

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DANIEL SERRAGLIO BARUFFI

**ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS A PARTIR DOS
RESÍDUOS SÓLIDOS GERADOS POR UMA REDE DE SUPERMERCADOS EM
UMA CIDADE PARANAENSE**

CAMPO MOURÃO

2022

DANIEL SERRAGLIO BARUFFI

**ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS A PARTIR DOS
RESÍDUOS SÓLIDOS GERADOS POR UMA REDE DE SUPERMERCADOS EM
UMA CIDADE PARANAENSE**

**Estimation of the energy potential of biogas from solid waste generated by a
supermarket chain in a city of Paraná**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Ambiental da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Prof. Dr. Thiago Morais de Castro

CAMPO MOURÃO

2022



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

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

DANIEL SERRAGLIO BARUFFI

**ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS A PARTIR DOS
RESÍDUOS SÓLIDOS GERADOS POR UMA REDE DE SUPERMERCADOS EM
UMA CIDADE PARANAENSE**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Ambiental da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

DATA DE APROVAÇÃO: 14/junho/2022

Thiago Morais de Castro
Professor Doutor em Engenharia Agrícola
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Maria Cristina Rodrigues Halmeman
Professora Doutora em Ciências Agronômicas
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Eudes José Arantes
Professor Doutor em Engenharia (Hidráulica e Saneamento)
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CAMPO MOURÃO
2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço antes de tudo a Deus, pela oportunidade de cursar uma graduação e me dar condições todos os dias para concluí-la.

Aos meus pais, Marcelo e Luciana, e meus irmãos, Pedro e Vitória por me encorajar e permitir financeiramente para esta conclusão.

Ao meu orientador Prof. Dr. Thiago Morais de Castro, por toda paciência, ajuda e conhecimento compartilhado para a conclusão deste trabalho.

Ao professor Dr. Armin Feiden, e ao profissional Carlos Binda por todo tempo e conhecimento compartilhado para esclarecimentos de dúvidas durante a construção deste trabalho.

Aos meus amigos feitos durante a graduação, que indiretamente me deram forças e encorajamento durante todo o processo, fazendo os momentos serem inesquecíveis nesses cinco anos.

Agradeço pôr fim a toda minha família, amigos, professores e todos aqueles que, de alguma forma, estiveram presentes, seja na faculdade ou fora dela, durante minha trajetória de cinco anos de graduação.

RESUMO

Visando a grande geração de resíduos sólidos orgânicos (RSO) nos supermercados e seu desafio para destina-los ambientalmente correto, foi proposto como objetivo deste trabalho o cálculo para estimar o potencial energético desses resíduos por meio da digestão anaeróbia. A área de estudo referiu-se a 14 unidades de uma rede de supermercados de uma cidade paranaense. Foram realizadas visitas *in loco* durante 7 meses para obter dados quantitativos e qualitativos dos resíduos que eram gerados mensalmente em cada supermercado. Com os dados obtidos, calculou-se uma média mensal total de resíduos sólidos, cujo resultado foi de 294,87 toneladas por mês, sendo que deste total, 33% foram classificados como resíduos recicláveis, 48% como resíduos orgânicos e 19% como rejeitos. A partir da média, foi calculado a carga diária que poderia ser adicionada ao reator para pré-dimensionar o volume do biodigestor, considerando apenas os resíduos orgânicos. Assim, estimou-se a produção de biogás e produção de metano cujos resultados foram de 1155,54 m³ de biogás e 693,32 m³ de CH₄ por dia, respectivamente. A partir dos resultados pode-se estimar o potencial de geração de energia elétrica, que resultou em 394,06 MWh por ano. Diante destes resultados, verificou-se o potencial apresentado pelos resíduos orgânicos gerados na rede de supermercados. Por fim, recomendam-se estudos mais detalhados em relação a viabilidade técnica e econômica relacionada a instalação e manutenção do biodigestor.

Palavras chave: digestão anaeróbia; geração de metano; energia renovável.

ABSTRACT

Considering the large generation of organic solid waste (OSW) in supermarkets and their challenge to dispose of them in an environmentally correct way, it was proposed as an objective of this work the calculation to estimate the energy potential of this waste through anaerobic digestion. The study area referred to 14 units of a supermarket chain in a city of Paraná, Brazil. On-site visits were made during 7 months to obtain quantitative and qualitative data of the waste that was generated monthly in each supermarket. With the data obtained, a total monthly average was calculated, which resulted in 294.87 tons per month, and of this total, 33% were classified as recyclable waste, 48% as organic waste and 19% as rejects. From the average, the daily load that could be added to the reactor was calculated to pre-dimension the volume of the biodigester, considering only the organic waste. Thus, the daily biogas production and methane production was estimated, and the results were 1155.54 m³ of biogas and 693.32 m³ of CH₄ per day, respectively. From the results one can estimate the potential for electricity generation, which resulted in 394.06 MWh per year. In view of these results, the potential presented by the organic waste generated in the supermarket chain was verified. Finally, more detailed studies are recommended in relation to the technical and economic feasibility related to the installation and maintenance of the biodigester.

Keywords: anaerobic digestion; methane generation; renewable energy

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição gravimétrica dos RSU	14
Tabela 2 - Substratos, e respectivos valores de sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV) e de rendimento de biogás estimado.....	23
Tabela 3 - Média mensal da quantidade e do balanço financeiro referente aos resíduos sólidos gerados nos 14 supermercados	29
Tabela 4 - Balanço econômico dos 14 supermercados em relação aos seus resíduos	30
Tabela 5 - Substratos e seus respectivos valores de sólidos totais, sólidos voláteis e seu rendimento de biogás estimado	32
Tabela 6 - Geração mensal de sólidos totais (ST) e estimativa de produção volumétrica de biogás de cada supermercado.....	32
Tabela 7 - Parâmetros de projeto de biodigestores	33
Tabela 8 - Estimativa de economia obtida com a eletricidade (E) gerada pelo biogás.....	34
Tabela 9 - Balanço econômico dos três cenários analisados para os supermercados.....	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
CO ₂	Dióxido de Carbono
CH ₄	Metano
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
RSO	Resíduos Sólidos Orgânicos
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SNIS	Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento
ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	11
2.1	Objetivo Geral	11
2.2	Objetivos Específicos	11
3	JUSTIFICATIVA.....	12
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
4.1	Resíduos sólidos urbanos.....	14
4.2	Digestão anaeróbia e biogás.....	15
4.3	Biodigestor	18
5	MATERIAL E MÉTODOS	21
5.1	Caracterização da área de estudo.....	21
5.2	Dados quantitativos e qualitativos de resíduos sólidos das unidades da rede de supermercados.....	22
5.3	Geração de biogás a partir dos resíduos sólidos orgânicos gerados nos supermercados	22
5.4	Pré-dimensionamento do biodigestor e estimativa do potencial energético dos resíduos sólidos da rede de supermercados	24
5.5	Estimativa do balanço econômico com a energia gerada e comparação entre diferentes cenários.....	27
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
6.1	Dados quantitativos e qualitativos relacionados aos resíduos sólidos gerados na rede de supermercados	29
6.2	Geração de biogás a partir dos resíduos sólidos orgânicos gerados nos supermercados	31
6.3	Pré-dimensionamento do biodigestor e estimativa do potencial energético dos resíduos sólidos da rede de supermercados	33
7	CONCLUSÕES	36
	REFERÊNCIA	37

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a geração de energia a partir das usinas hidrelétricas corresponde a 55,78% da matriz energética nacional (ANEEL, 2022). Embora esse modelo de produção de energia seja considerado limpo e renovável, possui um imenso potencial degradador para o meio ambiente durante sua instalação, como represamento e inundação de vários quilômetros quadrados.

Com maiores exigências pela sustentabilidade e maior acesso à tecnologia, outras formas de produção energética se tornam mais adequadas, como por exemplo parques eólicos, placas fotovoltaicas e uso de biomassa, assim como a geração de biogás a partir de resíduos orgânicos gerados no dia a dia.

A utilização do biogás como fonte de energia possui vários benefícios, principalmente por diversificar a matriz energética frente a utilização de combustíveis fósseis limitados, além de contribuir para o desenvolvimento sustentável (GENOVESE *et al.*, 2006). As três principais rotas tecnológicas disponíveis de conversão da biomassa em energia são: conversão termoquímica, conversão bioquímica e conversão físico-química (GENOVESE *et al.*, 2006).

A parte bioquímica de conversão energética do biogás utiliza processos biológicos e bioquímicos, que inclui a digestão anaeróbia que apresenta as mais adequadas condições para a geração de energia, por meio do biogás (VERINGA, 2000). O biogás produzido é constituído basicamente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), sendo o gás metano capaz de conferir ao biogás a capacidade de ser utilizado como fonte de energia, em especial na substituição do gás natural e/ou do gás liquefeito de petróleo (GLP).

