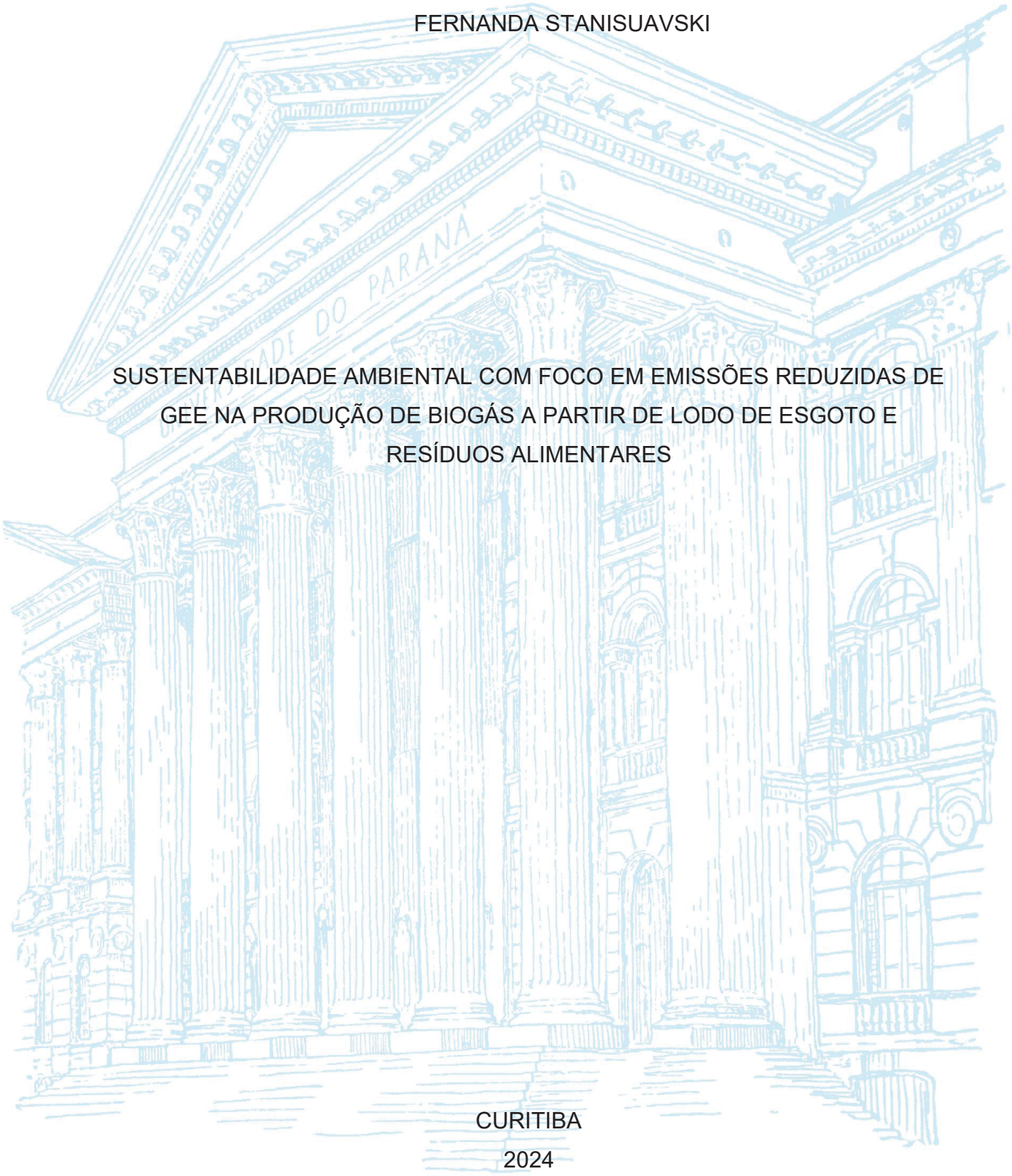
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

FERNANDA STANISUAVSKI



SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL COM FOCO EM EMISSÕES REDUZIDAS DE GEE NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE LODO DE ESGOTO E RESÍDUOS ALIMENTARES

CURITIBA

2024

FERNANDA STANISUAVSKI

SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL COM FOCO EM EMISSÕES REDUZIDAS DE GEE NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE LODO DE ESGOTO E RESÍDUOS ALIMENTARES

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente Urbano e Industrial.

Orientadora: Profa. Dra. Danniele Miranda Bacila

Coorientador: MSc Prof. Mauricy Kawano

CURITIBA

2024

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Stanisuavski, Fernanda
Sustentabilidade ambiental com foco em emissões reduzidas de GEE na produção de biogás a partir de lodo de esgoto e resíduos alimentares / Fernanda Stanisuavski. – Curitiba, 2024.
1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial.

Orientador: Danniele Miranda Bacila
Coorientador: Mauricy Kawano

1. Biogás. 2. Gases de Efeito Estufa. 3. Esgotos – Tratamento. 4. Lodo residual. 5. Resíduos orgânicos. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial. III. Bacila, Danniele Miranda. IV. Kawano, Mauricy. V. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO MEIO AMBIENTE
URBANO E INDUSTRIAL - 40001016057P5

ATA Nº220

ATA DE SESSÃO PÚBLICA DE DEFESA DE MESTRADO PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRA EM MEIO AMBIENTE URBANO E INDUSTRIAL

No dia dois de setembro de dois mil e vinte e quatro às 16:30 horas, na sala EQ06, Prédio da Engenharia Química, foram instaladas as atividades pertinentes ao rito de defesa de dissertação da mestranda **FERNANDA STANISUAVSKI**, intitulada**: SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL COM FOCO EM EMISSÕES REDUZIDAS DE GEE NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE LODO DE ESGOTO E RESÍDUOS ALIMENTARES**, sob orientação da Profa. Dra. DANNIELE MIRANDA BACILA. A Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação MEIO AMBIENTE URBANO E INDUSTRIAL da Universidade Federal do Paraná, foi constituída pelos seguintes Membros: DANNIELE MIRANDA BACILA (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ), ARNO PAULO SCHMITZ (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ), VALMA MARTINS BARBOSA (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ). A presidência iniciou os ritos definidos pelo Colegiado do Programa e, após exarados os pareceres dos membros do comitê examinador e da respectiva contra argumentação, ocorreu a leitura do parecer final da banca examinadora, que decidiu pela APROVAÇÃO. Este resultado deverá ser homologado pelo Colegiado do programa, mediante o atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca dentro dos prazos regimentais definidos pelo programa. A outorga de título de mestra está condicionada ao atendimento de todos os requisitos e prazos determinados no regimento do Programa de Pós-Graduação. Nada mais havendo a tratar a presidência deu por encerrada a sessão, da qual eu, DANNIELE MIRANDA BACILA, lavrei a presente ata, que vai assinada por mim e pelos demais membros da Comissão Examinadora.

CURITIBA, 02 de Setembro de 2024.

Assinatura Eletrônica
02/09/2024 19:51:52.0
DANNIELE MIRANDA BACILA
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
02/09/2024 21:38:46.0
ARNO PAULO SCHMITZ
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
03/09/2024 15:01:34.0
VALMA MARTINS BARBOSA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.
Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 393526
Para autenticar este documento/assinatura, acesse https://siga.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp
e insira o codigo 393526

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO MEIO AMBIENTE
URBANO E INDUSTRIAL - 40001016057P5

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação MEIO AMBIENTE URBANO E INDUSTRIAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **FERNANDA STANISUAVSKI** intitulada: **SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL COM FOCO EM EMISSÕES REDUZIDAS DE GEE NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE LODO DE ESGOTO E RESÍDUOS ALIMENTARES**, sob orientação da Profa. Dra. DANNIELE MIRANDA BACILA, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 02 de Setembro de 2024.

Assinatura Eletrônica
02/09/2024 19:51:52.0
DANNIELE MIRANDA BACILA
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
02/09/2024 21:38:46.0
ARNO PAULO SCHMITZ
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
03/09/2024 15:01:34.0
VALMA MARTINS BARBOSA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.
Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 393526
Para autenticar este documento/assinatura, acesse https://siga.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp
e insira o codigo 393526

Dedico essa dissertação ao meu filho Henrique, por toda sua curiosidade e amor em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que me apoiaram e incentivaram nesse momento de minha vida.

Primeiramente a Deus, pois sem ele nada disso seria possível.

À minha família, pelo apoio incondicional nessa jornada. Por sempre me ajudarem a persistir e prosseguir diante de todos os desafios e dificuldades.

Á minha orientadora prof. Dra. Danniele Miranda Bacila que, com toda paciência e calma, sempre me conduziu às melhores ideias e caminhos.

Ao coorientador Prof. Mauricy Kawano, que com toda expertise e experiência me ajudou a realizar o trabalho.

Ao Curso de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial pela oportunidade.

Ao colega Thiago Marenda que me ajudou na pesquisa e desenvolvimento desse estudo.

A todos que, de alguma forma, contribuíram e estiveram sempre presentes nessa jornada.

RESUMO

A utilização de energias renováveis tem crescido ao longo dos anos. Muitos foram os processos de incentivo como na era industrial, década de 70, e as inúmeras conferências e encontros promovidos pelos mais diversos países na busca de novas tecnologias que substituíssem as fontes fósseis. Baseado nisso, as diferentes energias limpas vêm surgindo, sendo uma delas o biogás, o qual pode ser gerado a partir da fermentação da matéria orgânica, inclusive considerando o aproveitamento de lodo de estação de tratamento de esgoto como substrato. Este tem como destinação tradicional o aterro sanitário ocasionando a formação de passivos ambientais e liberação de gases do efeito estufa à atmosfera. O presente trabalho foi elaborado com base no estudo de caso de uma usina de biogás que utiliza como substratos lodo de estação de tratamento de esgoto combinados com resíduos orgânicos provenientes da Central regional de abastecimento de alimentos e da agroindústria, especificamente pescados. Foram mapeadas as principais unidades de processo e identificadas as destinações do cenário *as-usual*, ou seja, caso não fosse utilizado para obtenção do biogás. Também, fazendo uso da ferramenta BiogasMap realizou-se um levantamento das plantas de biogás existentes no Paraná, bem como os substratos que são comumente utilizados na produção. Para avaliar a sustentabilidade ambiental da usina foram calculadas as emissões de GEE por meio da ferramenta GHG Protocolo, tanto para o cenário atual quanto para o base, tendo assim uma análise quantitativa capaz de promover essa comparação. Ademais, os créditos de carbono provenientes da usina, objeto do estudo de caso, foram calculados por meio da quantidade de tCO_{2e} emitidos considerando os dois cenários em questão, resultando em um número promissor e atraente no mercado. Assim, pode-se confirmar a viabilidade ambiental e econômica da usina e demonstrar sua relevância para redução de emissões de gases do efeito estufa. Os resultados referentes ao cenário atual foram de 16314,65 tCO_{2e} e para o cenário as-usual 39107,91 tCO_{2e}, ou seja, redução de 58,29% das emissões totais que deixaram de ser emitidas. Também, ao considerar a produção de 2528846 Nm^3, a usina representa cerca de 1,5% em relação ao total de biogás produzido por todas as indústrias utilizadoras de lodo de esgoto. É possível inferir pela viabilidade ambiental da usina de biogás ao comparar as emissões que foram evitadas de serem lançadas à atmosfera, contribuindo com a sustentabilidade ambiental. Além disso, o estudo aborda os ODS 7 e 13 promovendo uso de energias renováveis, como o biogás e focando na redução de emissões de GEE, respectivamente.

Palavras-chave: Biogás; Gases de Efeito Estufa; Protocolo GHG; Lodo de Estação de Tratamento de Esgoto; Resíduos orgânicos.

ABSTRACT

The use of renewable energy has grown over the years. There were many incentive processes like in the industrial era, in the 70s, and the countless conferences and meetings promoted by the most diverse countries in the search for new technologies that could replace fossil sources. Based on this, different clean energies have been emerging, one of them being biogas, which can be generated from the fermentation of organic matter, including considering the use of sludge from a sewage treatment as substrate. This is traditionally destined for landfills, causing the formation of environmental liabilities and the release of greenhouse gases into the atmosphere. This work was developed based on the case study of a biogas plant that uses as substrate sludge from a sewage treatment plant combined with organic waste from the Regional Food Supply Center and agroindustry, specifically fish. The main process units were mapped and the destinations for the as-usual scenario were identified, that is, if it was not used to obtain biogas. Also, using the BiogasMap tool, a survey of existing biogas plants in Paraná was carried out, as well as the substrates that are commonly used in production. To assess the environmental sustainability of the plant, GHG emissions were calculated using the GHG Protocol tool, both for the current and the usual scenario, thus providing a quantitative analysis capable of promoting this comparison. Furthermore, the carbon credits from the plant were calculated using the amount of tCO2e emitted considering the two scenarios in question, resulting in a promising and attractive number on the market. Thus, the environmental and economic viability of the plant can be confirmed and its relevance for reducing greenhouse gas emissions can be demonstrated. The results for the current scenario were 16,314.65 tCO2e and for the as-usual scenario 39,107.91 tCO2e, that is, a reduction of 58.29% in total emissions that were no longer emitted. Also, considering the production of 2528846 Nm3, the plant represents approximately 1.5% of the total biogas produced by all industries that use sewage sludge. It is possible to infer the environmental viability of the biogas plant by comparing the emissions that were prevented from being released into the atmosphere, contributing to environmental sustainability. Furthermore, the study addresses SDGs 7 and 13 by promoting the use of renewable energy, such as biogas and focusing on reducing GHG emissions, respectively.

