da última semana do mês de junho e da primeira semana do mês de julho, de onde foi possível obter uma média diária de produção de 9,148 kg de resíduo alimentar. E, a partir dos resultados, optou-se por iniciar o estudo com uma caixa d'água de 150 L.

Tabela 2 - Massa de resíduos alimentares (kg) coletada na cantina da FEG/UNESP, nas semanas de maior consumo de alimentos do primeiro semestre de 2019.

Data	Massa (kg)
25/06/2019	2,483
26/06/2019	13,115
27/06/2019	11,238
28/06/2019	12,115
01/07/2019	12,391
02/07/2019	6,480
03/07/2019	7,469
04/07/2019	10,097
05/07/2019	6,943
Total	82,331

Fonte: Autora.

Após a montagem do biodigestor, foi iniciada a coleta, pesagem e introdução dos resíduos alimentares na câmara de biodigestão. A massa total introduzida foi de 39,877 kg de alimento e as quantidades diárias estão expostas na Tabela 3.

Tabela 3 - Quantidade de resíduo alimentar coletada na cantina da FEG/UNESP e introduzida no biodigestor.

Data	Massa (kg)
27/08/2019	5,704
28/08/2019	4,543
29/08/2019	7,800
02/09/2019	4,083
03/09/2019	6,820
04/09/2019	1,660
10/09/2019	9,267
Total	39,877

Fonte: Autora.

Durante o estudo, foi possível identificar que entre os principais componentes dos resíduos alimentares da cantina, destacaram-se as cascas de laranja, em maior proporção que as sobras de alimento, provenientes das sobras dos pratos servidos e de lanches, salgados fritos e assados e demais itens oferecidos no café, no almoço e no jantar. Em algumas coletas foi observada a presença de materiais plásticos e guardanapos de papel, que foram descartados.

Também é preciso destacar que, inicialmente, houve certa resistência dos funcionários da cantina, quanto à segregação dos resíduos, por impor uma mudança de hábito no ambiente de trabalho e contrariar a postura recorrente com relação a gestão de resíduos, considerando que os resíduos alimentares sempre foram coletados e descartados misturados aos demais. De fato, o Ministério do Meio Ambiente (2010), reconhece que a implantação da coleta seletiva implica em uma profunda transformação na forma de compreender e gerenciar os resíduos, sendo necessária uma mobilização social e educação ambiental, que compõem uma das etapas necessárias na introdução da segregação dos resíduos.

5.2 CUSTOS E NECESSIDADES DO BIODIGESTOR DE RESÍDUOS ALIMENTARES

Os materiais utilizados no estudo foram adquiridos em lojas de materiais de construção da cidade de Guaratinguetá (SP), buscando produtos de fácil acesso, de baixo custo e fácil manutenção. O custo total do biodigestor foi de R\$716,80, sendo que R\$495,16 foi o custo do sistema de alimentação (tubo de PVC), da câmara (caixa d'água) e saídas de composto, chorume e gases e R\$221,64 correspondeu ao custo dos componentes do sistema de captação e tratamento do biogás, como pode ser observado na Tabela 4.

A partir da segunda semana de introdução dos resíduos alimentares no biodigestor, notou-se a geração de líquidos que se condensaram e acumularam na tampa da caixa d'água, indicando que a vedação adotada não foi suficiente para gerar um ambiente totalmente

anaeróbio. Neste caso é importante ressaltar que o sistema deve garantir a impermeabilidade ao ar, pois na presença de oxigênio, a degradação produz apenas dióxido de carbono, dificultando o desenvolvimento dos microrganismos envolvidos na produção do gás metano (PROSAB, 2003). Além disso, a degradação da matéria orgânica pode atrair e favorecer o desenvolvimento de insetos e larvas.

Tabela 4 - Custos dos materiais utilizados no biodigestor construído com caixa d'água de 150 litros.