Inúmeras são as fontes de resíduos orgânicos para a geração de biogás. Na área rural pode-se utilizar dejetos animais, na área urbana tem-se resíduos da estação de tratamento de esgoto sanitário e resíduos sólidos orgânicos gerados pela população que corresponde a aproximadamente 50% da massa de resíduos sólidos urbanos (RSU) total e que, em muitos casos, são destinados a aterros sanitários (ALBERTONI, 2013).

A oferta global de biogás em 2015 foi de 1,5 EJ o que representa 0,5% da energia mundial. No entanto, o potencial global de biogás pode chegar a mais de 35 EJ, que poderá atender cerca de 30% da demanda do gás natural. No cenário

energético transformador, a oferta de biogás aumentaria para 14,4 EJ até 2050, ou seja, quase dez vezes o valor atual (IRENA, 2020).

Com isso, pode-se ver tamanha vantagem em destinar os resíduos sólidos orgânicos para a geração de biogás, evitando assim a disposição em aterros e/ou no meio ambiente de modo inadequado, buscando uma destinação mais sustentável.

Juntamente com um levantamento teórico sobre o rendimento de biogás referente a cada tipo de resíduo orgânico, neste trabalho estimou-se o potencial energético a partir dos resíduos sólidos orgânicos gerados por uma rede de supermercados a partir da digestão anaeróbia para a geração do biogás.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral foi estimar os potenciais de geração de biogás e de produção de eletricidade a partir dos resíduos sólidos orgânicos gerados por uma rede de supermercados em uma cidade paranaense.

2.2 Objetivos Específicos

- Coletar dados quantitativos e qualitativos de resíduos sólidos orgânicos de cada unidade da rede de supermercados.
- Estimar o potencial energético dos resíduos orgânicos gerados pela rede de supermercados considerando a adoção do processo de biodigestão anaeróbia.
- Pré-dimensionar o volume do biodigestor para a produção de biogás
- Comparar diferentes cenários econômicos dos estabelecimentos entre a situação analisada, cenário considerando a eliminação de custos para destinação de resíduos orgânicos e cenário com possível economia de custos com energia elétrica.

3 JUSTIFICATIVA

A utilização dos aterros sanitários é o método mais comum no Brasil para destinação de resíduos sólidos, representando 60,2% dos resíduos destinados (ABRELPE 2021). Porém, o crescimento populacional e o consumismo acabam deixando os aterros cada vez mais saturados, sendo cada dia mais custoso destinar adequadamente os resíduos sólidos gerados.

Sabe-se também que os aterros sanitários, por mais que seja a forma mais utilizada nos dias de hoje no Brasil, podem causar vários impactos ao meio ambiente e a sociedade, principalmente em casos de acidente. Poluição do ar por emissões de gases, vazamento do lixiviado contaminando os lençóis freáticos, e o mau cheiro para os habitantes próximos ao aterro sanitário são exemplos de possíveis danos causados pelos aterros sanitários.

De acordo com a pesquisa feita por Hendges (2021) relacionada a composição gravimétrica de RSU no Brasil, 45,3% dos resíduos é composto por matéria orgânica. Sendo que grande parte deste percentual poderia ser aproveitado como matéria prima para digestão anaeróbia ou compostagem, evitando assim a disposição final.

Os supermercados e hipermercados são grandes geradores de resíduos em toda a cadeia produtiva, desde a chegada do produto, até o descarte feito pelo consumidor final (MENDES 2012). Em todos os setores presentes nos supermercados há geração de algum tipo de resíduo, principalmente nos setores de padaria e rotisseria, onde são fabricados pães, bolos e marmitas, gerando uma grande quantidade de orgânico que são descartados quando sobram e/ou não são vendidos.

Diante desse fato, compete ao supermercado assumir o gerenciamento de resíduos gerados e arcar financeiramente com a destinação ambientalmente correta.

De acordo com Tinoco e Kraemer (2008), as empresas com pretensão de sustentabilidade devem encarar que esse recurso é um fator de longo prazo, no setor econômico, porque empresas que não tem a preocupação com o meio ambiente, não são bem vistas perante a sociedade se não mudarem o comportamento.

Dentre muitas formas de destinação e reaproveitamento dos resíduos, há a utilização do biogás como fonte de produção de energia proveniente da digestão da fração orgânica presente nos resíduos sólidos, que além de representar grande benefício socioambiental, principalmente nos grandes centros urbanos, devido à

redução na disposição final em aterros e na redução da carga orgânica dos efluentes, também age na diminuição nas emissões de poluentes, como o metano (CH_4), gás de grande impacto no efeito estufa, e que corresponde em até 70% do biogás (FAZOLO, 2011).

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Resíduos sólidos urbanos

O crescimento populacional e o consumo de bens industrializados faz com que a geração de resíduos sólidos cresça na mesma proporção ou até em níveis maiores, como previsto nos dados da ABRELPE (2020), onde consta que nos últimos dez anos a geração de resíduos sólidos, no Brasil, cresceu 19%. E ainda com dados da ABRELPE (2020) foi constatado que 19 milhões de toneladas de resíduos gerados recebeu uma destinação inadequada, de um total de 72 milhões de toneladas.

A respeito da gravimetria dos RSU, conforme dados divulgados pela ABRELPE (2020), é possível afirmar que 45,3% são resíduos orgânicos, conforme indicado na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição gravimétrica dos RSU

MATERIAL	PARTICIPAÇÃO (%)
Matéria orgânica	45,3
Plástico	16,8
Papel e papelão	10,4
Metais	2,3
Vidro	2,7
Rejeitos	14,1
Outros	8,4
Total	100,0

Fonte: ABRELPE (2020)

Sobre a definição de resíduos sólidos, podemos afirmar, de acordo com o Art. 3º da Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS):

Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível. (Brasil, 2010)

Na cidade paranaense, onde foi realizado o estudo, está em vigor um Decreto municipal que veta a coleta de resíduos sólidos pela Prefeitura de grandes geradores, principalmente os empreendimentos comerciais, industriais ou de prestação de

serviços público e privado, que gerem resíduos classe II (NBR 10004/2004), da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, com volume superior a 100 (cem) litros ou 50 (cinquenta) kg diários, além de outros requisitos.

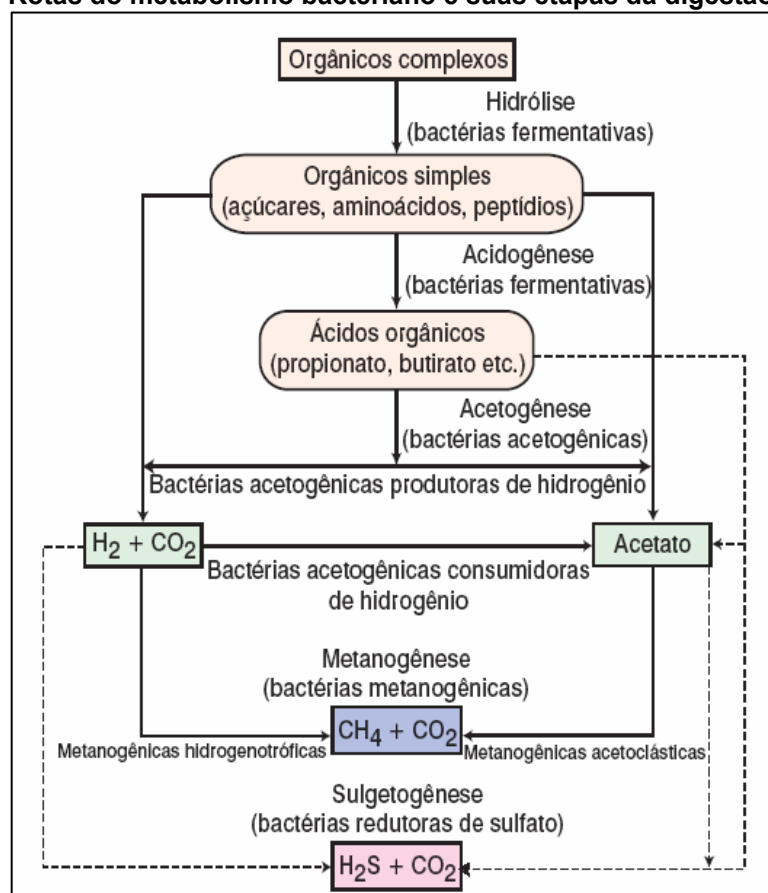
Com isso, os empreendimentos considerados como grandes geradores terão como responsabilidade a contratação de empresa privada para a destinação adequada dos resíduos sólidos gerados.

4.2 Digestão anaeróbia e biogás

A digestão anaeróbia é um processo relacionado com a atividade microbiológica que ocorre na ausência de oxigênio molecular, cuja populações bacterianas interagem para promover reações bioquímicas. Essa ação dos microrganismos decompõem a matéria orgânica, estabilizando-a por seus processos metabólicos, de fermentação e respiração. Desse processo de estabilização e degradação de compostos orgânicos complexos como: proteína, carboidrato e lipídio, resultam em produtos mais simples como: gases metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). O processo também libera pequenas quantidades de outros gases e gera uma pequena quantidade de lodo resultante de uma fração da matéria orgânica biodegradável, mas de difícil degradação (MOSEY, 1983).