Keywords: Biogas; Greenhouse Gas; GHG Protocol; Treatment plant sewage sludge; Organic waste.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL PROPOSTOS PELA ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS.....22
FIGURA 2 - COMPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL EM 2020 23
FIGURA 3 – MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA 29
FIGURA 4 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS 31
FIGURA 5 - ESQUEMATIZAÇÃO DAS ETAPAS DA BIODIGESTÃO 34
FIGURA 6 - VARIAÇÃO DO VOLUME EM FUNÇÃO DO TEMPO 39
FIGURA 7 - ESQUEMA DE UM REATOR UASB.....41
FIGURA 8 - EXEMPLOS DE MODOS DE AGITAÇÃO EM UM REATOR CSTR.....43
FIGURA 9 - VISÃO GERAL DOS ESCOPOS DO PROTOCOLO GHG E DAS EMISSÕES AO LONGO DA CADEIA DE VALOR. 47
FIGURA 10 - FATOR MÉDIO ANUAL.....53
FIGURA 11 - EMISSÃO DE GASES EM ATERRO SANITÁRIO.....55
FIGURA 12 - FLUXOGRAMA DO MERCADO VOLUNTÁRIO DE CARBONO.....57
FIGURA 14 - DIAGRAMA CONCEITUAL DAS ETAPAS DA SEÇÃO DE MÉTODOS DA DISSERTAÇÃO 61
FIGURA 15 - FERRAMENTA UTILIZADA PARA RASTREAMENTO DAS USINAS DE BIOGÁS EXISTENTES NO PARANÁ QUE UTILIZAM RESÍDUOS OU ESGOTO 70
FIGURA 16 - PRINCIPAL UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS PRODUÇÃO POR RSU OU LODO.....71
FIGURA 17 - EVOLUÇÃO DO Nº DE PLANTAS NOVAS E EXISTENTES NO PARANÁ 72
FIGURA 18 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO PROCESSO DE BIODIGESTÃO.....73
FIGURA 19 - COMPARATIVO DAS EMISSÕES CONSIDERANDO OS CENÁRIOS *AS USUAL* E ATUAL 82

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - TIPOS DE FLOCULAÇÃO.....25
QUADRO 2 -TIPOS DE COAGULANTES MAIS UTILIZADOS NO PROCESSO DE COAGULAÇÃO DE EFLUENTES.....26
QUADRO 3 - CARACTRÍSTICAS DOS LODOS 27
QUADRO 4 - FATORES PARA ESCOLHA DO SISTEMA DE BIODIGESTÃO 38
QUADRO 5 - CARACTERÍSTICAS TÍPICAS E LIMITAÇÕES TEÓRICAS DE REATORES ANAERÓBIOS ALIMENTADOS COM ESGOTO DOMÉSTICO 40
QUADRO 6 - POTENCIAIS DO AQUECIMENTO GLOBAL PARA UM HORIZONTE DE 100 ANOS UTILIZADOS NOS RELATÓRIOS DE EMISSÕES....52
QUADRO 7 - ETAPAS E INDICADORES DO SCEA NO SUPORTE À GERAÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO.....58
QUADRO 8 - FONTES INVENTARIADAS 77

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - ETAPAS DA BIODIGESTÃO E REAÇÕES ENVOLVIDAS 36
TABELA 2 - VALORES ESTIMADOS DE DBO5 EM ÁGUAS DOMÉSTICAS RESIDUAIS PARA ALGUNS PAÍSES 67
TABELA 3 - DADOS RELACIONADOS DO BIOGASMAP PARA A REGIÃO DO PARANÁ NO ANO DE 2022 71
TABELA 4 - RESÍDUOS UTILIZADOS EM MAIOR QUANTIDADE NA MISTURA ...74
TABELA 5 - CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS UTILIZADOS NA USINA PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS.....76
TABELA 6 - CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DO RESÍDUO ORGÂNICO E LODO DE ETE.....77
TABELA 7 - EMISSÕES TOTAIS DE GEE E REPRESENTATIVIDADE 78
TABELA 8 - EMISSÕES DO ESCOPO 01 POR CATEGORIA E TIPO DE GEE 78
TABELA 9 - EMISSÕES ESCOPO 1 79
TABELA 10 - EMISSÕES DO ESCOPO 03 80
TABELA 11 - EMISSÕES ESCOPO 03 POR CATEGORIA E TIPO DE GEE.....80
TABELA 12 - RESUMO CENÁRIO ATUAL.....81
TABELA 13 - RESUMO CENÁRIO AS-USUAL.....81

LISTA DE SIGLAS

ABIOGÁS	Associação Brasileira do Biogás
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRALPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
CEBDS	Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável
CIBIO	Créditos de Descarbonização
CO_2	Dióxido de Carbono
COP 27	Conferência do Clima da Organização das Nações Unidas ou Conferência das Partes da UNFCCC
CH_4	Metano
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FGV	Fundação Getúlio Vargas
GEE	Gases do Efeito Estufa
GHG	*Greenhouse gas*
GWP	*Global Warming Potentials*
HFC's	Hidrofluorocarbonetos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	Painel Intragovernamental Sobre Mudança Climática
ISO	*International Organization for Standardization*
N_2O	Óxido Nitroso
ONU	Organização das Nações Unidas
PBGHGP	Programa Brasileiro GHG Protocol
PFC's	Perfluorocarbonetos
PNE	Plano Nacional de Energia
SF_6	Hexafluoreto de Enxofre
WBSCD	Word Bussines Council for Sustainable Development
WRI	*World Resource Institute*
SEEG	Sistema de Estimativa de Emissão de Gases.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 16
2 OBJETIVOS 19
2.1.1 Objetivo geral 19
2.1.2 Objetivos específicos 19
3 REVISÃO DE LITERATURA 20
3.1 OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL 20
3.2 RESÍDUOS SÓLIDOS 22
3.3 ESGOTO DOMÉSTICO NO BRASIL 24
3.4 ENERGIAS RENOVÁVEIS 27
3.4.1 Biogás 30
3.5 REATORES ANAERÓBIOS 41
3.6 BIODIGESTORES *CONTINUOUS STIRRED TANK REACTOR* 42
3.7 LEGISLAÇÃO NO BRASIL 43
3.8 PROTOCOLO GHG 46
3.8.1 Escopo 1 47
3.8.2 Escopo 2 48
3.8.3 Escopo 3 49
3.8.4 Variáveis e resultados da Planilha 49
3.9 EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA 50
3.10 ATERROS E EMISSÕES 54
3.11 CRÉDITOS DE CARBONO 56
4 METODOLOGIA 60
4.1 LOCAL DE ESTUDO 62
4.1.1 Resíduos 62
4.1.2 Destinações tradicionais dos resíduos 62
4.1.3 Mapeamento das Operações Unitárias 63
4.1.4 Caracterização do substrato 63
4.1.5 Inventário de emissões 64
4.1.5.1 ESCOPO 1 65
4.1.5.2 ESCOPO 2 66
4.1.5.3 ESCOPO 3 66

4.2 CRÉDITOS DE CARBONO....68
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES....70
5.1 LEVANTAMENTO DE PLANTAS DO PARANÁ EM RELAÇÃO AO BIOGÁS....70
5.2 OPERAÇÕES UNITÁRIAS DO PROCESSO....72
5.3 CARACTERIZAÇÃO DO SUBSTRATO....76
5.4 PROTOCOLO GHG (GREEN HOUSE GASES)....77
5.5 CRÉDITOS DE CARBONO....83
6 CONCLUSÃO....85
7 REFERÊNCIAS....87
APÊNDICE 1 – PLANILHA GHG....97
APÊNDICE 2 – PLANILHA GHG – COMBUSTÃO ESTACIONÁRIA....98
APÊNDICE 3 – PLANILHA GHG – EMISSÕES FUGITIVAS....99
APÊNDICE 4 – PLANILHA GHG – ENERGIA ELÉTRICA (LOCALIZAÇÃO)....100
APÊNDICE 5 – PLANILHA GHG – TRANSPORTE & DISTRIBUIÇÃO (UPSTREAM) 101
APÊNDICE 6 – PLANILHA GHG – RESÍDUOS SÓLIDOS RESTANTES DA OPERAÇÃO....102
APÊNDICE 7 – PLANILHA GHG – EFLUENTES GERADOS NA OPERAÇÃO....103
APÊNDICE 7 – BIOGAS MAP – PANOMARA DO BIOGÁS NO PARANÁ....104
APÊNDICE 8 – BIOGAS MAP – NÚMERO DE PLANTAS POR FONTE DE SUBSTRATO....105
APÊNDICE 9 – BIOGAS MAP NÚMERO DE PLANTAS NO PARANÁ EM OPERAÇÃO E PRODUÇÃO....106

1 INTRODUÇÃO

A utilização de recursos não renováveis tem sido crescente desde a Revolução Industrial, porém, tal fato revela um alerta ambiental à sociedade: a escassez de recursos e a degradação ambiental. Também, somados a essa preocupação, têm-se o crescimento populacional que culmina em grande geração de resíduos, entre eles, lodo de esgoto doméstico e orgânicos.

Pensando no aumento da geração dos resíduos devido ao crescimento populacional, várias alternativas estão sendo aplicadas em substituição ao descarte tradicional em aterros, pois são potenciais geradores de gases do efeito estufa devido à alta formação de metano. Entre esses caminhos está a transformação desses gases em energia renovável, chamado de biogás, importante aliado frente à geração de resíduos e sustentabilidade ambiental.

Conforme Lei 14.026/2020, até o ano de 2033, 90% da população brasileira deverá ser atendida com coleta e tratamento de esgoto. Assim, haverá aumento da quantidade de resíduos a serem tratados pelas estações de tratamento. Atualmente, o lodo de esgoto doméstico no Paraná possui como principais destinações aterros sanitários e aplicação na agricultura. Porém, esse lodo apesar de ser rico em nutrientes como nitrogênio, fósforo, magnésio, oferece riscos à saúde humana se não for cuidadosamente tratado. Tal fato, muitas vezes, inviabiliza esse tipo de uso sendo a opção mais acessível o depósito em aterros, no entanto, não é a alternativa ambientalmente mais adequada (Bittencourt *et al*, 2017).

Atualmente, existem empresas que utilizam o lodo oriundo do tratamento do esgoto doméstico e de resíduos para a produção de biogás, contribuindo significativamente com a sustentabilidade ambiental (4º Workshop Internacional Aproveitamento Energético de Biogás de ETE's, 2016).

O biogás tem papel primordial na contribuição de energia renovável com tecnologias cada vez mais avançadas para sua produção. A técnica de digestão anaeróbia é amplamente utilizada para produção de biogás e, apesar de rota alternativa para resíduos orgânicos, requer adequados parâmetros para atingir a eficiência técnica recomendada e obter bons resultados na geração de energia (Souza e Rizzatto, 2022).

Conforme Araújo *et al*. (2021) melhores práticas da administração pública auxiliam na gestão apropriada de resíduos sólidos. Combinando-se diferentes

técnicas e métodos, a energia produzida pode ser utilizada para diversas fontes, como térmica e elétrica, reduzindo emissões de gases do efeito estufa e implementando a economia circular.

Conforme o Ministério do Meio Ambiente (2022), um dos compromissos assumidos pelo Brasil na 26ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas refere-se ao acordo do metano, estimando reduzir 30% das emissões deste gás até o ano de 2030. Posto isso, o interesse do país para cumprir tal meta eleva as expectativas de apoio a tecnologias limpas e outras formas de incentivo ambiental.

Em BRASIL (2022), o Programa Nacional de Redução de Emissões de Metano possui papel preponderante nos pactos assumidos pelo país perante as Nações Unidas sobre Mudança do Clima, Pacto de Glasgow e Acordo Global do Metano, tendo como um de seus objetivos o uso sustentável do biogás, promovendo apoio ao desenvolvimento de novas tecnologias ligadas ao setor. Portanto, a evidência nas energias renováveis vem aumentando e trazendo novas tecnologias ligadas ao setor devido aos interesses envolvidos por diversos países.

O cenário para obtenção de biogás pode ser proveniente de diferentes fontes que possuam características de decomposição da matéria. Em muitos casos são utilizadas misturas para aumento da eficiência e qualidade do produto final.