Materiais	Quantidade	Preço unitário (R\$)	Total (R\$)
Aplicador de silicone	1	24,50	24,50
Espigão fixo macho 1/4 x 1/4 cobre	1	7,00	7,00
Silicone acético 50g	1	6,00	6,00
Caixa d'água 150 L	1	149,00	149,00
Flange 50 mm	2	29,00	58,00
Tubulação PVC 50 mm	1	13,00	13,00
Registro esfera PVC 50 mm	1	39,00	39,00
Cola de PVC	1	14,90	14,90
Lixa	1	2,00	2,00
Cap PVC 50 mm	1	8,37	8,37
Flange 3/4	2	9,95	19,90
Torneira esfera PVC 3/4	1	9,50	9,50
Plug com rosca 1/2 x 1/2 PVC	1	0,85	0,85
Carvão ativado	1	100,00	100,00
Bucha de redução 3/4 x 1/2	2	2,57	5,14
Bucha de redução 1/2 x 1/4 cobre	2	2,67	5,34
Tubulação PVC 100 mm	1	13,00	13,00
Luva 100 mm PVC	2	4,50	9,00
Bucha 1/2 NPT x 1/8 NPTI cobre	1	6,50	6,50
Chicote 1/8 50 cm	4	18,00	72,00
Niple 1/8 cobre	3	3,00	9,00
Te 1/8 NPTI x 1/8 NPTE x 1/8 NPTI cobre	1	11,00	11,00
Bucha 1/4 NPTE x 1/8 NPTI cobre	1	2,80	2,80
Luva 1/4 NPT cobre	1	5,00	5,00
Manômetro	1	35,00	35,00
Válvula de retenção 7/16 NSI x 1/2 NPTE cobre	1	13,50	13,50
União 1/2 INT x 1/8 INT cobre	1	7,50	7,50
Torneira 1/8 E x 1/8 I cobre	2	17,00	34,00
Te 1/8 NPTE x 1/8 NPTI x 1/8 NPTI cobre	1	10,00	10,00
Borboleta P13 latão	1	10,00	10,00
Tampão 1/8 NPT	1	2,00	2,00
Fita veda rosca 18 x 25 m	1	7,00	7,00
Bico 1/2 BSPI x 3/8 BM	1	7,00	7,00
Adesivo selante de poliuretano	1	45,00	45,00
Total			R\$761,80

Fonte: Autora.

Para que a caixa d'água possa ser utilizada como câmara de biodigestão, de forma bem-sucedida, recomenda-se a completa vedação, sem a opção de ser destampada periodicamente para limpeza e, além disso, deve ser enterrada, para se adequar ao sistema de biodigestor do modelo chinês. Neste caso, a retirada de composto para a manutenção do sistema deverá ser realizada unicamente pelo sistema de coleta de composto, via tubulação de 100 mm acoplada à caixa d'água.

O biodigestor construído com caixa d'água foi proposto com o objetivo de servir de modelo a ser replicado e utilizado no tratamento de resíduos sólidos orgânicos, especificamente, alimentares. No entanto, no decorrer deste estudo, foi possível identificar a necessidade de ferramentas ou técnicas que permitam o monitoramento em tempo real do processo de biodigestão e que, resultem na melhoria do desempenho e na manutenção dos sistemas de biodigestão. Neste aspecto, embora o sistema com a caixa d'água tenha apresentado troca de gases com o ambiente externo, foi possível realizar o monitoramento do pH do chorume, que se manteve constante, em torno de 4,0 até ser desativado, oito semanas após o início da introdução dos resíduos alimentares no biodigestor. Esse valor de pH foi coerente com a literatura, conforme o PROSAB (2003), inicialmente o chorume gerado da biodigestão deve apresentar características ácidas, com pH 4,0.

Uma das motivações para o desenvolvimento deste projeto de biodigestão para produção de biogás a partir dos resíduos alimentares da cantina da Faculdade de Engenharia da UNESP, *campus* de Guaratinguetá, foi a base de dados obtidos com diversos estudos realizados com este tipo de resíduo, que comprovaram o potencial metanogênico como pode ser observado na Tabela 5.

A produção diária de biogás depende, na prática, da quantidade de sólidos voláteis (SV) presente nos resíduos alimentares, que representam a parte dos sólidos totais, suscetíveis de serem biodegradados e convertidos em biogás na câmara de biodigestão. Portanto, o método mais utilizado para estimativas de geração de biogás é com base no teor de sólidos voláteis, permitindo assim verificar a viabilidade de produção de biogás a partir de determinado substrato. De acordo com estes resultados verificou-se que os resíduos alimentares possuem um excelente potencial para a biodigestão visando a geração de biogás, apresentando valores de produção específica de metano superiores aos da maioria dos resíduos orgânicos. No entanto, a digestão anaeróbia de resíduos alimentares é um processo bastante complexo, uma vez que deve, simultaneamente, digerir carboidratos, proteínas e lipídios (ZHANG *et al.*, 2014).