Segundo Foresti *et al.* (2006), esse processo de digestão anaeróbia divide-se em quatro etapas principais, podendo ser cinco, dependendo do composto sólido orgânico presente no biodigestor, sendo elas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. A Figura 1 ilustra as rotas metabólicas e os grupos microbianos particulares envolvidos na digestão anaeróbia, incluindo a quinta fase sulfetogênese que pode ou não haver no processo de digestão anaeróbia, dependendo das características presentes no composto orgânico.

Figura 1 - Rotas do metabolismo bacteriano e suas etapas da digestão anaeróbia



Fonte: Adaptado de Lettinga *et al.* (1996)

Estas reações devem acontecer de forma sincronizada, afim de evitar de uma delas causar distúrbio em outra. O monitoramento de variáveis importantes para o controle do processo da digestão anaeróbia como, por exemplo, temperatura, pH, taxa de carregamento orgânico, nutrientes, produção e composição do teor de metano no biogás é imprescindível para assegurar a boa relação entre as etapas da digestão (RAJESHWARI *et al.*, 2000).

Na interação entre microrganismos e substratos, as etapas da digestão anaeróbia têm as seguintes definições de acordo com Foresti *et al.* (1999):

Hidrólise: Nesta etapa, a matéria orgânica sólida complexa insolúvel (polímeros) é convertida em materiais dissolvidos mais simples, como proteínas, lipídios e hidratos de carbonos, os quais podem atravessar as paredes celulares dos microrganismos fermentativos. Esta conversão de materiais particulados em materiais dissolvidos é conseguida através da ação de exoenzimas excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas, quimioheterotróficas não metanogênicas, facilitando a absorção pelas paredes celulares das bactérias acidogênicas.

Acidogênese: Nesta fase, líquida, os produtos solúveis oriundos da fase de hidrólise são metabolizados no interior das células das bactérias fermentativas acidogênicas, sendo convertidos em diversos compostos mais simples, os quais são então excretados pelas células. Entre estes compostos mais simples produzidos estão os 13 ácidos graxos voláteis, álcoois, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio, amônia e sulfeto de hidrogênio, além de novas células bacterianas. Como os ácidos graxos voláteis são os principais produtos dos organismos fermentativos, estes são usualmente designados de bactérias fermentativas acidogênicas. Estes produtos metabólicos serão a base do consumo das bactérias acetogênicas e arqueias metanogênicas.

Acetogênese: Nesta fase, líquida, do processo de digestão anaeróbia as bactérias acetogênicas são responsáveis pela oxidação dos produtos gerados na fase acidogênica, produzindo ácidos orgânicos pela ação das bactérias sintróficas acetogênicas. Os produtos gerados pelas bactérias acetogênicas como o hidrogênio, o dióxido de carbono e o acetato, serão o substrato básico apropriado para as bactérias metanogênicas, do grupo arqueia, na próxima fase, a metanogênica.

Metanogênese: Nesta etapa, gasosa, do processo de degradação anaeróbia de compostos orgânicos, atuam sobre os produtos gerados nas etapas anteriores principalmente dois grupos de bactérias metanogênicas: as arqueias metanogênicas e as arqueias metanogênicas acetoclásticas. Nesta fase as bactérias metanogênicas produzem metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) em função de sua afinidade por substrato e capacidade de produção de metano. As bactérias do grupo das arqueias metanogênicas acetoclásticas são responsáveis pela produção de aproximadamente 70% de metano do processo. Enquanto que a rota das bactérias arqueias metanogênicas hidrogenotróficas produz cerca de 30% do metano do processo, utilizando hidrogênio como fonte de energia, e gás carbônico (CO_2), como acceptor de elétrons, resultando maior liberação de energia e formando metano a partir dessa reação.

O biogás, resumidamente, é uma mistura de gases obtida a partir da conversão microbiológica anaeróbia de resíduos orgânicos (biomassas) biodegradáveis, que tem como seu constituinte principal o metano.

A composição do metano no biogás varia de acordo com a eficiência do processo de biodigestão, é possível encontrar percentuais entre 50% e 70% de

metano, 25% a 45% de dióxido de carbono e até 5% de outros gases (nitrogênio, oxigênio, gás sulfídrico, monóxido de carbono, e amoníaco) (PERLINGEIRO, 2014).

O biogás gerado durante o processo de metanização é captado e direcionado a um sistema de condicionamento, de forma a tornar o biogás apto para utilização energética. A aplicação efetiva do sistema depende diretamente da eficiência dos processos de limpeza do biogás, de forma a reduzir e/ou eliminar compostos indesejáveis ao sistema de recuperação energética. Entre as principais impurezas que demandam remoção estão o sulfeto de hidrogênio (H_2S), água (H_2O vapor), siloxanos e partículas sólidas (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2008).

4.3 Biodigestor

Os biodigestores são estruturas físicas construídas para que possibilitem as condições necessárias e controladas para a ocorrência da biodigestão anaeróbia. De acordo com Kunz *et al.* (2019), são caracterizados pelo: regime de alimentação podendo ser descontínuo (batelada) ou contínuo, forma de alimentação podendo ser ascendente ou laminar, concentração de sólidos no reator (sólida, semissólida ou úmida), sistema de agitação podendo ser mistura completa, parcial ou sem mistura, e sistemas de aquecimento.

A alimentação descontínua é mais simples comparado ao regime contínuo, feita em biodigestores batelada, em que durante a biodigestão não há entradas nem saídas. O processo descontínuo perde em eficiência na geração de biogás, chegando a ter produção de 20 a 30% menor se comparado ao processo contínuo, uma vez que há uma menor mistura do substrato e a necessidade da abertura do container após o ciclo da digestão (PROBIOGÁS, 2015).

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

Outro fato a ser analisado é a temperatura do biodigestor, que pode ser mesofílica, quando não há necessidade de se manter entre 20 e 40°C, ou termofílica quando há risco de patógenos, sendo necessário assim manter em temperaturas próximas a 65°C, exigindo um custo maior para operação ou um projeto que reutilize a energia térmica gerada com a queima do metano, como exemplo os biodigestores de lodo da ETE de Ribeirão Preto – SP da empresa GS INIMA BRASIL, onde se tem capacidade de tratamento de 127.000 m³/d e é possível gerar uma potência de 1,5 MW. Seu aproveitamento do biogás é 100% para cogeração (geração de energia elétrica e uso térmico para aquecimento do lodo) (PROBIOGÁS, 2017).

Entretanto, os resíduos alimentares, objeto deste estudo, são classificados, de acordo com o anexo H da NBR 10.004:2004 (ABNT, 2004), como não perigosos, podendo ser enquadrados na classe dos não inertes devido à sua biodegradabilidade (ABNT, 2004), portanto, não há necessidade de operar em altas temperaturas, como é o exemplo da CS Bioenergia, empresa que recebe resíduos sólidos orgânicos e lodo proveniente de tratamento de esgoto para a geração de energia elétrica. A usina tem capacidade para tratar diariamente 170 toneladas de resíduos orgânicos coletados na região de Curitiba, sendo misturado com 900 m³ de lodo gerado na ETE Belém da Sanepar. Um processo de separação e homogeneização dos resíduos condiciona o substrato para serem bombeados aos biodigestores. A biodigestão anaeróbia acontece em meio úmido no interior de dois reatores mesofílicos, que produzem 23.000 m³ de biogás por dia, com esse volume é capaz de gerar 2,8 MW de potência elétrica em dois moto-geradores. Essa usina também foi a primeira planta nessa configuração de codigestão no país demonstrando uma nova solução viável para o problema dos resíduos orgânicos gerados em centros urbanos (PROBIOGÁS, 2017).

Como resultado da digestão anaeróbia dos resíduos, além dos gases, se obtém o digestato. A composição desse subproduto, é dependente do substrato, da fonte de alimentação do biodigestor, de condições operacionais do sistema de digestão anaeróbia, e da configuração dos reatores (MONLAU *et al.*, 2015). Para uma maior avaliação do efluente final, Franco *et al.* (2017) monitoraram um sistema de metanização de resíduos alimentares composto por reator anaeróbio por um período de seis meses. A caracterização química após o período de monitoramento foi de sólidos totais de 3,3 g/L, sólidos voláteis de 1,7 g/L, pH de 7,4, DQO de 2145,2 mg/L, nitrogênio amoniacal total de 821,6 mg/L e fósforo total de 147 mg/L.

Muitas são as vantagens do possível uso do digestato, como utilização para biofertilizantes, bastante relevante para a agricultura devido a sua alta concentração de nitrogênio. De acordo com Monlau (2015), durante a digestão anaeróbia o nitrogênio total é parcialmente transformado em nitrogênio inorgânico, sendo na maior parte amônio (NH_4^+) e a amônia livre (NH_3).