Estudos sobre a sustentabilidade ambiental de usinas de biogás que utilizam como substratos lodo de ETE e mistura de resíduos agroindustriais e/ou sólidos orgânicos são escassos. Considerando aspectos sociais e econômicos, bem como mudanças climáticas o trabalho contribui positivamente ao cenário, formulando dados para uma análise que cabe ao momento atual.

O presente estudo busca destacar o importante papel das energias renováveis frente à redução de gases do efeito estufa. Também, incentiva usos e tecnologias para conversão em créditos de carbono como adicional ao processo econômico de produção de biogás utilizando lodo doméstico de uma ETE como fonte da fermentação combinado com resíduos orgânicos e agroindustriais, especificamente pescados.

Diante do exposto, o objeto de estudo é de suma importância para o meio ambiente e sustentabilidade ambiental, fomentando um cenário equilibrado e economicamente viável. Ainda, desperta interesses sociais e econômicos em

diferentes projetos trazendo resultados que incentivam a prática do uso de recursos renováveis, transformando rejeitos em fontes de energia agregada. Por fim, contribui com os objetivos do desenvolvimento sustentável diretamente nos ODS 7 e 13, promovendo energia limpa, como o biogás e focando na redução das emissões de GEE.

2 OBJETIVOS

2.1.1 Objetivo geral

Analisar a sustentabilidade ambiental de uma usina de biogás, considerando emissões de gases de efeito estufa nos cenários atual e cenário base.

2.1.2 Objetivos específicos

- Identificar qualitativamente e quantitativamente os resíduos utilizados na operação da planta, considerando tipo, origem e logística;
- Identificar as destinações dos resíduos oriundos de lodo de estação de tratamento e orgânicos, caso não fosse utilizado para produção de biogás;
- Mapear as principais operações unitárias que compõem a planta de biogás;
- Caracterizar o substrato empregado na usina;
- Inventariar as emissões de GEE, considerando o cenário atual (operação da planta de usina de biogás);
- Inventariar as emissões de GEE, considerando as destinações dos resíduos, identificada no cenário base, ou seja, envio para aterros.
- Realizar uma estimativa de créditos de carbono, considerando a comparação das emissões de GEE nos cenários atual e cenário base.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Para o desenvolvimento da dissertação na temática de geração de energia renovável a partir do aproveitamento de resíduos e lodo de esgoto foi realizado um levantamento bibliográfico sobre a situação de resíduos sólidos e saneamento no Brasil, emissões de GEE e formas de cálculo aplicáveis além de consultas a artigos e legislações sobre mercado dos créditos de carbono em âmbito nacional.

3.1 OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Com a finalidade de desenvolver objetivos sustentáveis factíveis, surgiu, por meio das Nações Unidas, “Os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável – ODS”, tendo seu fechamento em 2015 na Cúpula das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável. Composto por 17 objetivos e 169 metas que tendem a serem atingidas até 2030 (Bretas e Melo, 2018). Os ODS foram criados como ferramentas a favor da sociedade para melhoria da qualidade de vida e garantia de sustentabilidade às comunidades. (Furtado *et al*, 2022).

Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 abrangem diversas áreas que visam promover um futuro mais sustentável para todos. Eles abordam questões como meio ambiente, acesso a recursos básicos como alimentos, água e saneamento, igualdade de gênero, crescimento econômico inclusivo, boa governança, infraestrutura e desenvolvimento urbano sustentável. Esses objetivos representam um compromisso global para enfrentar os desafios mais urgentes do nosso tempo e criar um mundo mais justo, equitativo e ambientalmente consciente (Wood *et al*, 2024).

Todos os objetivos têm sua relevância, porém para esse estudo destacam-se os de número 7 (Energias renováveis e acessíveis) e o 13 (ação contra a mudança global do clima), especificamente. Para o ODS 7, a energia pode ser utilizada de diversas formas em substituição às comumente empregadas e em alguns países como Suécia, Alemanha, Holanda, Dinamarca e Coréia do Sul já foram publicados decretos de descarbonização sendo usado o biometano como combustível veicular. Como o biogás utilizada uma gama ampla de matérias primas

que são consideradas como passivos ambientais torna-se uma fonte sustentável, barata e acessível, atendendo ao objetivo proposto com efetividade (Embrapa, 2022).

É de suma importância o papel dos biocombustíveis na agenda do Brasil para o alcance das metas assumidos pelo país na COP21 em 2015 e reafirmados na COP26. Têm destaque no ODS2 por reduzir a produção de dejetos na agricultura por meio do tratamento anaeróbio e sendo assim, mais sustentável pois pode ser aproveitado como energia em substituição aos combustíveis fósseis nas propriedades. Também, o digestato formado e eventualmente que seria descartado pode ser aproveitado como fertilizante em substituição aos convencionais, sendo uma forma barata e efetiva na produção (Embrapa, 2022).

Também, pode-se afirmar que a utilização do biogás supre o ODS8, pois promove desenvolvimento regional com a aplicação de novas tecnologias e em paralelo gera emprego e renda (Embrapa, 2022). Conforme a Associação Brasileira do Biogás (Abiogás, 2024) o potencial para o estado do Paraná considerando o saneamento é de 104,9 milhões Nm^3/ano e se forem somadas aos setores sucroenergético, proteína animal e produção agrícola, este número pode chegar a mais de 3,7 bilhões Nm^3/ano de biogás produzido, equivalendo a 15147 GWh/ano de energia elétrica gerada. Se considerado que para cada 1 MW de potência instalada há geração de sete empregos, o mercado apresenta-se como promissor para atendimento ao objetivo proposto.

Ao atendimento do ODS11, pode ser considerado a combinação dos fatores socioeconômico e ambiental. Pois o aproveitamento da energia sob a forma de térmica, energética ou combustível supre parte da necessidade das tecnologias atualmente utilizadas, transformando cidades em centros sustentáveis já que conforme o IBGE referente ao ano de 2022, 84,72% da população vive em grandes centros urbanos (Embrapa, 2022).

No ODS13, é abordado o fato de ações urgentes para frear as mudanças climáticas que, sabidamente, tem relação direta com a dependência na utilização de combustíveis fósseis, alta demanda por consumo de bens e industrialização acelerada com processos agressivos ao meio ambiente. No Brasil, a participação de energias renováveis no setor energético ficou em 87,9% para o ano de 2022 conforme informação do Relatório Síntese 2023 da Empresa de Pesquisa Energética

(EPE), demonstrando o potencial do país em relação ao setor e a contribuição para diminuição da ocorrência de fontes não renováveis.

FIGURA 1 - OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL PROPOSTOS PELA ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS

FONTE: ONU (2023).

3.2 RESÍDUOS SÓLIDOS

Segundo a Política Nacional dos Resíduos Sólidos, Lei 12.305 de 02 de agosto de 2010, a definição para resíduo sólido é:

> 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.

A definição preconizada na legislação é ampla e, portanto, devem ser consideradas algumas características específicas para classificação. Conforme NBR 10.004:2004, os resíduos devem ser identificados por meio da origem, constituintes e particularidades considerando impacto na saúde e meio ambiente, e podem ser perigosos, não perigosos, não inertes e inertes.

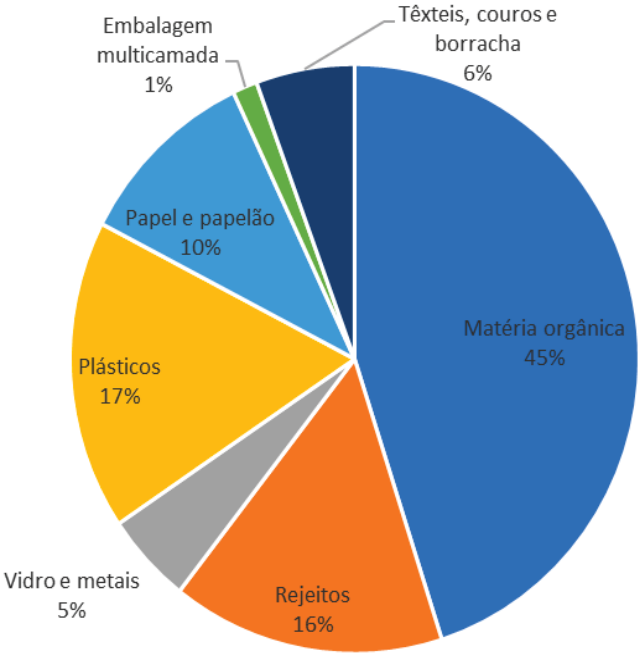
A composição de resíduos sólidos varia de país para país. A ABRALPE (2022) estima que o brasileiro gerou em torno de 1,04 kg/habitante/dia, sendo o Sudoeste maior detentor devido à sua grande população. Simoncini (2022) evidencia

que os elementos base para uma boa gestão de resíduos sólidos deve englobar segregação, coleta, reciclagem, tratamento e disposição adequada. Portanto, Para Lins *et al* (2023), a aplicação da economia circular é extremamente importante nesse cenário, buscando oportunidades frente à disposição dos resíduos, instituindo fontes limpas e colaborando com a reciclagem consciente de materiais.

Em se tratando de resíduos orgânicos, conforme definição do Plano Nacional de Resíduos Sólidos aprovado pelo Decreto nº 11.043 de 13 de abril de 2022, são representados genericamente por restos de alimentos e vegetais, podendo englobar limpeza urbana, agrícola ou industrial que não possuam formas de reciclagem ou destinação adequada sem um pré-tratamento específico. Na figura 1, é observado o percentual de resíduos gerados no Brasil para o ano de 2020. Percebe-se que o maior quantitativo advém de matéria orgânica, sendo um desafio seu controle, geração e redução.

Ademais, para Ulloa-Murilo (2022), uma gestão inadequada dos resíduos sólidos pode gerar problemas sociais, econômicos e ambientais, além de ser potencialmente emissores de GEE, especialmente o metano quando a referência são os orgânicos. No Brasil foram coletados no ano de 2022 mais de 70 milhões de toneladas de resíduos de sólidos urbanos (ABREMA, 2023).

FIGURA 2 - COMPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL EM 2020



FONTE: ABRALPE (2020).

Os resíduos orgânicos podem variar conforme sua origem, tendo o teor percentual de proteínas de 10 a 20%, lipídios entre 10 e 30% e carboidratos na faixa de 40 a 60% (Parvez & Ahammed, 2024; Slopiecka *et al*., 2022). É sabido que carboidratos são fontes potenciais para microrganismos, permitindo a conversão de metano em energia e a produção de biogás. Além disso, contribuem para o controle da geração e destinação desses resíduos (Monteiro, 2023). Quando combinados com outros resíduos, podem se tornar matéria-prima em diversos processos.

3.3 ESGOTO DOMÉSTICO NO BRASIL

A lei do marco legal do Saneamento básico no Brasil, Lei 14.026/2020 prevê em seu art. 11-B, que 90% da população brasileira deverá ser atendida por coleta e tratamento de esgotos até 31 de dezembro de 2033. Portanto, haverá aumento na quantidade de resíduos a serem tratados em estações.

Acerca dos resíduos, os lodos coletados das estações seguem para tratamentos específicos que visam redução da quantidade e estabilização da atividade bacteriana reduzindo odores e patógenos e podem ser realizadas de três formas: química, física e biológica (Revista Analytica, 2020).

O tratamento biológico pode ser composto por algas ou bactérias que degradam as impurezas e dividem-se em dois tipos: aeróbico e anaeróbico. A técnica a ser aplicada dependerá de fatores como quantitativo da população atendida, característica do esgoto (doméstico ou industrial) entre outros para que se determine a eficiência necessária de remoção (Santos, R. A. Dos, 2023).

Para o sistema aeróbio, a técnica amplamente utilizada é o sistema de lodos ativados, o qual requer uma quantidade elevada de tanques para uma degradação mais completa, tornando esse processo mais oneroso. São três processos básicos para esse tipo de tratamento: oxidação – na qual a matéria orgânica é estabilizada -; síntese – na qual ocorre a formação de novas células -; e endogenia – na qual os microrganismos decompõem o próprio material celular. A eficiência de remoção desse processo pode ser na ordem de 40 a 60%. As maiores desvantagens do sistema aeróbio são geração de maus odores e remoção com maior frequência do lodo de fundo (Sales, 2023; Fabreti, 2006; Junior, O. P. Da S, 2022).

Os sistemas de lodos ativados são constituídos por tanques de aeração que operam de modo contínuo e tanques de sedimentação no qual a biomassa é floculada. Para a primeira etapa, os microrganismos consomem a matéria orgânica presente no efluente satisfazendo a necessidade energética. A segunda etapa separa as duas fases por gravidade, em que parte do lodo sedimentado retorna para o tanque de aeração. Assim, é mantida grande concentração de bactérias para remoção das impurezas a cada entrada no sistema que ocorre de modo contínuo (Sales, 2023).