Tabela 5 - Potencial metanogênico de diferentes resíduos orgânicos

Resíduos	Potencial Metanogênico $\text{m}^3\text{CH}_4.\text{kgSV}^{-1}$	Referência
Frutas	0,180 a 0,732	Gunaseelan, 2004
Vegetais	0,190 a 0,400	
Alimentares	0,525	Lissens <i>et al.</i> , 2004
Alimentares	0,479	Zhang <i>et al.</i> , 2011
Alimentares	0,410	Zhang <i>et al.</i> , 2013
Alimentares	0,496	Zhang <i>et al.</i> , 2019
Peixe	0,441 a 0,482	Kafle <i>et al.</i> , 2013
Cervejaria	0,316	
Pão	0,306	
Esterco de suíno	0,568	Amaral <i>et al.</i> , 2016
Esterco de bovino leiteiro	0,204	
Esterco de cavalo	0,155	Kafle e Chen, 2016
Esterco de caprinos	0,159	
Esterco de frango	0,259	
Esterco de suíno	0,323	

Fonte: Dados compilados da literatura.

Através da desativação do biodigestor, foi possível observar que os resíduos degradados ficaram dispostos na superfície da câmara biodigestora, apresentando um aspecto mais viscoso, como pode ser visto na Figura 16, enquanto os materiais que se acumularam no fundo, por diferença de densidade, apresentavam partículas sólidas de alimento e partes ainda não biodegradadas, apresentando diferentes níveis e taxas de biodegradabilidade.

Figura 16 - Aspecto dos resíduos alimentares após oito semanas no biodigestor.



Fonte: Autora.

Conforme Zhang *et al.* (2014), as características dos resíduos alimentares variam com sua composição como arroz, vegetais, carne, dentre outros materiais, sendo compostos,

principalmente, de polímeros de carboidratos como amido, celulose e hemicelulose, de lignina e outros compostos orgânicos como proteínas, lipídios, ácidos, entre outros, além de uma parte menor de compostos inorgânicos. Estes autores relataram que, entre as sucessivas reações de digestão, a hidrólise é considerada a etapa de limitação da taxa de biodigestão e para melhorar o desempenho da digestão anaeróbia, são recomendados vários pré-tratamentos físicos, termoquímicos, biológicos ou combinados. Além disso, uma maneira promissora de melhorar o desempenho da biodigestão é a co-digestão dos resíduos alimentícios com outros substratos orgânicos, como confirmado por numerosos estudos, em que uma maior capacidade tampão e um equilíbrio ideal de nutrientes aumentam os rendimentos de biogás/metano com a co-digestão.

Neste aspecto, El-Mashad e Zhang (2010) avaliaram o potencial de produção de biogás de diferentes misturas de esterco bovino não peneirado e resíduos alimentares e comparou-os com o rendimento somente de esterco bovino ou de resíduos de alimentos. Um modelo de cinética de primeira ordem foi desenvolvido para calcular o rendimento de metano a partir de diferentes misturas de resíduos de alimentos e esterco de bovino não peneirado. Os resultados do modelo demonstraram que a adição de resíduos alimentares ao biodigestor contendo esterco bovino em níveis de até 60% dos sólidos voláteis iniciais aumentou, significativamente, o rendimento de metano em 20 dias de digestão.

Segundo Chan *et al.* (2019) e Kim, Kim e Lee (2019) recomenda-se a co-digestão, que consiste no uso de outras matrizes no substrato, a fim de reduzir o tempo de retenção dos resíduos e aumentar a eficiência do sistema, podendo influenciar a biodigestão de diferentes maneiras, em função da proporção das misturas no substrato orgânico.

Chan *et al.* (2019) analisaram a eficiência da aplicação de micronutrientes em co-digestores anaeróbicos usados para a produção de metano de resíduos alimentares e de águas residuárias domésticas. Os autores verificaram que a produção de metano foi otimizada com a utilização de cobre como cofator de enzimas e coenzimas microbianas envolvidas no processo, evidenciando que o uso de inoculantes e a suplementação com micronutrientes é uma estratégia eficaz para aumentar a eficiência da metanização de resíduos alimentares.

5.3. CONSTRUÇÃO DE BIODIGESTOR EXPERIMENTAL E ANÁLISES PREVISTAS

Após verificar que o biodigestor construído com a caixa d'água de 150 litros, mesmo com o uso do selante entre a tampa e a caixa, não proporcionou condição de anaerobiose, optou-se por substituir a câmara de degradação por uma bombona de 50 litros de polietileno de alta densidade. Essa opção foi adotada somente para garantir a boa vedação do sistema e a geração de condições anaeróbias, para a obtenção de dados experimentais acerca da composição do biogás produzido pelo tratamento do resíduo alimentar, considerando que esse recipiente não é suficiente para tratar o volume de resíduos da cantina.

Para a construção do biodigestor experimental, a bombona de 50 litros foi usada como câmara de biodigestão, onde foram feitas aberturas para a entrada de resíduos alimentares e para as saídas de chorume, de composto e de biogás, utilizando as mesmas peças e encaixes do sistema aplicado ao sistema da caixa d'água, mas nesse caso, com melhor vedação (Figura 17).