Entretanto, alguns digestatos possuem alto teor de amônia, salinidade, DQO, fosfatos e coloração que podem causar riscos ao meio ambiente e aos organismos se expostos de forma inapropriada (TIGINI *et al.*, 2016). A avaliação destes compostos, juntamente com os nutrientes, após a digestão dos substratos, é extremamente necessária para um adequado manejo da aplicação do digestato como fertilizante.

5 MATERIAL E MÉTODOS

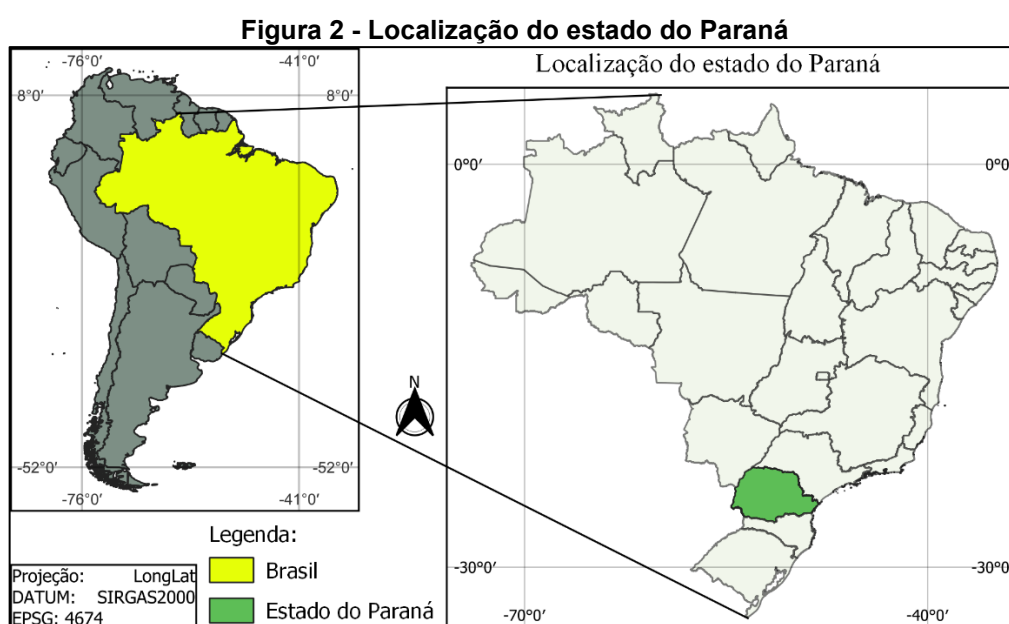
Afim de alcançar os objetivos propostos, foi realizado um monitoramento em todas as 14 unidades da rede de supermercados em uma cidade paranaense para obtenção de dados referentes aos tipos e quantidades de resíduos sólidos orgânicos gerados.

A partir da revisão bibliográfica acerca da produção de biogás a partir da digestão anaeróbia por tipo de resíduos sólidos orgânicos foi possível estimar a geração de biogás e o potencial energético, além de pré-dimensionar o volume do biodigestor para o processo de digestão anaeróbia.

Uma comparação em diferentes cenários foi feita, para analisar possíveis balanços financeiros em função do reaproveitamento dos resíduos sólidos orgânicos gerados pela rede de supermercados.

5.1 Caracterização da área de estudo

De acordo com a estimativa feita pelo IBGE (2021), o estado do Paraná, situado na região sul do Brasil, possui aproximadamente 11.597.484 habitantes. Sua divisão entre os 399 municípios resulta em uma densidade demográfica de 52,40 hab./m² (IBGE 2010).



Fonte: Autoria própria (2022)

A rede de supermercados possuía, na época da pesquisa, 14 lojas construídas em uma mesma cidade paranaense. São lojas de tamanhos variados, tendo assim um fluxo de mercadoria consideravelmente grande e conseqüentemente geram-se resíduos sólidos, na mesma proporção.

5.2 Dados quantitativos e qualitativos de resíduos sólidos das unidades da rede de supermercados

Para obter os dados quantitativos, foram feitas visitas *in loco* durante os meses de março a setembro de 2021 em todos os 14 supermercados semanalmente em todos os setores, e foram considerados três tipos de resíduos em relação a classificação: rejeito, orgânico ou reciclável. Os resíduos perigosos (classe I) conforme NBR 10004 (ABNT, 2004) ou resíduos que possuem normativas específicas relacionadas a logística reversa, por exemplo, não fizeram parte da pesquisa.

Os resíduos orgânicos, em especial, eram dispostos em bombonas plásticas de 200 litros, assim, a empresa terceirizada coletava as bombonas cheias e trocavam por vazias para serem utilizadas para os resíduos que ainda seriam gerados. O custo para o descarte era de R\$ 0,20 por kg coletado, gerando assim um custo mensal para o supermercado.

Já os resíduos recicláveis eram dispostos em uma prensa hidráulica para diminuir seu volume e armazenado para venda no final do mês e seu preço variava, sendo: plástico (R\$ 0,80/kg), papelão (R\$ 0,20/kg) e alumínio (R\$ 1,20/kg). Os rejeitos eram dispostos em container e novamente era contratada uma empresa para coleta e destinação, cujo custo era de R\$ 0,18 por kg.

5.3 Geração de biogás a partir dos resíduos sólidos orgânicos gerados nos supermercados

Os principais setores de supermercados que geram resíduos orgânicos são: rotisseria, padaria, confeitaria, frios, setor de FLV (frutas, verduras e legumes) e alimentos cujo prazo de validade foram expirados no depósito ou nas prateleiras.

Considerando os resíduos mais comuns gerados nos supermercados, foi feito um levantamento teórico dos potenciais de geração de biogás (m^3/kg de sólidos totais) de cada resíduo descartado (Tabela 2), com base em Deublein e Steinhauser (2008).

Tabela 2 - Substratos, e respectivos valores de sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV) e de rendimento de biogás estimado

<i>Substrato para produção de biogás</i>	<i>ST (%) SV do ST (%)</i>	<i>Rendimento do biogás (m³/kg de ST) Tempo de detenção (d)</i>
Cerveja	30 6,3	0,4 – 0,5 –
Resíduos vegetais	5-20 79-90	0,4 8 – 20
Verduras	12-42 90-97	0,4 – 0,8 –
Resíduos de mercado	8-20 75-90	0,4 – 0,6 30
Cereais	85-90 85-89	0,4 – 0,9 –
Sobras de comida (Rotisseria)	9-37 75-98	0,4 – 1,0 –
Pão seco	65-90 96-98	0,8 – 1,2 –
Resíduos de ovo	25 92	0,97 – 0,98 40

Fonte: Adaptado de Deublein e Steinhauser (2008, p. 57)

Com base no percentual de sólidos totais de cada tipo de resíduo orgânico (matéria orgânica) gerado nos supermercados, foi possível obter a quantidade de sólidos totais produzida por cada supermercado (Equação 1).

A soma dos valores apresentados por cada supermercado resulta na massa final de sólidos totais (ST). Em seguida, para estimar a produção volumétrica de biogás (V_{BM}) para esses sólidos totais basta multiplicar pelo valor de rendimento do biogás ($Rend_{biogás}$) por meio da Equação 2.

A soma dos valores apresentados por cada supermercado resultará no volume total de biogás produzido, a princípio se obtendo valores mensais. Para obter valores diários, basta dividir os resultados obtidos por 30 dias (Equação 3).

Quadro 1 - Equações para estimativa da geração de biogás

Equação	Legenda	Fonte
01	$ST = mo \cdot ST\%$ ST = Sólidos totais (t/mês) mo = Matéria orgânica (t/mês) ST% = Porcentagem de sólidos totais presente na matéria orgânica (%)	Adaptado de Deublein e Steinhauser (2008)

02	$V_{BM} = ST \cdot \text{Rend}_{\text{biogás}} \cdot 1000$	V_{BM} = Volume do Biogás (m ³ /mês) ST = Sólidos totais (t/mês) $\text{Rend}_{\text{biogás}}$ = Rendimento geral do biogás (m ³ /kg de ST) 1000 = Conversão de t para kg	Adaptado de Deublein e Steinhauser (2008)
03	$V_{BD} = \frac{V_{BM}}{30}$	V_{BD} = Volume do biogás diário (m ³ /dia) V_{BM} = Volume do biogás mensal (m ³ /mês)	Autoria Própria

Fonte: Autoria própria (2022)

5.4 Pré-dimensionamento do biodigestor e estimativa do potencial energético dos resíduos sólidos da rede de supermercados

O potencial de geração de biogás foi obtido com base na média dos resíduos sólidos gerados nos supermercados durante o período de 7 meses de monitoramento. A média do potencial de geração de biogás obtida foi multiplicada pela quantidade de resíduos orgânicos gerados pela rede de supermercados para estimar a vazão mensal de biogás.