Em sistemas anaeróbicos, no qual ocorre sem a presença de oxigênio os microrganismos presentes no sistema transformam a matéria orgânica em gases e a mineralização de nutrientes. Para essa técnica podem ser utilizados vários tipos de reatores, entre eles o UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) no qual é utilizado regime hidráulico combinado com separação sólido/gás/líquido, conhecido como reator de leito de lodo anaeróbico de fluxo ascendente, sendo o mais comumente empregado nesse segmento (Rodrigues *et al*., 2014; Sales, 2023).

No tratamento físico utilizado nos processos de tratamento de lodo de esgoto, os resíduos sólidos são removidos por técnicas como decantação, sedimentação, flotação e filtração por areia, podendo ser utilizadas também membranas. Na sedimentação a separação das fases ocorre por gravidade, ficando as sólidas ao fundo do decantador (Revista Analytica, 2020; Junior, O. P. Da S, 2022). Se combinados processos físico-químicos, a floculação pode ser empregada de diferentes maneiras conforme disposto no quadro a seguir.

QUADRO 1 - TIPOS DE FLOCULAÇÃO

TIPO DE FLOCULAÇÃO	***CARACTERÍSTICAS (continua)***
Pericinética	Também conhecida como movimento browniano, o choque entre as partículas ocorre devido à energia térmica da água que mantém suas moléculas em constante movimento, permitindo assim a agitação entre as partículas e consequentemente a formação dos flocos.
Ortocinética	O contato entre as partículas é favorecido pela presença de um gradiente de velocidade que mantém o fluido em movimento.

TIPO DE FLOCULAÇÃO	*CARACTERÍSTICAS*
Sedimentação diferencial	Partículas coloidais de características distintas (diâmetro, peso entre outras) sob ação da gravidade tendem a sedimentar com velocidades diferentes, podendo colidir umas com as outras.

FONTE: Fabreti, (2006).

Por fim, os processos químicos são empregados com a utilização de neutralizadores de pH, coagulantes, e agentes de floculação que permitem a eliminação de poluentes no esgoto (Revista Analytica, 2020). Os tipos de coagulantes mais utilizados nessa técnica estão descritos no quadro 2.

QUADRO 2 -TIPOS DE COAGULANTES MAIS UTILIZADOS NO PROCESSO DE COAGULAÇÃO DE EFLUENTES

Tipo de coagulante	*Característica*
Sulfato de Alumínio	Material gerado a partir da bauxita, que juntamente com o ácido sulfúrico forma um produto químico que é usado como coagulante.
Sulfato ferroso	Sal de ferro de baixo custo produzido nas indústrias de aço
Sulfato férrico	Produzido a partir do sulfato ferroso hidratado e pode ser sólido ou líquido
Cloreto férrico	Produzido pela oxidação do óxido ferroso com ácido clorídrico, comumente utilizado na forma líquida
Cal	Muito utilizada por ser de baixo custo e por causar menos problemas no desaguamento do lodo; também é utilizada no ajuste de pH
Polieletrólitos	Classificado de acordo com características iônicas (cargas negativas) e catiônicos (cargas positivas). Podem ser de origem natural ou sintética. Na maioria das vezes são sintéticos e são mais utilizados como auxiliar na floculação do que coagulantes propriamente ditos.

FONTE: Fabreti, (2006).

Conforme Junior, O. P. Da S. (2022), a etapa de floculação requer mais tempo que a coagulação promovendo a formação de flocos maiores com menor gradiente de velocidade a fim de evitar a ruptura dos flocos formados. Ademais, um dos maiores problemas de tratamentos químicos que são combinados com físicos está a produção de algas que dificultam a remoção de nutrientes, não sendo eficiente frente às exigências legais.

Cada processo empregado tem capacidade para produzir diferentes tipos de lodo. No quadro a seguir, serão descritos alguns tipos comumente encontrados.

QUADRO 3 - CARACTRÍSTICAS DOS LODOS

Tipo de resíduo	***Características***
Lodo primário	Lodo obtido por sedimentação do esgoto no decantador primário. Normalmente é cinza e tem odor ofensivo. Pode ser digerido facilmente por via anaeróbia.
Lodo secundário (lodos ativados)	Aparência floculada e tons marrons, a coloração mais escura indica condições anaeróbias do meio. Tende à decomposição anaeróbia devido ao excesso de matéria orgânica. Pode ser digerido sozinho ou misturado com lodo primário.
Lodo digerido aeróbio	Apresenta cor marrom escura e aparência floculada, odor inofensivo. É facilmente drenado.
Lodo digerido anaeróbio	Apresenta cor marrom escura ou preta. Se for bem digerido não apresenta odor ofensivo. Também é fácil de ser drenado.

FONTE: Fernandes, (1999).

3.4 ENERGIAS RENOVÁVEIS

Segundo Moreira *et al*. (2021), o conceito de energia provém do grego e pode ter vários significados, dentre eles a capacidade para realizar um trabalho. Porém, para isso existe o chamado processo de conversão que pode ser empregado de diversas formas e tecnologias associadas.

Ainda, conforme Moreira *et al*. (2021), para produção de energia deve existir a preocupação com a segurança das fontes utilizadas, priorizando recursos renováveis, os quais possuem vantagens do ponto de vista ambiental, econômico e estratégico. O Brasil possui destaque quando comparado a outros países em desenvolvimento, pois diminuiu emissões em 2,3% em 2017 em relação a 2016 e assumiu reduzir emissões em 37% abaixo dos níveis de 2005 até o ano de 2025, passando esse número para 43% em 2030.

Logo, historicamente falando, a matriz energética nacional teve mudanças ao longo dos anos e essas alterações estavam ligadas a impactos de crise econômica, transição demográfica, mudanças de hábitos e disponibilidade para exploração de novas fontes energéticas. Dados do Balanço Energético Nacional nos

traz que em 1970, a lenha representava 64,2% de toda a produção de energia primária no Brasil, sendo 47,6% da demanda total de energia (Ben, 2021).

Borges (2016) conceitua a necessidade de novas fontes de energia limpa frente à situação ambiental atual e suas consequências devido ao uso de combustíveis fósseis como principal fonte de energia. Dessa forma, segue explicando que geralmente é possível garantir o desenvolvimento econômico com inclusão social sem que ocorra uma agressão maior ao meio ambiente e à saúde humana. Uma forma de equilibrar essa questão de utilizar fontes não renováveis juntamente com as fontes de energias renováveis, seria incentivar e fomentar a utilização da biomassa como fonte de energia primária e renovável.

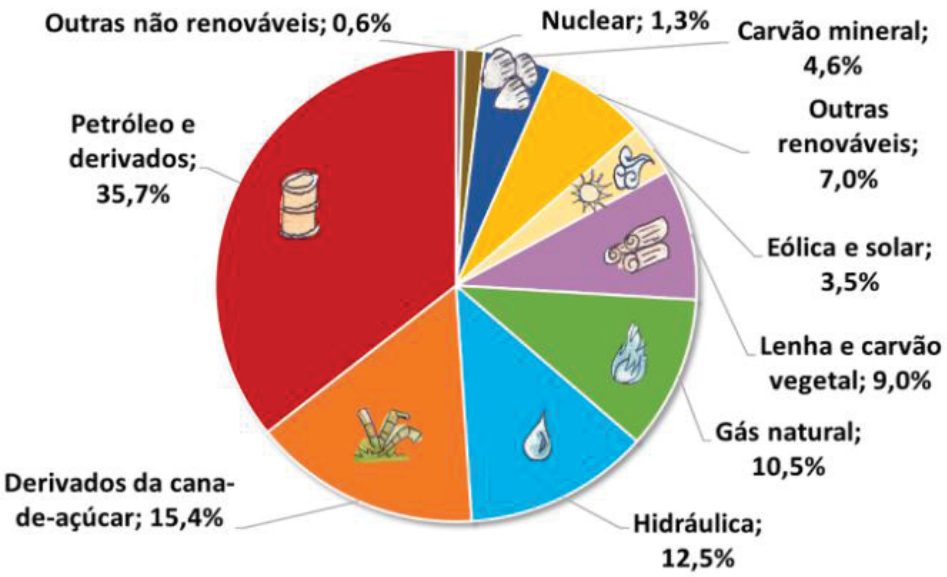
Segundo Mihelcic e Zimmerman (2015), a preocupação com fontes e usos de energia está ligada ao fato das emissões dos gases do efeito estufa causarem mudanças no clima global. Quando as emissões são emanadas de combustíveis fósseis impactam na disponibilidade da água, ecossistemas em desequilíbrio, alimentação, saúde, aumentando a temperatura do globo. Com isso, a busca por tecnologias e fontes renováveis vem crescendo e existem muitas ações voltadas à transição energética.

Conforme os dados divulgados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2022), a matriz energética mundial é composta, principalmente, por fontes não renováveis de energia, como, por exemplo, o gás natural, petróleo e carvão. Os dados assinalados como outros, com apenas 7%, correspondem a fontes alternativas de energia, que também se enquadram entre as fontes de energia renováveis, tais quais a energia solar, eólica e geotérmica (EPE, 2022; Souza, 2022).

A falta de informações fundamentais e monitoramento das informações, são grandes entraves nas questões climáticas. Países, estados e municípios devem possuir pensamento colaborativo para tomada de decisões que realmente possam impactar em diminuição e medidas de longo prazo. O cenário deve ser estrategicamente pensado, trazendo políticas ambientais aplicáveis. Especificamente o Brasil possui grande dificuldade em alinhar políticas, por mais favorável que seja o cenário para atuação em energias renováveis, há grandes entraves. Atualmente, conforme dados da Empresa de Pesquisa Energética, as energias renováveis representam quase 50% da utilização no país, onde a biomassa

corresponde em torno de 15% ao suprimento desse segmento (Teixeira, 2023; EPE, 2023).

FIGURA 3 – MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA



FONTE: Empresa de Pesquisa Energética, EPE (2022).

Para energia solar, um dos primeiros registros sobre seu aproveitamento foi nos trabalhos de Euclides (315 a.C.), em textos que ele descreve aplicações à astronomia de espelhos refletores. Porém, Arquimedes aplicou a prática do conceito em um cerco de Siracusa, refletindo os raios solares em espelhos e incendiando embarcações inimigas (Motta, 1986).

Os ventos sempre foram utilizados na evolução humana seja para mover barcos, bombear água, porém, tem tido destaque como produção de energia renovável. No Canadá foi desenvolvido o primeiro gerador, em 1979, para geração de energia elétrica (Motta, 1986).

Para Souza (2022), a criação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas – PROINFA – foi o ponto de partida para o desenvolvimento do setor eólico no Brasil em que viabilizou o contrato de 54 usinas, com a geração de cerca de 1,4 GW de potência. No entanto, a energia eólica era cara e pouco competitiva (R$ 366,00/MWh), e somente a partir de 2009 com o primeiro leilão exclusivo para energia eólica, que esse quadro começou a mudar. Em 2014, os custos da geração de energia eólica caíram, chegando a R$ 136,00/MWh, Lima (2017).

Segundo o Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050), a energia eólica é uma das fontes renováveis que está em crescente aumento. As fortes discussões que estão ocorrendo com o tema de mudanças climáticas aumentam a necessidade de busca por formas de reduzir a emissão de gases que causam o efeito estufa, assim como de outros poluentes. Também possuem destaque nesse setor o biogás, possuindo participação de 16,9% no setor termelétrico e com grande potencial de crescimento, pois utiliza biomassa para produção.

3.4.1 Biogás

O conceito de energia renovável vem sendo utilizado desde a década de 70, quando ocorreu a primeira crise do petróleo. A partir de então, os governos iniciaram o incentivo a energias alternativas e processos foram sendo desenvolvidos e melhorados (Schmidell, 2021).

Porém, desde antes da existência do homem na terra, os processos de fermentação existiam, pois colaboraram para desenvolvimento e existência da atmosfera. Em 1776, o metano foi identificado no gás dos pântanos; já em 1844, Louis Pasteur demonstrou por meio de fermentação da palha molhada nos estábulos, presença de metano e dióxido de carbono (Motta, 1986).

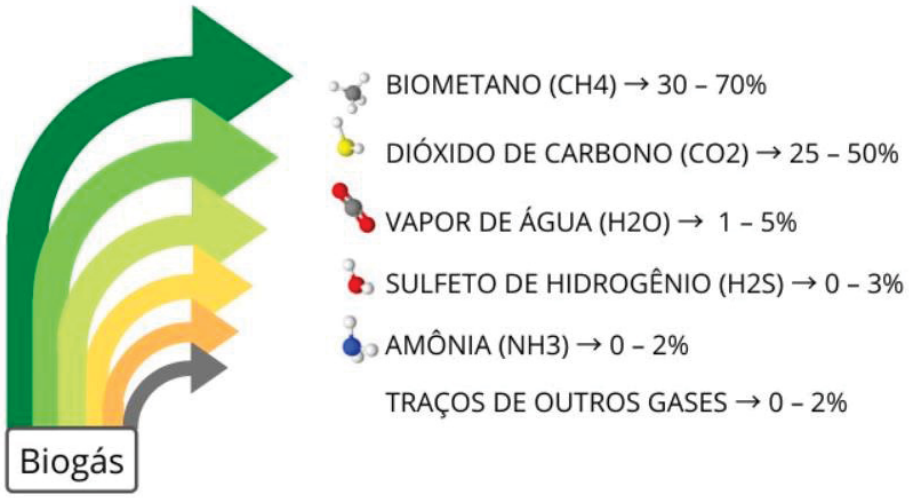
Produtos de origem vegetal sempre foram utilizados para os mais diversos fins. Incialmente para aquecimento e cozimento dos alimentos, depois geração de vapor e então, substituição de combustíveis fósseis (Motta, 1986).