Figura 17 - Bombona utilizada como câmara de biodigestão (à esquerda) e o novo biodigestor finalizado (à direita).



Fonte: Autora.

Os materiais utilizados nesse biodigestor experimental, também podem ser encontrados facilmente em casas de materiais de construção, ou ainda, obtidos em depósitos de materiais, excedentes de obra, ferro velho, entre outros, o que pode reduzir ainda mais os custos do sistema de biodigestão.

O sistema de captação de biogás e as tubulações de entrada de resíduos e de saída de composto e de chorume foram mantidos havendo, portanto, redução no custo deste biodigestor, com a substituição da caixa d'água pela bombona e de alguns componentes que não foram

utilizados, resultando em uma economia de R\$ 241,90, no entanto, com redução também da capacidade da câmara, de 150 para 50 litros (Tabela 6).

Tabela 6 - Custos dos materiais utilizados no biodigestor construído com bombona de 50 litros.

Materiais	Quantidade	Preço Unitário (R\$)	Total (R\$)
Aplicador de silicone	1	24,50	24,50
Espigão fixo macho 1/4 x 1/4 cobre	1	7,00	7,00
Bombona	1	10,00	10,00
Flange 50 mm	1	29,00	29,00
Tubulação PVC 50 mm	1	13,00	13,00
Cola de PVC	1	14,90	14,90
Lixa	1	2,00	2,00
Cap PVC 50 mm	1	8,37	8,37
Flange 3/4	1	9,95	9,95
Torneira esfera PVC 3/4	1	9,50	9,50
Bucha de redução 3/4 x 1/2	2	2,57	5,14
Carvão ativado	1	100,00	100,00
Bucha de redução 1/2 x 1/4 cobre	2	2,67	5,34
Tubulação PVC 100 mm	1	13,00	13,00
Luva 100 mm PVC	2	4,50	9,00
Bucha 1/2 NPT x 1/8 NPTI cobre	1	6,50	6,50
Chicote 1/8 50 cm	4	18,00	72,00
Niple 1/8 cobre	3	3,00	9,00
Te 1/8 NPTI x 1/8 NPTE x 1/8 NPTI cobre	1	11,00	11,00
Bucha 1/4 NPTE x 1/8 NPTI cobre	1	2,80	2,80
Luva 1/4 NPT cobre	1	5,00	5,00
Manômetro	1	35,00	35,00
Válvula de retenção 7/16 NSI x 1/2 NPTE cobre	1	13,50	13,50
União 1/2 INT x 1/8 INT cobre	1	7,50	7,50
Torneira 1/8 E x 1/8 I cobre	2	17,00	34,00
Te 1/8 NPTE x 1/8 NPTI x 1/8 NPTI cobre	1	10,00	10,00
Borboleta P13 latão	1	10,00	10,00
Tampão 1/8 NPT	1	2,00	2,00
Fita veda rosca 18 x 25 m	1	7,00	7,00
Bico 1/2 BSPI x 3/8 BM	1	7,00	7,00
Sela calha 290 g	1	26,90	26,90
Total			R\$519,90

Fonte: Autora.

Por outro lado, é preciso destacar que no período do estudo, verificou-se a disponibilidade de uma bombona de 200 litros pelo valor de R\$90,00, sendo possível montar um sistema com volume superior ao da caixa d'água, com custo total de, aproximadamente, R\$ 600,00, considerado inferior à média de preços dos biodigestores comerciais encontrados no mercado, com preços a partir de R\$2000,00.

Além das análises previstas no item material e métodos, quanto à qualidade e quantidade dos produtos gerados (composto, chorume e biogás), outras análises serão realizadas com o biodigestor experimental, para avaliar as diferentes etapas do processo de biodigestão dos resíduos alimentares da cantina.

Com relação ao volume da câmara biodigestora, Silva (2001) relata que quando se busca uma produção máxima de biogás pelo volume do biodigestor e unidade de tempo, a concentração de sólidos totais (ST) máxima deve ser menor que 8%, o que também facilita o movimento do material no interior do biodigestor, além de evitar entupimentos nos tubos de entrada e saída da câmara de digestão. Esse controle da concentração de sólidos será realizado no biodigestor experimental, visto que na literatura são encontrados casos em que concentrações superiores a 10% causa a diminuição da eficiência do biodigestor e o aumento da probabilidade de formação de crostas. Além disso, para que a produção de biogás seja otimizada, também será necessário controlar o tempo de retenção hidráulica (TRH), que corresponde ao tempo necessário para que o material passe pelo digestor, isto é, o tempo de entrada e saída dos diferentes materiais no digestor, como a água, sólidos e células (MOURA, 2012). De acordo com Gomes e Cappi (2011), o TRH está diretamente relacionado com o teor de sólidos totais do substrato e se refere ao tempo necessário para que o material seja degradado dentro do biodigestor. Outro fator a ser controlado nesse experimento é a temperatura, considerando que a literatura aponta que a faixa mesófila compreende temperaturas entre 20 e 40°C, buscando manter as variações inferiores a 3°C (BOND e TEMPLETON, 2011; PENG *et al.*, 2013).