Considerando que todo mês seja gerado, em média, a mesma quantidade de resíduos sólidos orgânicos, e considerando parâmetros como pH e temperatura adequados para a biodigestão anaeróbia, foi calculado o potencial energético a partir da média de biogás produzido.

A carga diária em sólidos totais adicionados ao biodigestor foi obtida por meio a Equação 4. Para calcular a vazão volumétrica de alimentação do biodigestor com resíduos orgânicos, foi utilizada a Equação 5, sendo que a massa específica adotada foi de 1213 kg/m³ sugerido por Luz (2019).

Para dimensionar o volume do biodigestor necessário, foi utilizada a equação do tempo de retenção hidráulica (TRH) (Eq. 6), considerando a condição que os resíduos fiquem em reação por 30 dias. Para obter o valor da produção específica do biogás foi utilizada a Equação 7. E por meio da Equação 8 foi calculado o rendimento de biogás ($R_{\text{biogás}}$) sobre os sólidos totais adicionados (ST_{ad}).

Para estimar a produção diária de metano foi utilizada a Equação 9. Foi adotada uma média de 60% de metano no biogás (η_{CH_4}), considerando a média da

pesquisa de Perlingeiro (2014). A vazão anual de metano (Q_{CH_4}) foi calculada multiplicando-se a produção diária de metano (PD_{CH_4}) por 365 dias, conforme Equação 10. Por meio da Equação 11, foi estimado o rendimento de metano sobre os sólidos totais adicionado ao reator.

Para estimar a possível potência elétrica gerada, foi utilizado o método sugerido pelo Manual para Aproveitamento do Biogás (ICLEI, 2009), conforme Equação 12. Para expressar a potência anual em kW, basta multiplicar o P pelo fator de conversão 1000, conforme apresentado pela Equação 13. E para o cálculo da estimativa de energia elétrica gerada foi utilizada a metodologia do IPCC (1996), conforme Equação 14.

Quadro 2 - Equações para o pré-dimensionamento do biodigestor, estimativa do potencial energético dos resíduos e comparação dos cenários

Equação	Legenda	Fonte	
04	$C_{ST} = C_{mo} \cdot ST_{ad}$	C_{ST} = Carga diária adicionada ao biodigestor, em sólidos totais (kg/d); C_{mo} = Carga diária adicionada ao biodigestor, em matéria orgânica (kg/d); ST_{ad} = Sólidos totais adicionados ao biodigestor (%).	Adaptado de Deublein e Steinhauser (2008)
05	$Q = \frac{C_{ST}}{\rho_{res}}$	Q = Vazão volumétrica dos sólidos (m^3/d); C_{ST} = Carga diária adicionada ao reator, em sólidos totais (kg/d); ρ_{res} = Massa específica dos resíduos orgânicos ($1213 \text{ kg}/m^3$)	Adaptado de Deublein e Steinhauser (2008)
06	$V = TRH \cdot Q$	V = Volume do biodigestor (m^3); TRH = Tempo de residência hidráulica (d); Q = Vazão (m^3/d).	KUNZ <i>et al.</i> , 2019
07	$PE_{biogás} = \frac{PD_{biogás}}{V}$	$PE_{biogás}$ = Produção específica de biogás [m^3 de reator/ $(m^3 \cdot d)$]; $PD_{biogás}$ = Produção diária de biogás (m^3 de reator/d), com base na média do potencial de geração dos resíduos conforme Tabela 2; V = Volume do biodigestor (m^3)	Adaptado de Deublein e Steinhauser (2008)
08	$R_{biogás} = \frac{PD_{biogás}}{ST_{ad}}$	$R_{biogás}$ = Rendimento diário de biogás sobre sólidos totais adicionados [m^3 de biogás/kg de ST];	Adaptado de Deublein e Steinhauser (2008)

		<p>$PD_{\text{biogás}}$ = Produção diária de biogás (m^3/d), com base na média do potencial de geração dos resíduos conforme Tabela 2;</p> <p>ST_{ad} = Sólidos totais adicionados ao biodigestor (kg/d).</p>	
09	$PD_{CH_4} = PD_{\text{biogás}} \cdot \eta_{CH_4}$	<p>PD_{CH_4} = Produção diária de metano (m^3/d),</p> <p>$PD_{\text{biogás}}$ = Produção diária de biogás (m^3/d),</p> <p>η_{CH_4} = Percentual de metano no biogás (%).</p>	Adaptado de Deublein e Steinhauser (2008)
10	$Q_{CH_4} = PD_{CH_4} \cdot 365$	<p>Q_{CH_4} = Vazão anual do metano (m^3/ano)</p> <p>PD_{CH_4} = Produção diária de metano (m^3/d)</p> <p>365 = número de dias que um ano possui</p>	Autoria própria
11	$\eta_{CH_4ST} = \frac{PD_{CH_4}}{ST_{\text{ad}}}$	<p>η_{CH_4ST} = Rendimento de metano sobre os sólidos totais adicionados (m^3 de CH_4/kg de ST_{ad})</p> <p>PD_{CH_4} = Produção diária de metano (m^3/d)</p> <p>ST_{ad} = Sólidos totais adicionados ao biodigestor (kg/d).</p>	Adaptado de Deublein e Steinhauser (2008)
12	$P = \frac{Q_{CH_4} \cdot PC \cdot \eta_m \cdot 0,004184}{t}$	<p>P = Potência disponível por ano (MW/ano).</p> <p>Q_{CH_4} = Vazão do CH_4 por ano (m^3/ano).</p> <p>PC = Poder calorífico do CH_4, sendo $5.500 \text{ kcal}/\text{m}^3$ de CH_4</p> <p>η_m = Eficiência de motores (28% = 0,28)</p> <p>0,004184 = Conversão de kcal para MJ</p> <p>t = Segundos em um ano, sendo 31536000 s.</p>	Manual para Aproveitamento do Biogás (ICLEI, 2009)
13	$P \left(\frac{\text{kW}}{\text{ano}} \right) = P \left(\frac{\text{MW}}{\text{ano}} \right) \cdot 1000$	<p>$P \left(\frac{\text{kW}}{\text{ano}} \right)$ = Potencia em kW</p> <p>$P \left(\frac{\text{MW}}{\text{ano}} \right)$ = Potencia em MW</p> <p>1000 = Fator de conversão</p>	Autoria própria
14	$E = P \cdot \text{Rend} \cdot t$	<p>E = Energia disponível por ano (kWh/ano).</p> <p>P = Potência disponível por ano (kW/ano).</p>	IPCC (1996)

		<p>Rend = Rendimento de motores operando a plena carga (estimado em 87% = 0,87).</p> <p>t = Tempo de operação durante um ano (h).</p>	
--	--	---	--

Fonte: Autoria própria (2022)

5.5 Estimativa do balanço econômico com a energia gerada e comparação entre diferentes cenários

A tarifa elétrica dos cidadãos paranaenses ficou em torno de R\$ 0,56 por kWh consumido (GAZETA, 2022). Para fazer uma estimativa do retorno financeiro que a produção de biogás daria aos supermercados, foi utilizada a Equação 15 de acordo com a tarifa vigente.

Após as estimativas de produção de energia, foram comparados três cenários que consideraram diferentes situações.

O Cenário A é representado como situação atual, onde se tem o custo para contratação de uma empresa terceira para coleta e destinação dos resíduos orgânicos e rejeitos. Os recicláveis são prensados e vendidos para abater uma porcentagem dos custos mensais.

O Cenário B é representado como possível situação onde não se tem o custo para coleta e destinação dos resíduos orgânicos (apenas com o rejeito), possível situação onde se “doaria” os resíduos orgânicos para um terceiro realizar o processo de digestão anaeróbia e geração de energia elétrica ou ainda outra destinação adequada que não resultaria em custos para a rede de supermercados.

Já o Cenário C, refere-se a situação em que a própria rede de supermercados produziria e utilizaria a energia elétrica gerada para abater no consumo de energia elétrica fornecido pela rede pública de geração e distribuição, obtendo assim uma economia com a redução de custos relacionados aos resíduos orgânicos gerados nos supermercados juntamente com a utilização da energia.

Assim, a receita mensal com a eletricidade somaria-se ao faturamento do “Cenário B” (Equação 16), onde além de não ter custo para destinar os resíduos orgânicos, teria uma economia financeira referente a energia gerada.