Para Coelho et al. (2018), o biogás é composto por metano (CH_4) e gás carbônico (CO_2) e pequenas parcelas de gases adjacentes, pois varia a depender da matéria orgânica utilizada. O gás é obtido pela decomposição de resíduos orgânicos em meio chamado anaeróbico, ou seja, sem a presença de oxigênio na reação.

Apesar da composição química do biogás ser semelhante ao gás natural, suas origens são distintas. O gás natural provém de jazidas petrolíferas, enquanto o biogás é gerado por processos de decomposição da matéria, como saneamento e agroindústria. Por fazer parte do ciclo biogeoquímico, é considerado um recurso renovável, além de reduzir a carga orgânica da biomassa residual em tratamentos sanitários (Bley, 2015).

O biogás possui como características ser um gás incolor, inodoro se livre de impurezas, insolúvel e de densidade baixa, o que dificulta o transporte, ocupando maior volume afetando a liquefação. Possui poder calorífico inferior de 5.500 kcal/m^3 na proporção de metano a 60%. (Cassini, 2003).

FIGURA 4 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS



FONTE: ENERGIA E BIOGÁS, 2023.

O biogás é um produto da decomposição da biomassa que segundo Moreira *et al*. (2021) compreende um conjunto de materiais vegetais os quais se encontram na natureza sob a forma de resíduos urbanos, agroindustriais, folhas, óleos dentre outros compostos que podem ser produzidas pelo homem ou por animais. A geração de biogás por meio desse produto possui extrema diversidade e são aplicadas à tecnologia e potência instalada, permitindo adaptabilidade no processo.

De acordo com Coelho et al. (2018), o biogás pode ser utilizado em diferentes fontes de energia como térmica, eletricidade, combustível. Seu uso também dependerá da purificação, pois a umidade influencia negativamente o processo afetando inflamabilidade, poder calorífico, assim como o gás sulfídrico, que se não removido adequadamente causa corrosão em diversos motores.

Os resíduos orgânicos podem ser provenientes de resíduos domésticos, agrícolas, da limpeza urbana, de industriais e de saneamento básico. Entretanto, a escala em que os materiais são produzidos podem ser uma barreira na decomposição e tornar-se um problema ambiental sem uma correta destinação (Ministério do Meio Ambiente, 2022).

Uma das alternativas para os aterros sanitários, hoje ainda principal via de destinação apropriada ambientalmente, é a chamada recuperação energética. Esse processo transforma resíduos sólidos em eletricidade, energia térmica ou combustível por meio da digestão anaeróbia, recuperação de gás de aterros, incineração e coprocessamento. (Ministério do Meio Ambiente, 2022).

Nos aterros há a emanação de maus odores devido à presença de gás sulfídrico, problemas relacionados à emissão de gases do efeito estufa, como metano e dióxido de carbono e principalmente a geração de líquidos lixiviados. Isso implica o uso de alternativas para transformação desses resíduos sendo o biogás um importante produto agregado, pois o metano (principal componente) contribui aproximadamente trinta vezes mais que o gás carbônico para o efeito estufa, e poderá reintegrar o carbono mais rapidamente ao ciclo natural (Cassini, 2003).

O biogás proveniente de aterros é semelhante ao produzido pelo método anaeróbico em biodigestores (Yang e Ge, 2016). O processo de digestão anaeróbia (sem oxigênio) possui várias etapas, porém somente na última, chamada metanogênese, é formado biogás. Os compostos utilizados para essa produção, provenientes de uma estação de tratamento consiste em lodo e esgoto (Ministério das cidades, 2017).

Como o biogás pode ser proveniente de diferentes fontes de biomassa, o esgoto doméstico é um resíduo que pode ser aproveitado para essa finalidade. O processo de obtenção do biocombustível pode ocorrer na etapa de remoção de matéria orgânica dos efluentes em reatores e na decomposição anaeróbia do lodo excedente proveniente dos reatores das estações de tratamento de esgoto, chamadas ETE’s e podem ser adaptadas conforme a demanda de resíduos e local onde estão inseridos. No ano de 2022, 74% do biogás produzido no Brasil foram provenientes do saneamento (Silva, 2022; Itaipu, 2023).

Um substrato elegível para produção de energia renovável necessita de concentrações significativas de matéria orgânica. Nesse quesito, os lodos secundários, formados por tratamento biológico anaeróbio, possuem maior biomassa quando comparados aos lodos primários de decantação. A caracterização ocorre por meio de sólidos totais e sólidos suspensos totais convertidos em demanda química de oxigênio em lodo (Ministério das cidades, 2017).

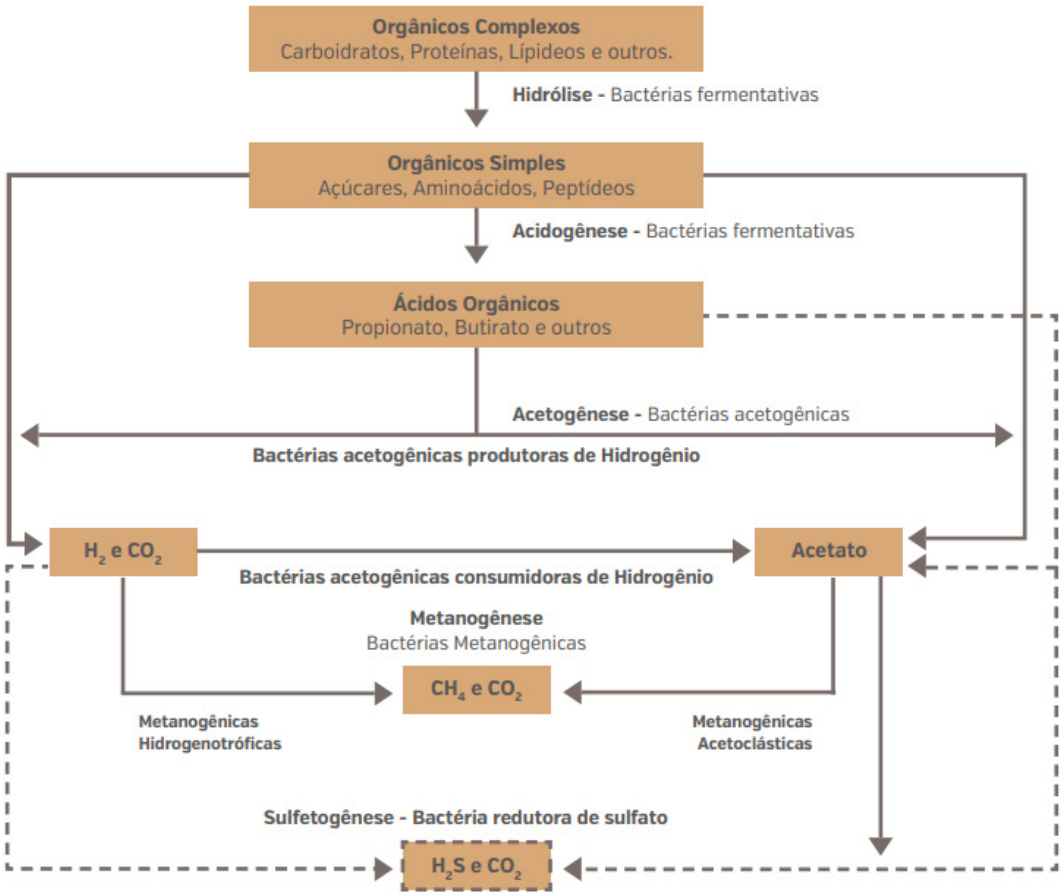
O balanço energético é altamente favorável à produção de metano, motivo pelo qual o emprego da digestão anaeróbia é uma alternativa viável ao tratamento dos resíduos sólidos orgânicos. Ele é influenciado por diversos fatores como temperatura, carga orgânica, materiais de natureza tóxica entre outros agentes. (Cassini, 2003).

As etapas completas do processo de biodigestão consistem em: Hidrólise, acidogênese, acetogênse e metanogênese; e os padrões mais utilizados são a ausência de oxigênio, composição do substrato, temperatura e pH do meio (Coelho *et al*., 2018).

A figura 4 exemplifica uma representação esquemática do processo de geração de biogás. Na primeira fase de decomposição anaeróbia, hidrólise, há a liberação de enzimas das bactérias hidrolíticas, as quais reagem quimicamente decompondo carboidratos, lipídios e proteínas em materiais que possam ser absorvidos pela célula, como aminoácidos e açucares (Coelho *et al*., 2018). Há grande variação de microrganismos que decompõem o material não dissolvido nessa etapa, na qual os produtos resultantes serão posteriormente decompostos e ocorrerá a reutilização no próprio processo metabólico (Seadi et al, 2008). O tempo de duração envolvido nessa etapa varia conforme as características do substrato podendo ser de poucas horas em se tratando de carboidratos ou de dias para proteínas e lipídios (Kunz, 2019). A hidrólise de lípideos é mais lenta que outros componentes e gera glicerol que será convertido em ácidos graxos voláteis na etapa seguinte conforme equação 1, ácidos graxos de cadeia longa como oléico e palmítico que serão convertidos em dióxido de carbono, hidrogênio e álcoois (Parvez & Ahammed, 2024).

$$C_3H_8O_3 + H_3N + CO_2 + H_2 \rightarrow C_5H_7NO_2 + C_3H_6O_2 + H_2O \quad (1)$$

FIGURA 5 - ESQUEMATIZAÇÃO DAS ETAPAS DA BIODIGESTÃO



FONTE: Ministério das Cidades, 2017.

A fase seguinte, acidogênese, os compostos orgânicos convertem-se em ácido lático, ácidos graxos de cadeia curta, moléculas com 1 a 5 carbonos e outros minerais por meio de bactérias acidogênicas, influenciados diretamente pela pressão parcial de hidrogênio, se elevada resultará em produtos com maior quantidade de carbono. A seguir, na etapa de acetogênese os produtos da etapa anterior (acidogênese) são transformados em substratos para a produção de metano por reações endotérmicas (Cassini, 2003). Aqui são transformados os ácidos de cadeia longa em ácidos com apenas um ou dois átomos gerando hidrogênio e dióxido de carbono em paralelo e a reação é comandada pelas bactérias homoacetogênicas que promovem o equilíbrio no consumo do hidrogênio e gás carbônico favorecendo a produção de acetato (Kunz *et al*, 2019).

Seguindo o esquema de processo, na fase de metanogênese os compostos orgânicos são convertidos em metano e dióxido de carbono por meio de bactérias

conhecidas como *Archaea*, grupo único com características distintas e adaptados a vários ambientes. Tais microrganismos fazem uso de números limitados de substratos, sendo ácido acético, hidrogênio/dióxido de carbono, ácido fórmico, metanol, metilaminas e monóxido de carbono, retirando excesso de hidrogênio e fermentação das etapas anteriores (Chernicharo e Lemos, 2007). Nessa etapa a reação é exotérmica para as duas formas de reações encontradas, a saber:

> - *Metanogênicas acetoclásticas*, que usam acetato como fonte de carbono e energia, produzindo gás carbônico (CO_2) e metano (CH_4);
> - *Metanogênicas hidrogenotróficas*, que utilizam o gás carbônico, como fonte de carbono e aceptor final de elétrons, e o hidrogênio, como fonte de energia (o hidrogênio funciona como um agente redutor). Nessas circunstâncias, parte do gás carbônico reage com o hidrogênio para produzir metano, o qual produz uma força próton-motiva na membrana, para sintetizar ATP. (CHERNICHARO e LEMOS, 2007, p.37).