De acordo com a literatura, o pH ideal para que ocorra a biodigestão anaeróbia está na faixa de 6,8 a 7,5. No entanto, Foresti (1999) verificou que a biodigestão pode ocorrer em taxas menos elevadas em faixa mais ampla de pH, variando de 6 a 8. Moura (2012) relatou que em meios ácidos a atividade enzimática das bactérias é nula e em meio alcalino a fermentação produz anidrido sulfuroso e hidrogênio, portanto, os valores de pH próximos a neutralidade são os mais indicados para a biodigestão anaeróbia.

A relação carbono/nitrogênio (C/N) também é fator relevante nos processos de biodigestão, considerando que os microrganismos precisam de nitrogênio na síntese de proteínas e que o valor ótimo da C/N varia de 20 a 30 (REICHERT, 2005). Dessa forma, a relação C/N dos resíduos a serem digeridos deve ser a mais próxima do ideal, caso contrário,

as bactérias não serão capazes de consumir todo carbono presente no meio e o desempenho do processo será baixo (SGORLON *et al.* 2011).

Como o processo é influenciado diretamente por diversos parâmetros chave, como temperatura, pH, concentração de amônia, de nutrientes, entre outros, neste experimento pretende-se manter estes parâmetros em níveis apropriados para que o processo de biodigestão seja eficiente, com redução de contaminantes orgânicos e produção eficiente de biogás.

Uma alternativa que também pretende-se implementar neste experimento, é a utilização de um ou mais co-substratos, que possam estimular a biodigestão, além de manter o funcionamento constante do biodigestor, sem a necessidade de interrupções causada pela lenta biodigestão dos resíduos alimentares, como foi observado no biodigestor inicial, para isso será testada a mistura em diferentes proporções do esgoto gerado no *campus* da UNESP de Guaratinguetá.

Ainda nessa linha de pesquisa, serão estudadas outras diferentes configurações de reatores, bem como, a avaliação dos custos de implementação, buscando adequar o dimensionamento da câmara de biodigestão a cada tipo de resíduo. Também pretende-se analisar a viabilidade do uso como biofertilizantes, do chorume e do composto gerado no processo de biodigestão dos resíduos, bem como, a possível necessidade de pós-tratamento para estes produtos.

6. CONCLUSÕES

- A cantina da Faculdade de Engenharia da UNESP, *campus* de Guaratinguetá, gera em média 9 kg/dia de resíduos alimentares em semanas de pico, que corresponde a cerca de 21% do alimento servido no sistema de *self service* e prato feito, sem contar as perdas geradas na cozinha do estabelecimento. Considerando todas as coletas, a produção média foi de 8 kg/dia.
- Os resíduos gerados pela cantina são descartados misturados aos demais resíduos sólidos e são recolhidos pelo serviço de coleta municipal, para posterior disposição em aterro sanitário, sendo identificada a necessidade de orientações aos funcionários para a segregação adequada destes resíduos no estabelecimento, a fim de viabilizar o tratamento da fração orgânica.
- Os resíduos alimentares gerados pela cantina do *campus* apresentam grande potencial de produção de biogás, principalmente quando foram pré-tratados por trituração, visando a otimização do processo de biodigestão.
- Estudos relacionados a diferentes configurações de reatores, bem como, de avaliação dos custos de implementação e operação são necessários, para que este processo se torne uma prática rotineira e fundamentada em padrões de dimensionamento de sistemas de biodigestão para diferentes tipos de resíduos orgânicos e suas particularidades.
- A viabilidade do uso do efluente como biofertilizante e a necessidade de um pós-tratamento também devem ser pesquisadas, uma vez que o chorume pode ser considerado um potencial poluidor quando disposto de maneira inadequada, entretanto possui aplicações quando estabilizados, podendo ser utilizado como substrato na germinação de mudas, como adubo e na recuperação de áreas degradadas.
- Os resíduos alimentares se mostraram bastante promissores à produção de biogás por suas características biodegradáveis, ainda assim, recomenda-se a utilização de co-substratos alternativos ricos em matéria orgânica biodegradável em proporções que assegurem longos períodos de operação deste biodigestor.
- Apesar da grande disponibilidade de resíduos orgânicos e da existência de sistemas e equipamentos disponíveis no mercado, capazes de tratar estes materiais, os estudos estão focados, principalmente, em resíduos agropecuários e em grandes geradores, sendo relativamente poucos os projetos em operação, visando o aproveitamento de biogás a partir de resíduos orgânicos urbanos no Brasil.