Quadro 3 – Equações de possível economia com a geração da energia e cálculo do cenário C

15	$R_{R\$} = E . 0,56$	<p>$R_{R\\$}$ = Receita obtida da energia gerada (R\$)</p> <p>E = Energia elétrica produzida por ano (kWh/ano)</p> <p>0,56 = valor da tarifa vigente em 2021 por kWh</p>	Autoria própria
16	$RecC = RecB + \frac{Rec_{energia}}{12}$	<p>RecC = Receita obtida no cenário C (R\$)</p> <p>RecB = Receita obtida no cenário B (R\$)</p> <p>Rec_{Energia} = Receita anual obtida da energia gerada (R\$)</p>	Autoria própria

Fonte: Autoria própria (2022)

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Dados quantitativos e qualitativos relacionados aos resíduos sólidos gerados na rede de supermercados

Os dados quantitativos e financeiros relacionados aos resíduos gerados nos supermercados após visitas *in loco* durante os meses de março a outubro de 2021, estão apresentados na Tabela 3. Os rejeitos e os resíduos orgânicos foram avaliados como custo (valor negativo), pois eram coletados, transportados e destinados por uma empresa terceirizada licenciada mediante pagamento, em função dos supermercados se enquadrarem na categoria de "grandes geradores" e, segundo o Decreto municipal vigente na cidade, fica vedada à coleta pública nestes estabelecimentos. Já os recicláveis foram avaliados como receita (valor positivo), pois eram vendidos para empresas de reciclagem.

Tabela 3 - Média mensal da quantidade e do balanço financeiro referente aos resíduos sólidos gerados nos 14 supermercados

Supermercado	Rejeitos		Orgânicos		Recicláveis	
	t/mês	R\$	t/mês	R\$	t/mês	R\$
1	3,10	-744,96	10,43	-2052,54	11,65	2202,88
2	2,09	-500,88	5,15	-1198,00	12,69	2702,43
3	5,80	-1393,58	11,10	-2450,73	6,96	1836,60
4	7,76	-1596,96	14,70	-3106,67	13,37	3808,60
5	3,43	-823,44	14,03	-1775,77	6,47	1771,33
6	1,57	-376,63	7,24	-702,28	1,88	541,68
7	3,15	-751,50	11,64	-1372,33	2,88	745,39
8	4,65	-1028,46	12,42	-1775,49	8,54	2007,54
9	3,97	-886,08	10,11	-1192,01	6,29	1842,24
10	5,75	-1182,93	9,90	-1514,38	6,35	1764,21
11	2,11	-515,76	5,80	-1269,68	4,12	1093,64
12	5,47	-1312,56	8,60	-1048,89	5,26	1241,92
13	3,85	-843,92	10,52	-2093,67	5,21	1427,06
14	1,99	-419,76	10,15	-1649,16	6,72	1982,84
TOTAL	54,69 (19%)	-12377,42	141,79 (48%)	-23201,60	98,39 (33%)	24968,36

Fonte: Autoria própria (2022). (-): percentual do resíduo no total gerado

Na Tabela 3 é apresentada a soma dos valores apresentados para as 14 lojas da rede de supermercados juntamente com a sua porcentagem perante o total de

resíduos monitorados no período do estudo. Desta maneira, observa-se que os resíduos sólidos orgânicos representaram 48% do total de resíduos gerados, totalizando 141,79 toneladas e gerou um custo aproximado de R\$ 23200,00.

Na Tabela 4 é apresentado um balanço financeiro de cada supermercado e a soma das 14 lojas em dois cenários diferentes: Cenário A representando a situação monitorada e Cenário B considerando o possível aproveitamento dos resíduos orgânicos por meio do tratamento por biodigestão anaeróbia, ou seja, no Cenário B não haveria o custo atualmente relacionado com coleta, transporte e destinação final. Esse balanço foi feito somando os totais obtidos para cada um dos três tipos de resíduos, no caso do Cenário A, ou apenas para os rejeitos e recicláveis, no caso do Cenário B.

Tabela 4 - Balanço econômico dos 14 supermercados em relação aos seus resíduos

Supermercado	Cenário A Total		Cenário B Total	
	t/mês	R\$	t/mês	R\$
1	25,18	-594,62	14,75	1457,92
2	19,93	1003,55	14,78	2201,55
3	23,86	-2007,71	12,76	443,02
4	35,83	-895,03	21,13	2211,64
5	23,93	-827,88	9,90	947,89
6	10,69	-537,23	3,45	165,05
7	17,67	-1378,44	6,03	-6,11
8	25,61	-796,41	13,19	979,08
9	20,37	-235,85	10,26	956,16
10	22,00	-933,10	12,10	581,28
11	12,03	-691,80	6,23	577,88
12	19,33	-1119,53	10,73	-70,64
13	19,58	-1510,53	9,06	583,14
14	18,86	-86,08	8,71	1563,08
TOTAL	294,87	-10610,66	153,08	12590,94

Fonte: Autoria própria (2022)

No caso do Cenário A, os resultados demonstraram que apenas o supermercado 2 não obteve prejuízo financeiro com a destinação dos resíduos no período avaliado. Entretanto, caso tivesse sido dada outra destinação aos resíduos orgânicos (Cenário B), por exemplo, com o aproveitamento energético por meio da geração de biogás, eliminava-se parte do custo e o balanço mudaria

consideravelmente, ou seja a receita aumentaria 119%. Porém, mesmo destinando todos os resíduos orgânicos para um biodigestor, dois supermercados (nº 7 e nº 12) ainda continuariam apresentando prejuízos financeiros. Cabe destacar que no balanço geral, o tratamento dos resíduos orgânicos realizados pela própria rede de supermercados poderia ser financeiramente satisfatório, pois o custo de R\$ 10610,66 poderia ser revertido em uma receita de R\$ 12590,94. Haja vista, que não foi objeto de estudo desta pesquisa um estudo de viabilidade técnica e econômica, quanto aos custos de investimento, manutenção e demais custos envolvidos no licenciamento, na instalação e operação de um biodigestor.

Provavelmente, caso os resíduos orgânicos fossem direcionados para a produção de biogás e posteriormente geração de eletricidade, os recursos financeiros obtidos com o sistema tornariam o balanço de todos os empreendimentos positivos, ou seja, resultaria em uma prática sustentável, que poderia ser explorada comercialmente no marketing como prática de *Environmental, social, and corporate governance* (ESG) e Economia Circular, que poderia receber investimentos ou financiamentos públicos ou privados de incentivos, gerar créditos de carbono que poderiam ser comercializados, além de contribuir com a redução da emissão de gases de Efeito Estufa (GEE) e possível aproveitamento do biofertilizante (digestato).

6.2 Geração de biogás a partir dos resíduos sólidos orgânicos gerados nos supermercados

Dos três tipos de resíduos segregados (rejeitos, orgânicos e recicláveis), apenas os orgânicos foram considerados com potencial para serem empregados na geração do biogás. Os dados apresentados na Tabela 5 demonstram os percentuais de sólidos totais (ST) ou matéria seca (ms), em relação a cada quilograma (kg) de resíduos orgânicos, além do rendimento do biogás (m³/kg de massa seca) em função dos tipos específicos de resíduos orgânicos.

Para essa pesquisa, foram considerados valores médios referentes a todos os resíduos orgânicos encontrados nas 14 lojas durante o monitoramento. Para tanto, primeiro, obteve-se as médias aritméticas simples de cada faixa, ou o único valor apresentado (Tabela 5).

Tabela 5 - Substratos e seus respectivos valores de sólidos totais, sólidos voláteis e seu rendimento de biogás estimado

<i>Substrato para produção de biogás</i>	<i>ST (%)</i>	<i>Rendimento do biogás (m³/kg de ST)</i>
Cerveja	30	0,4 - 0,5 (0,45)
Resíduos vegetais	5-20 (12,5)	0,4
Verduras	12-42 (27)	0,4 - 0,8 (0,6)
Resíduos de supermercado	8-20 (14)	0,4 - 0,6 (0,5)
Cereais	85-90 (87,5)	0,4 - 0,9 (0,65)
Sobras de comida (Rotisseria)	9-37 (23)	0,4 - 1,0 (0,7)
Pão seco	65-90 (77,5)	0,8 - 1,2 (1,0)
Resíduos de ovo	25	0,97 - 0,98 (0,975)
Geral	37,1%	0,659

Fonte: Adaptado de DEUBLEIN e STEINHAUSER (2008, p. 57). Os valores em negrito são os representativos

Em seguida, calculou-se a média de todos os valores representativos, obtendo-se percentuais para Sólidos Totais (ST) e para o "Rendimento do Biogás". Na Tabela 6 são apresentados os dados estimados de geração mensal de ST e de biogás para cada loja da rede de supermercados.