A produção de metano pode se dar por meio da decomposição do ácido acético, onde envolve o grupo de bactérias metanogênicas acetoclásticas. Como na equação (1), o grupo metil é reduzido a metano e o agrupamento carboxílico é oxidado a gás carbônico:

$$CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO_2 \qquad (2)$$

Também, pode ocorrer pela redução do gás carbônico, como na equação (2), pois ele está presente em proporções significativas nos sistemas anaeróbios, e por isso não é o fator limitante na etapa. Essa reação é conduzida por bactérias do grupo hidrogenotróficas:

$$CO_2 + 4\ H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O \qquad (3)$$

Por fim, na etapa chamada sulfetogênese os sulfatos, sulfitos e compostos sufurados são reduzidos a sulfeto, produzindo como produto final o sulfeto de hidrogênio. A sulfetogênese, se considerada a eficiência de remoção de DQO (demanda química de oxigênio) da fase líquida, é mais efetiva que a metanogênese, porém isso leva à produção do gás sulfídrico ocasionando problemas de corrosão,

toxicidade, mau cheiro e não produção do metano (Chernicharo e Lemos, 2007). Essa etapa não é considerada no processo completo de produção do biogás por ser desfavorável ao produto final que se deseja alcançar utilizando lodo de ETE.

A vedação do biodigestor deve ser completa, pois caso haja a presença de ar passará produzir apenas dióxido de carbono. Para uma produção eficiente, devem ser utilizadas várias fontes de material, diversificando tipos de bactérias. (Cassini, 2003.)

TABELA 1 - ETAPAS DA BIODIGESTÃO E REAÇÕES ENVOLVIDAS

Etapa	***Reação***
Hidrólise	Sacarose + H_2O → Glicose + Frutose
	Trioleína - Gordura + H_2O → Glicerina + Ácido Oleico
	Di-peptídeo - Proteína + H_2O → Aminoácidos
Acidogênese	Glicose + H_2O → Acetato + CO_2 + H^+ +H_2
	Glicose + H_2 → Propionato + H_2O + H^+
	Glicose → Butirato +CO_2 + H^+ + H_2
Acetogênese	Propionato + H_2O → Acetato + HCO3- + H^+ + H_2
	Propionato + $HCO3^-$ → Acetato + H^+ + HCOO
	Butirato + H_2O → Acetato + H^+ + H_2
Metanogênese	Acetato + H_2O → Metano + $HCO3^-$
	Formiato + H_2O + H^+ → Metano + HCO3-
	Propionato + H_2O → Metano + $HCO3^-$ + H^+

FONTE: Inocêncio (2023).

A produção do biogás é um processo satisfatório em estações de tratamento de esgoto, pois a conversão em energia pode ser reaproveitada no próprio ambiente ou externalizada para geração de renda. Porém, há alguns desafios na utilização dos reatores os quais podem implicar perdas significativas na eficiência de conversão, limitando o produto final e emitindo gases de efeito estufa em volumes significativos, devendo, portanto, ter atenção ao tipo de projeto, construção, operação e escolha do determinado reator (Posseti *et al*; 2018). Resíduos orgânicos como restos de alimentos e agroindústria são comumente utilizados como misturas em proporção suficiente que permita o enriquecimento de resíduos menos nobres em biodigestão.

A alimentação do reator utilizado para processos anaeróbios pode ser pelo formato de batelada. A matéria é adicionada e ocorre a inoculação do microrganismo

no substrato seguida de sua incubação por um período estabelecido em condições controladas, após a fermentação o biodigestor é descarregado. (Schmidell, 2021). Cabe salientar que a sazonalidade é considerada, pois os resíduos nesse caso não necessitam de abastecimento permanente.

Há também a forma de processo contínuo, no qual a carga diária corresponde ao volume semelhante de fermentado. O movimento da biomassa se dá por diferença de carga entre a entrada de substrato e a saída de biofertilizante. A desvantagem desse tipo de desempenho consiste na trituração dos resíduos vegetais e diluição da matéria prima para evitar entupimentos, porém, é compensado pela possibilidade de tratamento a pequenas quantidades de rejeito continuamente, e a produção de biofertilizantes e biogás na mesma unidade (Carvalho e Neto, 2012).

No estudo de Inocêncio (2023), foram traçados os microrganismos comumente encontrados na mistura de substratos de lodo de ETE com resíduos de orgânicos. Sendo eles: BHI (*Brain Heart Infusion*), que podem conter uma variedade de bactérias, incluindo *Staphylococcus aureus, Streptococcus pyogenes, Streptococcus pneumoniae, Enterococcus faecalis, Lactobacillus acidophilus, Lactobacillus casei, Bacillus subtilis, Escherichia coli, Pseudomonas aeruginosa e Salmonella enterica ;* PDA (*Potato dextrose Agar*), que *é seletivo para fungos,* como *Aspergillus flavus, Aspergillus fumigatus, Aspergillus niger, Penicillium, Fusarium, Candida e Rhizopus,* e; MRS (*de Man, Rogosa E Sharpe),* que é específico para *lactobacilos, incluindo Lactobacillus acidophilus, Lactobacillus plantarum, Lactobacillus casei, Lactobacillus brevis, Lactobacillus bulgaricus, Lactobacillus fermentum, Pediococcus acidilactici, Pediococcus pentosaceus* e *Leuconostoc mesenteroides*. Isso permite um traçado de melhorias quando utilizada a mistura.

Os modelos de biodigestores comumente encontrados no Brasil são de lagoa coberta (BLC), UASB, CSTR e fase sólida (*dry digestion*). Ao longo do trabalho serão caracterizados alguns dos modelos, bem como formas de alimentação.

A temperatura influencia diretamente o meio para fermentação, pois as bactérias que fazem a digestão do material orgânico sobrevivem no intervalo de 5º a 60º, em sua maioria. Apesar de existirem grupos de bactérias para cada espaço de temperatura, no Brasil, as mais utilizadas e adaptáveis ao ambiente são as

mesofílicas, pois sobrevivem na temperatura de 45º até 75º (Motta, 1986). Também, a velocidade de crescimento e metabolismo dos microrganismos são influenciadas por esse fator, a exemplo das arqueas acetoclásticas sendo mais sensíveis ao aumento da temperatura e, termodinamicamente, reações endotérmicas serem favorecidas pelo aumento da temperatura e as exotérmicas energicamente menos favoráveis (Kunz *et al*, 2019).

O aumento da temperatura favorece a velocidade de reações bioquímicas, eliminação de patógenos, aumento da solubilidade entre outros fatores contribuintes para uma boa reação em cadeia. Porém, deve-se atentar ao fato da dissociação da amônia que pode se tornar tóxica às bactérias metanogênicas causando desequilíbrio iônico e deficiência de potássio. Para evitar tal problema, deve ser garantida a variação de temperatura dentro de 2ºC, garantindo estabilidade do sistema e uniformização na produção de biogás (Kunz *et al,* 209).

O pH deve ser controlado na fermentação, pois nos primeiros dias é produzida grande quantidade de ácidos e ao passar do tempo com a ação das bactérias metanogênicas tende a ser consumido e neutralizado. Ou seja, o gás não tem boa produção em ambientes ácidos. Em contrapartida, se o ambiente está muito alcalino, caracterizando excesso de proteína na carga inicial devido à presença de íons amônia, a produção também cai (Motta, 1986).

Portanto, para um biodigestor operar corretamente, a faixa indicativa de pH deve estar entre 6,5 e 7,5. Se o meio estiver muito ácido, deve-se deixar de alimentá-lo por alguns dias, média de 3, mas só pode ser feito tal procedimento em biodigestores pequenos e de fácil controle. Para maiores e que utilizam de tratamento de esgoto urbano, o meio deve ser corrigido com adição do hidróxido de cálcio, sódio ou pode ser utilizada a ureia. (Motta, 1986).

A escolha do reator irá depender de algumas variáveis. Conforme quadro 4, existem algumas formas de decisão que devem ser consideradas quando da escolha correta e forma apropriada para cada tipo de biodigestão.

QUADRO 4 - FATORES PARA ESCOLHA DO SISTEMA DE BIODIGESTÃO

Tecnologia	**Pontos-chave**	**Opções (continua)**
Sistema de alimentação	Tipo de biodigestor e de matéria-prima para alimentação	Alimentação descontínua para biodigestores de batelada Alimentação contínua ou semidescontínua para fluxo em pistão/digestores CSTR Sistema de alimentação sólido ou líquido,

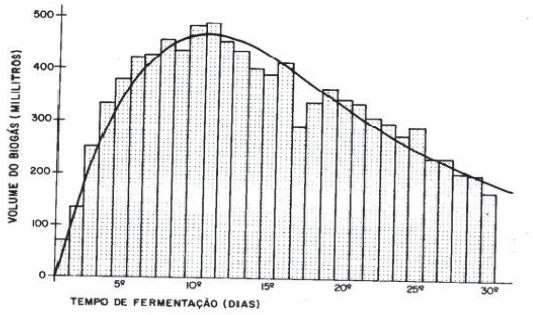
		dependendo do conteúdo da matéria seca do substrato
Temperatura do reator	Risco para patógenos	Temperaturas mesofílicas quando não há risco de patógenos Temperaturas termofílicas quando houver risco de patógenos
Tecnologia	**Pontos-chave**	**Opções**
Número de fases	Composição de substratos, risco de acidificação	Sistemas de uma fase quando não há risco de acidificação Sistema de duas fases para substratos com um elevado teor de açúcar, amido, proteínas ou de difícil degradação
Sistema de agitação	Matéria-prima seca para alimentação	Agitadores mecânicos para alta concentração de sólidos no biodigestor Sistema de agitação mecânica, hidráulica ou pneumática para baixa concentração de sólidos no biodigestor

FONTE: Kunz, 2019.

Outra variante extremamente importante no processo trata-se do tempo de retenção para que as bactérias produzam o material e permaneçam ativas no meio. Conforme demonstrado na figura 4, nos primeiros dias, por estar mais ácido aparece maior volume de dióxido de carbono, no entanto, ao passar os dias os microrganismos se reproduzem e alcançam a estabilidade, formando maiores quantidades de biogás. O tempo depende da temperatura em que o ambiente se encontra para se ter uma produção próxima ao máximo (Motta, 1986).

A digestão anaeróbia possui como principais ácidos voláteis intermediários para formar o metano, o acético e propiônico. Esse é resultado da fermentação das proteínas e carboidratos, e corresponde a 30% antes de ser transformado em metano. Já aquele, é encontrado em maior quantidade e é formado por quase todos os carboidratos, a ele corresponde 72% do metano formado dos lodos de ETE. Juntos, representam 85% da produção para conversão em metano, os 15% restantes são provenientes de ácidos como fórmico e butírico (Chernicharo e Lemos, 2007).

FIGURA 6 - VARIAÇÃO DO VOLUME EM FUNÇÃO DO TEMPO



FONTE: Motta, 1986.

Além das limitações termodinâmicas, a escolha do reator e concentração da água residuária são fundamentais para uma boa eficiência do processo. Um reator adequado permitirá a efetiva separação das fases acidogênica, acetogênica e metanogênica (Chernicharo e Lemos, 2007).

O quadro 5 exemplifica e evidencia as características e limitações do processo descrito, servindo de parâmetro para uma melhor escolha do modelo do reator. Cabe salientar que os modelos demonstrados são utilizados comumente em estações de tratamento de lodo de esgoto doméstico, não se aplicando, portanto, a tratamentos industriais os quais demandam melhor conhecimento do composto envolvido e outras demandas físico-químicas específicas.

QUADRO 5 - CARACTERÍSTICAS TÍPICAS E LIMITAÇÕES TEÓRICAS DE REATORES ANAERÓBIOS ALIMENTADOS COM ESGOTO DOMÉSTICO

TIPO DE REATOR	**CARACTERÍSTICAS PRÁTICAS**			**POTENCIAL LIMITAÇÃO TEÓRICA**	
	Retenção biomassa	***Separação de etapas metabólicas***	***Hidrodinâmica***	***Cinética***	***Resistência à transferência de massa***
UASB	Média-Alta	Baixa floculação	Misto	Média-Alta	Média-Baixa
Filtro Anaeróbio	Média-Alta	Média-Baixa (biofilme)	Misto	Média-Alta	Alta
Reator de leito Granular Expandido	Média-Alta	Média granulação	Favorece a mistura completa	Alta	Média-Alta
Reator Compartimentado	Média-Baixa	Média-Alta granulação e floculação	Favorece o fluxo pistonado	Baixa	Média-Alta
Lagoa Anaeróbia	Baixa	Baixa floculação	Misto	Alta	Baixa
Reator de Membrana	Alta	Baixa floculação	Favorece a mistura completa	Alta	Baixa

FONTE: Chernicharo (2007).