- Conclui-se que os resíduos alimentares podem ser utilizados no processo de digestão anaeróbia, caracterizando-se como uma ferramenta fundamental para a gestão dos resíduos sólidos urbanos no Brasil, uma vez que reduz a carga contaminante dos resíduos e pode reduzir em, aproximadamente, 50% o volume de resíduos sólidos destinados para os aterros sanitários, além de contribuir com a diversificação da matriz energética nacional.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília: Aneel, 2008. 236 p.

AMARAL, A. C. *et al.* Influence of solid-liquid separation strategy on biogas yield from a stratified swine production system. **Journal of Environmental Management**. v. 168, p. 229-235, 2016.

AMERICA PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – APHA. **Standard methods for the examination of wastewater**. 21. ed. Washington DC: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 2005. 1009 p.

ARAÚJO, Ana Paula Caixeta. **Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestor anaeróbico**. 2017. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017**. 15. ed. São Paulo: Abrelpe. 2018. 73p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10.004/2004**: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8.419/1992**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

BOND, T.; TEMPLETON, M.R. History and future of domestic biogas plants in the developing world. **Energy for Sustainable Development**, v. 15, n. 4, p. 347-354. 2011.

BRASIL. **Lei nº 11.445, de 5 de jan. de 2007**. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nº 6.766, de 19 de dez. de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de jun. de 1993, 8.987, de 13 de fev. de 1995; revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. Disponível em:

<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2007/lei-11445-5-janeiro-2007-549031-publicacaooriginal-64311-pl.html>. Acesso em: 17 dez. 2019.

BRASIL. **Lei nº 10.438, de 26 de abr. de 2002.** Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária, cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), dispõe sobre a universalização do serviço público de energia elétrica, dá nova redação às Leis nº 9.427, de 26 de dez. de 1996, nº 9.648, de 27 de maio de 1998, nº 3.890-A, de 25 de abr. de 1961, nº 5.655, de 20 de maio de 1971, nº 5.899, de 5 de jul. de 1973, nº 9.991, de 24 de jul. de 2000, e dá outras providências. Brasília: Câmara dos Deputados, Edições Câmara, 2012. 73p. (Série legislação, n.81). Atualizada em 18 maio 2012.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de ago. de 2010.** Institui a política nacional de resíduos sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fev. de 1998 e dá outras providências. 2.ed. Brasília: Câmara dos Deputados, Edições Câmara, 2012. 73p. (Série legislação, n. 81). Atualizada em 18 maio 2012.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS. **Diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos**, 2017. Brasília: MDR/SNIS, 2019. 194 p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente - MMA. **Manual para implantação de compostagem e de coleta seletiva no âmbito de consórcios públicos.** Brasília: MMA, 2010.

BRASIL. **Projeto de Lei do Senado nº 425, de 9 de dez. de 2014:** prorroga o prazo para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos de que trata o art. 54 da Lei nº 12.305. Brasília: Senado Federal, 2014. 67p.

CASSINI, S. T.; COELHO, S. T.; PECORA, V. Biogás: biocombustíveis. In: PERLINGEIRO, Carlos Augusto G. (org.). **Biocombustíveis no Brasil:** fundamentos, aplicações e perspectivas. Rio de Janeiro: Synergia Editora, 2014. p. 136-167.

CHAN, P. C. *et al.* Improved anaerobic co-digestion of food waste and domestic wastewater by copper supplementation: microbial community change and enhanced effluent quality. **Science of The Total Environment**, v. 670, p. 337-344, 2019.

COLOMBO, L. O. R.; FAVOTO, T. B.; CARMO, S. N. A evolução da sociedade de consumo. **Akrópolis:** Revista de Ciências Humanas da UNIPAR, Umuarama, v. 16, n. 3, p. 143-149, 2008.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. C.J.P.; ROSSI, M. Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada. *In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL*, 4., 2002, Campinas.

Anais eletrônicos [...]. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/pdf/agrener/n4v1/031.pdf>. Acesso em: 24 out. 2019.

DOMINGUES, A. Rumo a 4 bilhões de toneladas por ano. **Revista em Discussão**, Brasília, n. 22. p. 48-57, 2014. Disponível em:

<http://www.senado.gov.br/noticias/jornal/emdiscussao/residuos-solidos/residuos-solidos.pdf>.