Tabela 6 - Geração mensal de sólidos totais (ST) e estimativa de produção volumétrica de biogás de cada supermercado

Supermercado	Total					
	t/mês	kg/mês	ST/mês (kg/mês)	ST/d ou C_{ST} (kg/d)	Volume de biogás (m ³ /mês)	Volume de biogás (m ³ /d)
1	25,18	10430	3869,53	128,98	2550,02	85,00
2	19,93	5150	1910,65	63,69	1259,12	41,97
3	23,86	11100	4118,10	137,27	2713,83	90,46
4	35,83	14700	5453,70	181,79	3593,99	119,80
5	23,93	14030	5205,13	173,50	3430,18	114,34
6	10,69	7240	2686,04	89,53	1770,10	59,00
7	17,67	11640	4318,44	143,95	2845,85	94,86
8	25,61	12420	4607,82	153,59	3036,55	101,22

9	20,37	10110	3750,81	125,03	2471,78	82,39
10	22,00	9900	3672,90	122,43	2420,44	80,68
11	12,03	5800	2151,80	71,73	1418,04	47,27
12	19,33	8600	3190,60	106,35	2102,61	70,09
13	19,58	10520	3902,92	130,10	2572,02	85,73
14	18,86	10150	3765,65	125,52	2481,56	82,72
TOTAL	294,87	141790	52604,09	1753,47	34666,10	1155,54

Fonte: Autoria própria (2022)

6.3 Pré-dimensionamento do biodigestor e estimativa do potencial energético dos resíduos sólidos da rede de supermercados

Com base nos dados apresentados na Tabela 6 calculou-se os parâmetros de projeto do biodigestor. Para ilustrar, os cálculos foram independentes para cada supermercado e depois somado para um único biodigestor que englobaria todos os resíduos orgânicos dos 14 supermercados.

Na Tabela 7 são apresentados dados de potência e a energia elétrica gerada pela queima do biogás em 1 ano de funcionamento do biodigestor.

Tabela 7 - Parâmetros de projeto de biodigestores

Supermercado	ST/d ou C_{ST} (kg/d)	Volume de biogás		Rendimento de biogás $R_{biogás}$ (m^3 /kg de ST)	Produção diária de metano		Rendimento diário de metano ou η_{CH_4ST} (m^3 de CH_4 /kg de ST_{ad})	Estimativa da potência ou P (kW/ano)	Estimativa da energia elétrica ou (MWh/ano)
		V (m^3)	$PD_{biogás}$ (m^3 /d)		ou PD_{CH_4} (m^3 /d)				
1	128,98	85,00	3,19	0,659	51,00	0,395	3,80	28,99	
2	63,69	41,97	1,58	0,659	25,18	0,395	1,88	14,31	
3	137,27	90,46	3,39	0,659	54,28	0,395	4,05	30,85	
4	181,79	119,80	4,50	0,659	71,88	0,395	5,36	40,85	
5	173,50	114,34	4,29	0,659	68,60	0,395	5,12	38,99	
6	89,53	59,00	2,21	0,659	35,40	0,395	2,64	20,12	
7	143,95	94,86	3,56	0,659	56,92	0,395	4,24	32,25	
8	153,59	101,22	3,80	0,659	60,73	0,395	4,53	34,52	
9	125,03	82,39	3,09	0,659	49,44	0,395	3,69	28,10	
10	122,43	80,68	3,03	0,659	48,41	0,395	3,61	27,51	
11	71,73	47,27	1,77	0,659	28,36	0,395	2,12	16,12	

12	106,35	70,09	2,63	0,659	42,05	0,395	3,14	23,90
13	130,10	85,73	3,22	0,659	51,44	0,395	3,84	29,24
14	125,52	82,72	3,10	0,659	49,63	0,395	3,70	28,21
Total	1753,47	1155,54	43,37	0,659	693,32	0,395	51,71	394,06

Fonte: Aatoria própria (2022)

Fazendo uma estimativa do retorno financeiro que a produção de biogás daria aos supermercados, espera-se que todos deixem de gerar prejuízo com o aproveitamento da energia produzida de acordo com a tarifa vigente.

Assim, foi possível estimar a economia com o não consumo da eletricidade fornecida pela rede pública de geração e distribuição, considerando o consumo da eletricidade gerada pelo biogás, apresentada na Tabela 8.

Tabela 8 - Estimativa de economia obtida com a eletricidade (E) gerada pelo biogás

Supermercado	E (MWh)	Economia anual (R\$)
1	28,99	16.232,43
2	14,31	8.015,06
3	30,85	17.275,17
4	40,85	22.877,93
5	38,99	21.835,19
6	20,12	11.267,77
7	32,25	18.115,58
8	34,52	19.329,51
9	28,10	15.734,41
10	27,51	15.407,58
11	16,12	9.026,67
12	23,90	13.384,37
13	29,24	16.372,50
14	28,21	15.796,66
Total	394,06	220.670,85

Fonte: Aatoria própria (2022)

Para comparação, a energia de 394,06 MWh se convertida para consumo mensal, resultaria em 32.838,33kWh, o equivalente para suprir a necessidade de aproximadamente 207 residencias no Brasil, cujo consumo médio mensal é de 158 kWh (EPE, 2018).

Na Tabela 9, apresenta-se o balanço econômico de um novo cenário, o “Cenário C”, que considera que todo o resíduo orgânico fosse destinado para geração e utilização da eletricidade e o compara com os Cenários A e B, já apresentados.

Tabela 9 - Balanço econômico dos três cenários analisados para os supermercados

Supermercado	Cenário A Total		Cenário B Total		Cenário C Total	
	t/mês	R\$	t/mês	R\$	t/mês	R\$
1	25,18	-594,62	14,75	1457,92	14,75	2810,62
2	19,93	1003,55	14,78	2201,55	14,78	2869,47
3	23,86	-2007,71	12,76	443,02	12,76	1882,62
4	35,83	-895,03	21,13	2211,64	21,13	4118,13
5	23,93	-827,88	9,90	947,89	9,90	2767,49
6	10,69	-537,23	3,45	165,05	3,45	1104,03
7	17,67	-1378,44	6,03	-6,11	6,03	1503,52
8	25,61	-796,41	13,19	979,08	13,19	2589,87
9	20,37	-235,85	10,26	956,16	10,26	2267,36
10	22,00	-933,10	12,10	581,28	12,10	1865,25
11	12,03	-691,80	6,23	577,88	6,23	1330,10
12	19,33	-1119,53	10,73	-70,64	10,73	1044,72
13	19,58	-1510,53	9,06	583,14	9,06	1947,52
14	18,86	-86,08	8,71	1563,08	8,71	2879,47
TOTAL:	294,87	-10610,66	153,08	12590,94	153,08	30980,18

Fonte: Autoria própria (2022)

Conforme apresentado, o Cenário C, relacionado ao reaproveitamento dos resíduos orgânicos para geração de eletricidade, apresentou uma liquidez financeira consideravelmente maior comparado aos outros cenários. Entretanto, cabe enfatizar que nos cálculos não estão contabilizados o investimento em se adquirir um biodigestor associado a um gerador de eletricidade e os custos mensais de operação.

Como exemplo, há fazendas e empreendimentos urbanos que apresentaram viabilidade financeira com a geração de eletricidade a partir dos resíduos, como é o caso da cidade de Ponta Grossa – PR, cuja prefeitura construiu uma usina termelétrica a biogás alimentada com resíduos orgânicos que antes eram destinados ao aterro sanitário, capaz de gerar uma potência de 520 kW (CORREIO DOS CAMPOS, 2021), afim de suprir a necessidade energética de 2 hospitais e o prédio sede de administração pública presentes no município.

7 CONCLUSÕES

Sabe-se que a geração de resíduos é um fato ainda inevitável que acontece no dia-a-dia de qualquer pessoa ou empreendimento. Por isso, é possível compreender que o devido tratamento de resíduos é oneroso – e necessário, podendo subtrair recursos dos geradores, caso os mesmos não sejam contemplados com a coleta pública, como é o caso dos supermercados nesta cidade paranaense.

Pensando nisso, esse trabalho fez uma estimativa do potencial energético do biogás oriundo de resíduos sólidos orgânicos produzidos por 14 supermercados de uma cidade paranaense. Após o monitoramento *in loco* em todos os setores, durante 7 meses, foi constatado uma média de geração total de 141,79 t/mês somente de resíduos sólidos orgânicos (RSO), o suficiente para gerar um volume de 34.666,10 m³/mês de biogás e 20.799,60 m³/mês de metano.

Este mesmo volume de gás seria capaz de gerar 394,06 MWh/ano, que resultaria em uma receita de R\$ 220.670,85 para a rede de supermercados, fazendo com que as lojas que se encontram no prejuízo, relacionado ao custo para destinar os RSO, de acordo com o Cenário A, ficassem com um valor de R\$30980,18 de lucro total mensal, como apresentado no Cenário C, onde se geraria e comercializasse ou consumisse a energia gerada.

Tal energia gerada se convertida para consumo mensal, se obteria um valor de 32.838,33kWh, o equivalente para suprir a necessidade de aproximadamente 207 residências no Brasil, cujo consumo médio mensal é de 158 kWh (EPE, 2018).

Com base nos resultados, concluiu-se que a destinação dos resíduos orgânicos gerados pelos mercados de uma cidade paranaense para produção energética pelo método de digestão anaeróbia tende a ser uma opção vantajosa frente ao atual cenário econômico e sustentável que o mesmo se encontra.