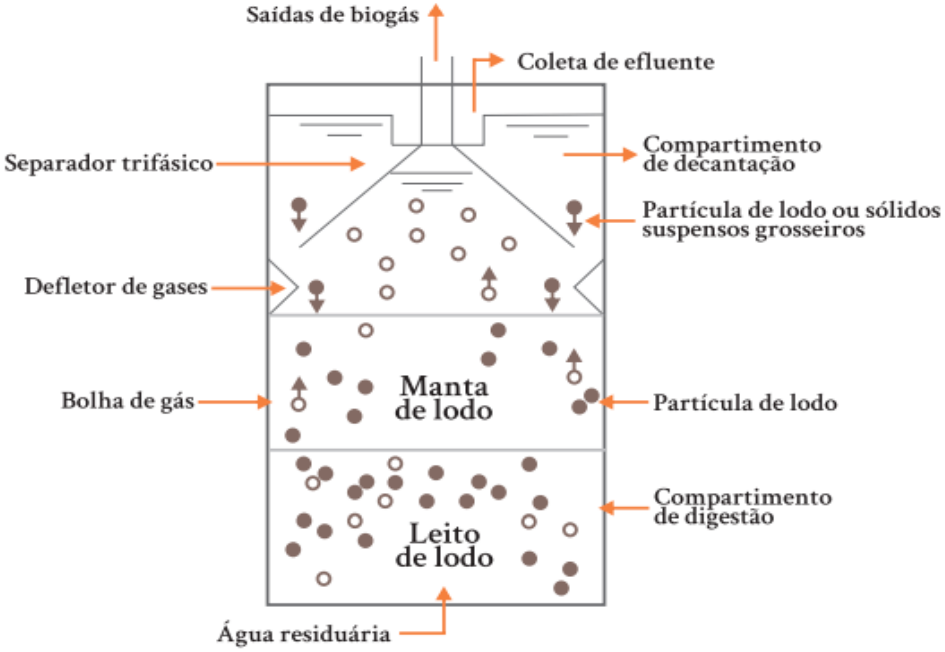
Em EPA (2023), os digestores anaeróbicos diferem-se por meio da temperatura de operação ajustada, teor de umidade (se mais úmidos processam matéria-prima com teor de sólidos inferior a 15%, se mais secos, será superior a esse percentual), tipo de matéria-prima e modo de operação. Podem ser empregados nesse processo vários tipos de resíduos que, a depender, vão ter mais facilidade para formação do meio biológico, podendo ser empregada a co-digestão.

3.5 REATORES ANAERÓBIOS

Para tratamento de esgoto doméstico, são utilizados diversos tipos de reatores. Atualmente o tipo de manta de lodo (UASB) está consolidado e possui uma boa viabilidade pois possui baixo custo para ser implementado, consome pouca energia, tem uma remoção eficiente de DQO e DBO (65-75%, respectivamente) e necessita de pouca área para instalação. Alguns problemas envolvendo esse tipo de reator podem ocorrer sendo ocasionados pela obstrução dos dispositivos de entrada e saída, pela geração de odores e formação de espuma (Chernicharo e Lemos, 2007).

Com o objetivo de determinar as dimensões e volume para esse tipo de reator, se faz necessário considerar a carga orgânica volumétrica, velocidade superficial e volume de tratamento (manta de lodo, chamada de biomassa ativa). Alguns efluentes agroindustriais possuem concentrações de matéria orgânica consideráveis e baixa concentração de sólidos voláteis tornando o uso do reator UASB propício para a estabilização e produção (Kunz *et al*, 2019). Na figura 5, pode ser observado o funcionamento desse tipo de reator e suas respectivas fases.

FIGURA 7 - ESQUEMA DE UM REATOR UASB



FONTE: Kunz et al, 2019.

Com a produção do biogás, é possível reduzir emissões do efeito estufa quase em sua totalidade de produção, considerando suas diferentes vias de aproveitamento como fertilizantes e aterros. A densidade do biogás do lodo de estações de tratamento de água é estimada em 1,1 kg/m3, sendo superior ao metano puro, 0.72 kg/m3, (Swedish Gas Tecnology Centre, 2012). Em FGV (2023b), o biogás tem como densidade adotada 1,15 Kg/Nm^3.

O poder calorífico tem relação direta com a quantidade de pureza referente ao teor de metano encontrado na mistura de biogás, exemplo para 60% de metano têm-se 5.500 kcal/m^3 de poder calorífico inferior (Cassini, 2003). Para Swedish Gas Tecnology Centre, valores similares são encontrados para composição de 65% de metano, poder calorífico inferior de 20 MJ/kg.

3.6 BIODIGESTORES *CONTINUOUS STIRRED TANK REACTOR*

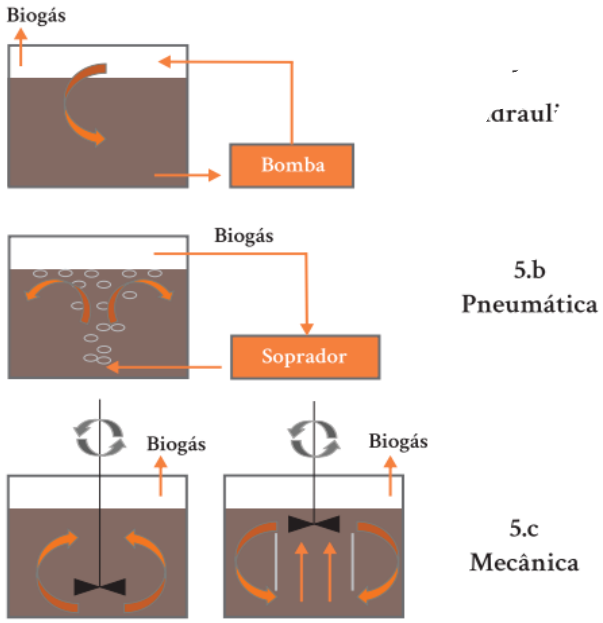
Esse tipo de reator é amplamente utilizado devido a suportar altas cargas orgânicas volumétricas e possuir homogeneização constante. Quando a concentração de sólidos é elevada e ocorre mistura de substratos, a configuração para o processo é favorecida. O tempo de retenção hidráulica e o tempo de retenção de sólidos são iguais pois não existe acúmulo no reator (Kunz *et al*, 2019). O TRH (tempo de retenção hidráulica) mínimo para o reator comumente utilizado é de 15 a 20 dias, variando em função do tipo de substrato (Kunz *et al*, 2019).

A agitação presente nesse tipo de reator eleva o custo de implementação e operação, porém contribui na transferência de calor mantendo os sólidos em suspensão em contato contínuo, promovendo uniformização do processo e diminuindo crostas. A intensidade e tempo são aspectos importantes, pois, pode ocorrer produção de escuma excessiva se muito agitado ou interferir na separação de fases, devendo ser observado teor de sólidos, viscosidade, teor de gorduras e substâncias tensoativas para adequação de tais fatores (Kunz *et al*, 2019).

Ademais, a agitação pode ser dividida em mecânica, hidráulica ou pneumática. A hidráulica recircula do interior do biodigestor por meio de bombas hidráulicas, podendo estar localizadas internamente ou externamente. Já a pneumática causa borbulhamento no líquido ou pode ser fornecido pelo processo conhecido como *gas lift* (elevação de gás). Finalmente, a mecânica apresenta

intensidades diferentes de agitação, sendo, portanto, a mais utilizada (Kunz *et al*, 2019). A figura 6 exemplifica os diferentes tipos de agitação abordados. Existem diversos tipos de biodigestores e a escolha deve considerar alguns fatores como local, substratos utilizados, investimento entre outros que impactam diretamente na produção (Filho, 1981).

FIGURA 8 - EXEMPLOS DE MODOS DE AGITAÇÃO EM UM REATOR CSTR



FONTE: Kunz et al, 2019.

3.7 LEGISLAÇÃO NO BRASIL

A preocupação com o meio ambiente sempre foi pensada e estruturada de tal maneira que unissem interesses individuais e coletivos em prol da humanidade. Prova disso é a Constituição Federal de 1988 que já trazia em seu capítulo VI, art. 225:

> Art. 225 – Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações. (Brasil, 1988).

A tecnologia social, conhecida pelo MDL, dissemina conhecimento e envolvimento de toda comunidade, propiciando avanços tecnológicos em prol de

desenvolvimento e transformação social, buscando alternativas sustentáveis ligadas à proteção do meio ambiente, disposição de recursos, saneamento, entre outros (Fundação Banco do Brasil, 2010).

No contexto envolvendo energias alternativas, foi publicado pelo Ministério de Minas e Energia e Empresa de Pesquisa Energéticas, em 2020, o Plano Nacional de Energia 2020. Nele, são evidenciados os pontos da transição energética envolvendo a descarbonização, descentralização de recursos energéticos e aumento da digitalização na produção de energia – os chamados 3 D's (Berni, 2021).

O estímulo à utilização de energias menos poluentes, com maior possibilidade de eletrificação no processo e concentração em automação, produzindo um sistema renovável e limpo que considera a economia circular, deve ser realizado de maneira conjunta e equilibrada dos 3 D's, utilizando como fontes de expansão a biomassa, energia solar, eólica, gás natural, hidrelétrica (Berni, 2021).

Como descarbonização se entende a redução das emissões de GEE. Segundo a Agência Internacional para as Energias Renováveis (IRENA) a redução de carbono para a atmosfera pode chegar a 90% com a transição energética. Para descentralização, as várias formas de energia devem ser utilizadas em fontes variáveis, produzindo uma cadeia de processos e otimização. E para digitalização, a introdução de Inteligência Artificial promove uma melhor tomada de decisões usando um cenário modelado antes da realização propriamente dita (Berni, 2021).

O Programa Nacional de Redução de emissões de Metano – Metano Zero, foi instituído pela Portaria MMA nº 71, de 21 de março de 2022. Tal normativa busca apoiar os compromissos acordados pelo país na Convenção das Nações Unidas, Pacto de Glasgow e Acordo Global de Metano.

No art. 3º da referida portaria, são elencados objetivos, dentre eles:

> I. A redução das emissões de metano;
> II. O uso sustentável de biogás e biometano como fontes renováveis de energia e combustível;
> III. Fomentar acordos setoriais visando ao uso sustentável de biogás e biometano à redução das emissões de metano;

Como parte do art. 4º da referida portaria, existe ainda o estímulo a medidas e mecanismos de redução das emissões do metano. Isso pode ser alcançado por meio de alternativas utilizando biogás como fonte de energia para diversos meios, pois constitui importante produto final de valor ambiental agregado e que contribui para as diretrizes do Programa Metano Zero.

Na 26 Conferência, ocorrida em Glasgow na Escócia em 03 de novembro de 2022, houve o anúncio de que o Brasil passará a ter 50% de matriz energética limpa até 2030, passando a meta para aumento de 2%. A redução das emissões de carbono já passou dos 700 bilhões e com a nova capacidade o país ganhará visibilidade no setor (Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2022).

No Paraná, a resolução SEDEST 040 de 28 de setembro de 2023 instituiu o processo de adesão ao Registro Público de emissões de gases do efeito estufa, conhecido como Selo Clima Paraná. Por meio dessa resolução a organização inventariante, após cumprir os requisitos estabelecidos pela norma, recebe certificação chamada Certificado Selo Clima Paraná, que reconhece a responsabilidade e comprometimento com a sustentabilidade e a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas.

O Selo Clima Paraná tem previsão na Lei Estadual 17.133 de 2012 a qual Institui a Política Estadual sobre Mudança do Clima. Seus principais objetivos estão elencados no art. º4 da referida lei, sendo:

> I - Incentivar e implementar ações de controle e redução progressiva das emissões antrópicas por fontes e setores e a remoção por sumidouros, incluindo projetos voltados à geração de créditos de carbono e às Ações de Mitigação Nacionalmente Apropriadas, definidas pelo Governo Federal;
>
> II - Incentivar, implementar e monitorar políticas públicas para desenvolvimento de processos técnicos e tecnologias baseadas em recursos renováveis;
>
> III - identificar e avaliar os impactos das mudanças climáticas, definindo e implementando medidas de adaptação nas comunidades locais, em particular naquelas especialmente vulneráveis aos efeitos adversos;

As legislações estão cada vez mais voltadas ao equilíbrio entre meio ambiente e desenvolvimento e os gestores alinhados a objetivos e metas para redução nas mudanças climáticas, promovendo avanços nos setores sem comprometer recursos cada vez mais escassos. É de suma importância essa

discussão, pois os eventos têm sido severos, como chuvas em excesso a exemplo do que aconteceu recentemente no Rio Grande do Sul, fato já alertado e que passará a ser cada vez mais presente se nenhum caminho for repensado.