Acesso em: 23 mar. 2017.

EL-MASHAD, H. M.; ZHANG, R. Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 11, p. 4021-4028, 2010.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Balanco energético nacional 2018**: ano base 2017. Rio de Janeiro: EPE, 2018. 293 p.

ENSINAS, Adriano Viana. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas – SP**. 2003. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

FILHO, G. L. T.; STANO JÚNIOR, A. **Energias renováveis**. TIAGO FILHO, G. L. (org.). Itajubá, MG: FAPEPE / Ministério de Minas e Energia, 2007. 44p. (série energias renováveis).

FORESTI, E. *et al.* Fundamentos do tratamento anaeróbio. *In: CAMPOS, J. R. (coord.). Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo*. Rio de Janeiro: RiMa Artes e Textos, p. 29-52. 1999.

GARCILASSO V. P.; VELÁZQUEZ S. M. S. G.; COELHO S. T. Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente de aterro sanitário: estudo de caso. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA*, 8., 2010, Rio de Janeiro. **Anais** [...]. Rio de Janeiro, 2010.

GIORDANO, G.; FILHO, O. B.; CARVALHO, R. J. **Processos físico-químicos para tratamento do chorume de aterros de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro: COAMB / FEN / UERJ / 2011. 178 p. (série temática: Tecnologias Ambientais. v. 4.)

GOMES, Felipe Correa de Souza Pereira. **Biometanização seca de resíduos sólidos urbanos: o estado da arte e análise crítica das principais tecnologias**. 2010. 193 f. Dissertação (Mestrado

Sustentabilidade Socioeconômica e Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

GOMES, F.O. de C.; CAPPI, N. Redução de sólidos de dejetos de poedeiras em biodigestores operados com diferentes tempos de retenção hidráulica. *In: Periódicos UEM. Anais [...]* Encontro de Iniciação Científica, v. 1, n. 1. 2011.

GUNASEELAN, V. B. Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks. **Biomass and Bioenergy**, v. 26, p. 389-399, 2004.

INÁCIO, C. T; MILLER, P. R. M. **Compostagem**: ciência e prática para a gestão de resíduos orgânicos. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 156 p.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA. **Diagnóstico dos resíduos sólidos urbanos**. Disponível em: http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf. Acesso em: 12 out. 2019.

KAFLE, G. K.; CHEN, L. Comparison on batch anaerobic digestion of five different livestock manure and prediction of potential methane production (BMP) using different statistical models. **Waste Management**, v. 48, p. 492-502, 2016.

KAFLE, G. K.; KIM, S. H.; SUNG, K. I. Ensiling of fish industry waste for biogas production: A lab scale evaluation of biochemical methane potential (BMP) and kinetics. **Bioresource Technology**, v. 127, p. 326-336, 2013.

KAZA S. *et al.* (eds). **What a Waste 2.0**: a global snapshot of solid waste management to 2050. World Bank Group. Washington, DC 20433. 2018, 272 p.

KIM, J.; KIM, J.; LEE, C. Anaerobic co-digestion of food waste, human feces, and toilet paper: Methane potential and synergistic effect. **Fuel**, v.248, p. 189-195, 2019.

LISSENS, G.; THOMSEN, A. B.; DE BAERE, L.; VERSTRAETE, W.; AHRING, B. K. Thermal wet oxidation improves anaerobic biodegradability of raw and digested biowaste. **Environmental Science and Technology**, v. 38, n. 12, p. 3418-3424, 2004.

LOGAN, M. *et al.* Investigating the performance of internet of things based anaerobic digestion of food waste. **Process Safety and Environmental Protection**, v.127, p. 277-287, 2019.

MERSONI, C.; REICHERT, G. A. Comparação de cenários de tratamento de resíduos sólidos urbanos por meio da técnica da avaliação do ciclo de vida: o caso do município de Garibaldi, RS. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 5, p. 863-875, 2017.

MOURA, Jhonson Pontes de. **Estudo de casos das rotas tecnológicas para produção de biogás e da influência da composição química de dejetos de matrizes suínas na qualidade do biogás gerada por biodigestor**. 2012. 122 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2012.

NASCIMENTO, M. C. *et al.* Estado da arte dos aterros de resíduos sólidos urbanos que aproveitam o biogás para geração de energia elétrica e biometano no Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 1, p. 143-155, 2019.

OLIVEIRA, Douglas Eldo Pereira de. **Estudo de viabilidade da produção de energia elétrica a partir do biogás gerado pela biodigestão de resíduos sólidos orgânicos em uma central de abastecimento paulista**. 2019. 64 f. Dissertação (Mestrado em Cidades inteligentes e Sustentáveis) – Universidade Nove de Julho, São Paulo, 2019.