Por fim, recomenda-se um estudo de viabilidade econômica englobando custos de projeto, construção e manutenção do reator para funcionamento adequado de geração de energia, juntamente com o custo de transporte de resíduos do empreendimento até a usina.

REFERÊNCIA

- ALBERTONI, T. A. **Caracterização física dos resíduos sólidos gerados em restaurante universitário**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)- Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2013. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/11953>. Acesso em: 21 jan. 2022.
- ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Brasília: Aneel, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020**. São Paulo: ABRELPE, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2021**. São Paulo: ABRELPE, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT. **NBR 10004: resíduos sólidos – classificação**. 2ª ed. Rio de Janeiro, 2004.
- BRASIL. **Lei nº 12305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. [S. l.], 2 ago. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 05 out. 2021
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Emissões de metano no tratamento e na disposição de resíduos**. Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa. São Paulo, 2006.
- CORREIO DOS CAMPOS (PR). **Usina Termoelétrica a Biogás (UTB), que transformará resíduos orgânicos em energia elétrica, é inaugurada em Ponta Grossa**, 2021. Disponível em: <https://correiodoscamos.com.br/ponta-grossa/2021/04/30/usina-termoeletrica-a-biogas-utb-que-transformara-residuos-organicos-em-energia-eletrica-e-inaugurada-em-ponta-grossa>. Acesso em: 26 maio 2022.
- DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A.. Part II Substrate and biogas. *In: BIOGAS from Waste and Renewable Resources: An Introduction*. [S. l.: s. n.], 2008. cap. 2 Substrates, p. 57-77.
- DOMINGUES, E. G.; SILVA, L. R. **Avaliação do Potencial de Geração de Metano, Energia Elétrica e Créditos de Carbono a partir do Aproveitamento Energético do Biogás Produzido no Aterro Sanitário de Goiânia**. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA*, 17., 2008, Juiz de Fora. **Anais...** João Pessoa: UFPB, 2008.
- EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2027**. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2018

FAZOLO, D. **Produção de Biogás a Partir da Fermentação de Excedente de Merenda Escolar para Substituição do Gás Liquefeito do Petróleo: uma Projeção.** 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)- Faculdade de Tecnologia de Araçatuba, Araçatuba, 2011. Disponível em: https://www.academia.edu/27628695/Produ%C3%A7%C3%A3o_de_Biog%C3%A1s_a_Partir_da_Fermenta%C3%A7%C3%A3o_de_Excedente_de_Merende_Escolar_para_Substitui%C3%A7%C3%A3o_do_G%C3%A1s_Liquefeito_do_Petr%C3%B3leo_uma_Proje%C3%A7%C3%A3o. Acesso em: 11 fev. 2022.

FORESTI, E., ZAIAT, M., VALLERO, M. Anaerobic processes as the core technology for sustainable domestic wastewater treatment: Consolidated applications, new trends, perspectives, and challenges. **Reviews in: Environ. Sci. and Bio/Technol.**, v.5: p. 3-19, 2006. DOI: 10.1007/s11157-005-4630-9. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/225245842_Anaerobic_Processes_as_the_Core_Technology_for_Sustainable_Domestic_Wastewater_Treatment_Consolidated_Applications_New_TrendsPerspectives_and_Challenges. Acesso em: 10 dez. 2021.

FORESTI, E.; FLORÊNCIO, L.; VAN HAANDEL, A.; ZAIAT, M.; CAVALCANTI, P. F. F. Fundamentos do Tratamento Anaeróbio. *In*: CAMPOS, J. R. (Coord.). **Tratamento de Esgotos Sanitários por Processo Anaeróbio e Disposição Controlada no Solo.** Rio de Janeiro: ABES, p. 29-52, 1999.

FRANCO, A. F. T.; MELGAÇO, L. A. O.; FILHO, C. R. M.; CHERNICARO, C. A. L. **Alternativas para o aproveitamento e disposição final do efluente de um sistema de metanização de resíduos alimentares.** Congresso ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. FENASAN, 2017.

GAZETA. **Conta de luz subiu 9,8% no Paraná em 2021, segundo ANEEL.** Gazeta de Toledo. Disponível em: [https://gazetadetoledo.com.br/conta-de-luz-subiu-98-no-parana-em-2021-segundo-aneel/#:~:text=A%20conta%20de%20luz%20ficou,kWh\)%20consumido%20de%20energia%20el%C3%A9trica](https://gazetadetoledo.com.br/conta-de-luz-subiu-98-no-parana-em-2021-segundo-aneel/#:~:text=A%20conta%20de%20luz%20ficou,kWh)%20consumido%20de%20energia%20el%C3%A9trica). Acesso em 27 de abr. 2022.

GENOVESE, A. L., UDAETA, M. E. M., GALVAO, L. C. R. Aspectos energéticos da biomassa como recurso no Brasil e no mundo. *In*: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL. **Anais [...].** Campinas, 2006. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022006000100021&script=sci_arttext#:~:text=Aproximadamente%2011%25%20da%20energia%20produzida,parte%20em%20forma%20n%C3%A3o%20comercial. Acesso em: 05 mar. 2022.

GOSWAMI, R.; CHATTOPADHYAY, A.; SHOME, S. N.; BANERJEE, A. K.; CHAKRABORTY, A. K.; MATHEW, S. C. **An overview of physico-chemical mechanisms of biogas production by microbial communities: a step towards sustainable waste management,** *Biotech.* 2016 Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13205-016-0395-9>. Acesso em: 26 mai. 2022

HENDGES, A. **Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil,** artigo de Antonio Silvio Hendges. *EcoDebate*, [S. l.], p. 1, 14 jul. 2021.

IBGE – (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). **Panorama de Maringá - Paraná**. Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pr/maringa.html>. Acesso em: 02 dez. 2021.

ICLEI. **Manual para aproveitamento do biogás: volume um, aterros sanitários**. Vol. 1, 1 ed. São Paulo: ICLEI - Governos Locais pela Sustentabilidade, Secretariado para América Latina e Caribe, Escritórios de projetos no Brasil, 2009. Disponível em: http://www.resol.com.br/cartilha12/manual_iclei_brazil.pdf. Acesso em: 22 abr. 2022.

IRENA – (International Renewable Energy Agency). **Global Renewables Outlook: Energy Transformation 2050**. Edition 2020. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Apr/IRENA_Global_Renewables_Outlook_2020.pdf. Acesso em: 02 fev. 2022.

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

LETTINGA, G., HULSHOF POL, L. W., ZEEMAN, G. **Biological Wastewater Treatment**. Parte I: Anaerobic wastewater treatment. Lecture Notes. Wageningen Agricultural University, ed. January, 1996.

LIMA, P. P. et al., (2002). **O Dicionário Brasileiro de Ciências Ambientais**. Thex, 2002.

LUZ, G. **Densidade de Resíduos Sólidos**. Gelson Luz Blog Materiais. 2019. Disponível em: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2019/04/densidade-de-residuos-solidos.html>. Acesso em 27 de abr. 2022.

MATA-ALVAREZ, J.; MACE, S.; LLABRÉS, P. **Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives**. Bioresource Technology, v. 74, p. 3-16, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00023-7](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00023-7). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852400000237>. Acesso em: 02 fev. 2022.

MENDES, F. C. M.. **Sustentabilidade no varejo: as práticas ambientais e suas implicações na consolidação da marca institucional**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MONLAU, F.; SAMBUSITI, C.; FICARA, E.; ABOULKAS, A.; BARAKAT, A.; CARRÈRE, H. **New opportunities for agricultural digestate valorization: Current situation and perspectives**. Energy and Environmental Science, v. 8, n. 9, p. 2600–2621, 2015.

NAZARO, M. **Desenvolvimento de um biodigestor residencial para processamento de resíduos sólidos orgânicos**. Trabalho de conclusão de curso, [s. l.], 14 jul. 2016. Disponível em: [https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/166781/TCC%20-](https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/166781/TCC%20)

%20Mariane%20Scheffer%20Nazaro.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 23 nov. 2021.

PERLINGEIRO, C. A. G. **Biocombustíveis no Brasil**: fundamentos, aplicações e perspectivas. Rio de Janeiro: Synergia, 2014.

PROBIOGÁS. **Exemplos de usinas de aproveitamento de biogás no Brasil**. Brasília, 2017. 13 p.

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

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

TINOCO, J. E. P.; KRAEMER, M. E. P. **Contabilidade e Gestão Ambiental**. 2 ed. São Paulo: Atlas, 2008.

TIGINI, V.; FRANCHINO, M. BONA, F.; VAREDE, G. C. **Is digestate safe? A study on its ecotoxicity and environmental risk on a pig manure**. Science of the Total Environment, p. 127–132, 2016.

VERINGA, H.J., 2000, **Advanced Techniques for Generation of Energy from Biomass and Waste**, Energy research Centre of the Netherlands – ECN.