PENG, J. *et al.* Spatial succession and metabolic properties of functional microbial communities in an anaerobic baffled reactor. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 80, p. 60–65, 2013.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO – PNUD. Ministério do Meio Ambiente – MMA. **Estudo sobre o potencial de geração de energia a partir de resíduos de saneamento (lixo, esgoto), visando incrementar o uso de biogás como fonte alternativa de energia renovável**. São Paulo: MMA, 2010.

PROGRAMA DE PESQUISAS EM SANEAMENTO BÁSICO – PROSAB. **Digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás**. CASSINI, S. T. (coord.). Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003. 210 p.

REICHERT, G.A. Aplicação da digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos: uma revisão. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23., 2005, Campo Grande. **Anais [...]**. Campo Grande: ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005.

RIZZONI, L. B.; TOBIAS, A. C. T.; DEL BIANCHI, M.; GARCIA, J. A. D. Biodigestão anaeróbia no tratamento de dejetos de suínos. **Revista Científica Eletrônica de Medicina**

Veterinária, ano 9, n. 18. Disponível em: http://faef.revista.inf.br/imagens_arquivos/arquivos_destaque/W34ebZOEZuzvEvG_2013-6-28-18-12-37.pdf. Acesso em: 09 out. 2019.

ROCHA, Camila Marçal da. **Proposta de implantação de um biodigestor anaeróbio de resíduos alimentares**. 2016. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2016.

RODRIGES, Vitor. **Biometanização de diferentes frações de resíduos alimentares em temperaturas mesofílica e termofílica**. 2018. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Campus Rio Claro, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro, 2018.

RORATTO, Lucas. **Análise e construção de um biodigestor para pequenas propriedades rurais**. 2014. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Horizontina, Horizontina, 2014.

SERAFIM, A. C. *et al.* Chorume, impactos ambientais e possibilidades de tratamentos. In: FÓRUM DE ESTUDOS CONTÁBEIS, 3., 2003, Rio Claro. **Anais [...]** Rio Claro: Centro Superior de Educação Tecnológica, 2003.

SGORLON, J.G. *et al.* Avaliação da DQO e da relação C/N Obtidas no tratamento anaeróbio de resíduos fruti-hortícolas. **Acta Scientiarum Technology**, v.33, n.4, p.421-424, 2011.

SILVA, M. S. **Biodigestão anaeróbia no saneamento rural**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2001. 71 p. (Textos Acadêmicos).

SIQUEIRA, T. M. O. de; ASSAD, M. L. R. C. L. Compostagem de resíduos sólidos urbanos no estado de São Paulo (Brasil). **Ambiente & Sociedade**, São Paulo, v. 18, n. 4, p. 243-264, 2015.

SOUZA, A.; PERES, S. Análise de viabilidade técnica e econômica da utilização do biogás produzido em uma estação de tratamento de esgoto do Recife como combustível para veículos leves. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 4, n. 2, p. 1-9, 2019.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H; VIGIL, S. **Integrated solid waste management: engineering principles and management issues**. New York: McGraw-Hill. 1993. 978 p.

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

ZHANG, C.; SU, H.; TAN, T. Batch and semi-continuous anaerobic digestion of food waste in a dual solid-liquid system. **Bioresource Technology**, v. 145, p. 10-13, 2013.

ZHANG, L.; LEEB, Y-W.; JAHNGA, D. Anaerobic co-digestion of food waste and piggery wastewater: Focusing on the role of trace elements. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 8, p. 5048–5059, 2011.

ZHANG, L. *et al.* Three-stage anaerobic co-digestion of food waste and waste activated sludge: Identifying bacterial and methanogenic archaeal communities and their correlations with performance parameters. **Bioresource Technology**. v. 285, 2019.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

DALMO, F. C *et al.* Geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos: experiência das políticas públicas brasileiras e internacional. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 7, n. 1, p. 39-50, 2018.

FORTLEV. Soluções Fortlev para sua obra – Caixa d'água Fortlev. Disponível em: https://www.fortlev.com.br/uploads/2015/03/catalogo_de_produtos.pdf. Acesso em: 15 abr. 2019.

SZYMANSKI, M. S. E.; BALBINOT, R.; SCHIRMER, W. N. Biodigestão anaeróbia da vinhaça: aproveitamento energético do biogás e obtenção de créditos de carbono - estudo de caso. **Semana: Ciências agrárias**, Londrina, v. 31, n. 4, p. 901-912, 2010.