3.8 PROTOCOLO GHG

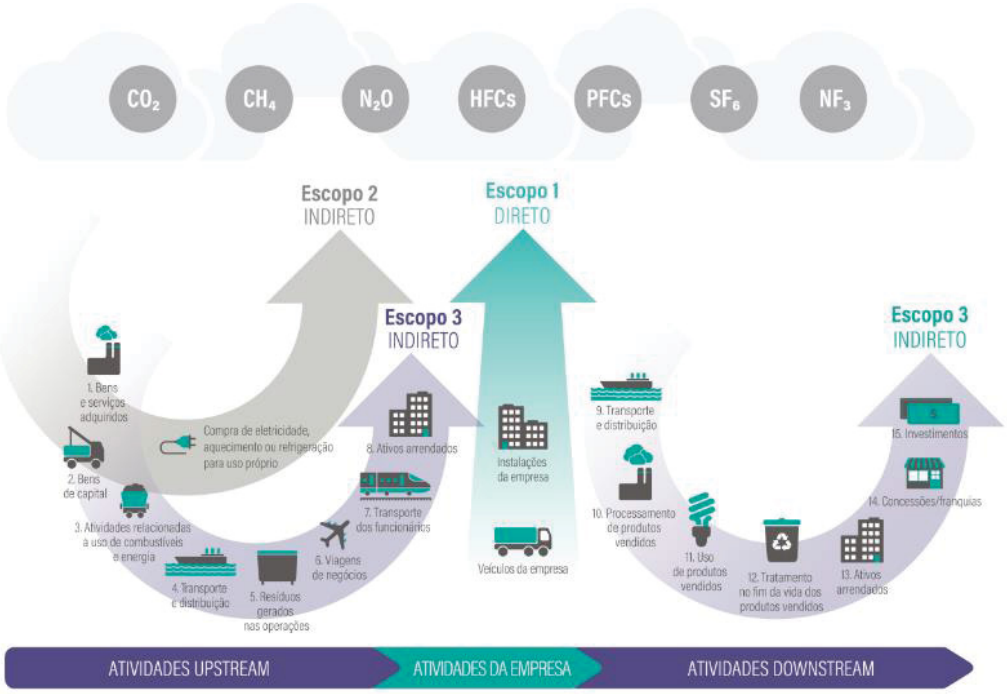
O Programa Brasileiro GHG Protocol (PBGHGP) foi criado em 2008, adaptado ao contexto nacional e desenvolvido pelo FGVes e WRI em parceria com o Ministério do Meio Ambiente, Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável (CEBDS), *World Bussines Council for Sustainable Development* (WBSCD) e outras 27 empresas fundadoras. Tal programa é compatível com as normas *International Organization for Standardization* (ISO), especificamente 14.064 e com as metodologias do Painel Intragovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) da Organização das Nações Unidas (FGV, 2023a). As organizações participantes do Programa GHG devem incluir, obrigatoriamente, em seus relatórios de emissões os seguintes gases regulados pelo Protocolo de Quioto: CO_2, CH_4, N_2O, SF_6, HFC's e PFC'S (Cetesb, 2009).

Visando o embasamento para mensuração de emissões e utilização de programas específicos, ocorreu, em 2007, a publicação da norma ABNT NBR ISO 14.064, referente aos gases do efeito estufa. Isso trouxe subsídios para as ferramentas de quantificação de GEE, sua utilização e aplicação (FGV, 2024). Em trecho da norma, cita:

> A série ABNT NBR 14060 fornece clareza e consistência para quantificar, monitorar, relatar e validar ou verificar as emissões e remoções de GEE para apoiar o desenvolvimento sustentável por meio de uma economia de baixo carbono e beneficiar organizações, proponentes de projetos e partes interessadas em todo o mundo."

Com o advento da normativa, buscou-se transparência e confiabilidade da quantificação. A seguir serão descritos, conforme a NBR 14.064 a definição de cada escopo utilizado para a quantificação de GEE. Conforme Figura 6, o Protocolo é dividido em 3 escopos e a seguir serão abordados detalhadamente cada um deles e suas fontes correlatas.

FIGURA 9 - VISÃO GERAL DOS ESCOPOS DO PROTOCOLO GHG E DAS EMISSÕES AO LONGO DA CADEIA DE VALOR.



FONTE: WRI (2024).

3.8.1 Escopo 1

Estas emissões referem-se a fontes diretas e sumidouros (processos que removem um GEE da atmosfera), os quais estão dentro do limite da organização, sendo propriedade ou controladas por essa. Alguns exemplos que a própria norma traz, podem ser fontes estacionárias por exemplo aquecedores, geradores de eletricidade, processo industrial ou móveis como por exemplo veículos.

Nesta categoria incluem-se:

- Emissões diretas de combustão estacionária – Os gases de efeito estufa são produzidos quando ocorre a queima de combustível, durante a qual ocorre o processo de oxidação. Normalmente, a energia gerada pela combustão é usada para produção de vapor de água ou eletricidade, sendo, portanto, considerada estacionária e não um meio de transporte (FGV, 2018a).
- Emissões diretas de combustão móvel – Definição semelhante à emissão anterior, porém a energia gerada pela queima é utilizada para locomoção durante um trajeto. Convém ressaltar que viagens fora do limite organizacional como transporte de funcionários, a trabalho entre outras, devem ser consideradas “indiretas”, sendo enquadradas como escopo 3 (FGV, 2018a).

- Emissões e remoções diretas de processos dos processos industriais – Decorrentes da transformação química ou física de materiais, a qual não inclui a combustão. Liberadas em processos industriais como produção de cal, cimento e refino do petróleo, por exemplo (FGV, 2018a).
- Emissões diretas de resíduos sólidos e efluentes líquidos – Podem ser provenientes do tratamento de efluentes, aterros, incineração, compostagem entre outros que sejam lançados para a atmosfera (FGV, 2018a).
- Emissões fugitivas – São em sua maioria geradas por processos não intencionais e que não passam por meio filtrante como chaminés, drenos ou dutos. O escape ocorre no momento da produção, no armazenamento, na transmissão ou no uso do gás (FGV, 2018a).
- Emissões agrícolas – Compreende todas as emissões não mecânicas relacionadas à agricultura, como queimada controlada, manejo florestal adequado, uso de fertilizantes, entre outros (FGV, 2018a).
- Emissões de mudança no uso do solo – Advém de lançamentos não mecânicos, que promovam variação no estoque de carbono (remoção, quando há aumento ou emissão quando diminui e N_2O passa a ser emitido). Isso pode ocorrer quando se altera floresta para lavoura, por exemplo, ou até mesmo na diversificação de plantio (FGV, 2018a).

3.8.2 Escopo 2

Nessa categoria estão incluídas apenas emissões de GEE relacionadas à atividade da organização como eletricidade, vapor ou ar comprimido. São ditas “importadas” por serem fornecidas mediante compra e consumo (NBR 14060).

Podem ser utilizadas duas abordagens para contabilização: Abordagem baseada na localização (*location-based*), baseado na média das emissões para geração de energia elétrica em um sistema elétrico (*grid*), por meio do tempo e localidade e abordagem baseada na escolha de compra (*market-based*) considerando todas as opções de eletricidade adquiridas pela organização, não sendo relacionadas ao *grid*. Somente a primeira é obrigatória no PBGHGP (FGV, 2018b).

3.8.3 Escopo 3

Para contabilização dessa categoria são incluídas todas as emissões de combustão advindas de fora da organização como as geradas por fontes móveis aérea, terrestre ou marítima, seja para transporte de pessoas ou produtos. Caso tais operações forem controladas diretamente pelo empreendimento, deverão ser incluídas no escopo 1 (FGV, 2018c).

As emissões desse conjunto são subdividas em dois outros tipos, a saber:

- *Upstream* – São consideradas emissões indiretas de GEE associadas a bens e serviços que são pagos pela organização, ou seja, tudo que ocorre antes da etapa de recepção de tais atividades. Podem ser bens e serviços comprados, bens de capital, atividades relacionadas com combustível e energia não inclusas nos Escopos 1 e 2, transporte e distribuição, resíduos gerados na operação, viagens a negócio, deslocamento de funcionários no trajeto casa-trabalho e bens arrendados (arrendatária).
- *Downstream* – Também consideradas como emissões indiretas de GEE, porém relativas a bens e serviços não comprados pela companhia, mas sim vendidos. Aqui entram operações de logística, processamento de produtos e uso de bens vendidos, tratamento de fim de vida, bens arrendados (arrendadora), franquias e investimentos.

Os escopos relatados compõem a planilha do GHG Protocol, tendo cada aba descrita acima, em relação aos levantamentos das emissões e suas respectivas relações com o empreendimento.

3.8.4 Variáveis e resultados da Planilha

A densidade do biogás do lodo de estações de tratamento de água é estimada em 1,1 kg/m3, sendo superior ao metano puro, 0.72 kg/m3, (Swedish Gas Tecnology Centre, 2012). Em FGV (2023b), o biogás tem como densidade adotada 1,15 Kg/Nm^3, valor aplicado no presente estudo para entrada na planilha GHG e conversões.

O CO_2e (dióxido de carbono equivalente) é determinado por meio da multiplicação da quantidade de um determinado GEE pela taxa de potencial do

aquecimento global (NBR 14060). O CO_2e é tido como uma combinação ajustada de poluentes que contribuem para as mudanças climáticas por meio de seu potencial de aquecimento global (EPA, 2023).

Conforme indicação EPA (2023), a fórmula global utilizada para obtenção das emissões do CO_2e é indicada na equação 3 abaixo. Os valores comumente utilizados para GWP estão localizados no quadro 6 do presente trabalho e possuem um grau de incerteza de aproximadamente 40%.

$$\text{Kg } CO_2e = (\text{Kg emissão do gás}) \times (\text{GWP}) \quad (4)$$

O CO_2 biogênico, tido como carbono derivado da biomassa – material de origem biológica como árvores, resíduos de origem biológica, estrume, animais, culturas, gramíneas, lixo de árvores e algas – segundo definição da NBR ISO 14064, é muito promissor e é cada vez mais utilizado na produção de biogás, pois existe a busca da economia sustentável com ciclo fechado de carbono, e considerado, portanto, renovável. Sendo visto como carbono neutro de fontes existentes, têm tido cada vez mais atenção no mercado, pois a economia global só pode ser considerada neutra em carbono se possuir um mercado consolidado em novos processos de energia renováveis, consideradas limpas (Rodin et al, 2020).

3.9 EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA

A necessidade de reversão dos índices de poluição e diminuição no impacto ambiental por empresas geradoras de grandes emissões reuniu diversos países buscando alternativas para atenuar o cenário. Assim, surgiu o Protocolo de Quioto, em 1997, formado por 55 países contemplando medidas adicionais à redução da emissão e remoção dos gases do efeito estufa, sendo: comércio de emissões, implementação conjunta e Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) - (Chagas *et al*, 2022).

Os países que entraram no acordo de Quioto comprometeram-se a investir em pesquisas e substituir fontes energéticas poluidoras, bem como aplicar sanções às indústrias que não cooperassem para atingir as metas propostas. Embora o Brasil não possua metas para redução de emissão, o esforço voluntário é tido como benefício em prol do mecanismo de desenvolvimento limpo (Chagas *et al*, 2022).

O Protocolo de Quioto teve seu declínio quando da não ratificação dos Estados Unidos, a saída do Canadá e a falta de controle na redução das emissões praticadas. Assim, surgiu a necessidade de um novo consenso sobre mudanças climáticas que fosse efetivamente aplicável e equilibrado aos países desenvolvidos. (Albuquerque e Couto, 2022).

O Acordo de Paris trouxe uma nova forma de resgatar os pactos do Protocolo, porém baseados em compromissos entre todos os países emergentes e desenvolvidos, produzindo equidade e trazendo temas importantes e comuns para além das questões climáticas, apenas. (Albuquerque e Couto, 2022).

Em abril de 2023, o Acordo de Paris já havia sido retificado por 196 países e figura nas Conferências sobre o clima. A importância dessa discussão ocorre porque há consenso de que não se deve apenas produzir e gerar lucro a qualquer custo, pois o planeta não suportará o processo que vem sendo utilizado desde a Revolução Industrial, a exemplo das grandes mudanças climáticas que estão acontecendo. (Albuquerque e Couto, 2022).

O GWP (Global Warming Potential) foi desenvolvido pelo IPCC e compara a capacidade de reter calor na atmosfera de um gás do efeito estufa com outro gás. Portanto um GWP torna-se quantificável dessa forma e têm como definição a razão entre a força radioativa acumulada dentro de um tempo específico pela emissão de 1 quilograma de gás em relação ao gás de referência CO_2, sendo fornecida em milhões de toneladas métricas de equivalente de CO_2 (EPA, 2024).

Entretanto, decisões recentes firmadas entre o Acordo de Paris e COP 27 formalizaram a utilização dos valores em um horizonte de 100 anos a fim de padronizar a comparação das métricas dos gases e atualizar a escaldada do aquecimento global, conforme quadro 6. Tais valores são atualizados constantemente com base nos relatórios anuais disponíveis da Agencia de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, sigla em inglês EPA.

Conforme EPA (2023), os componentes escolhidos referem-se a gases do efeito estufa com vidas longas na atmosfera e que possuem distribuição uniforme na camada de ozônio; diferentemente de vapor d’água, monóxido de carbono, entre outros, que a depender da regionalidade podem ser mais ou menos concentrados dificultando a quantificação de seus impactos.

QUADRO 6 - POTENCIAIS DO AQUECIMENTO GLOBAL PARA UM HORIZONTE DE 100 ANOS UTILIZADOS NOS RELATÓRIOS DE EMISSÕES.

Gás	**GWP**
CO_2	1
CH_4	28
N_2O	265
HFC's	Até 12400
PFC's	Até 11100
SF_6	23500

FONTE: EPA (2024).

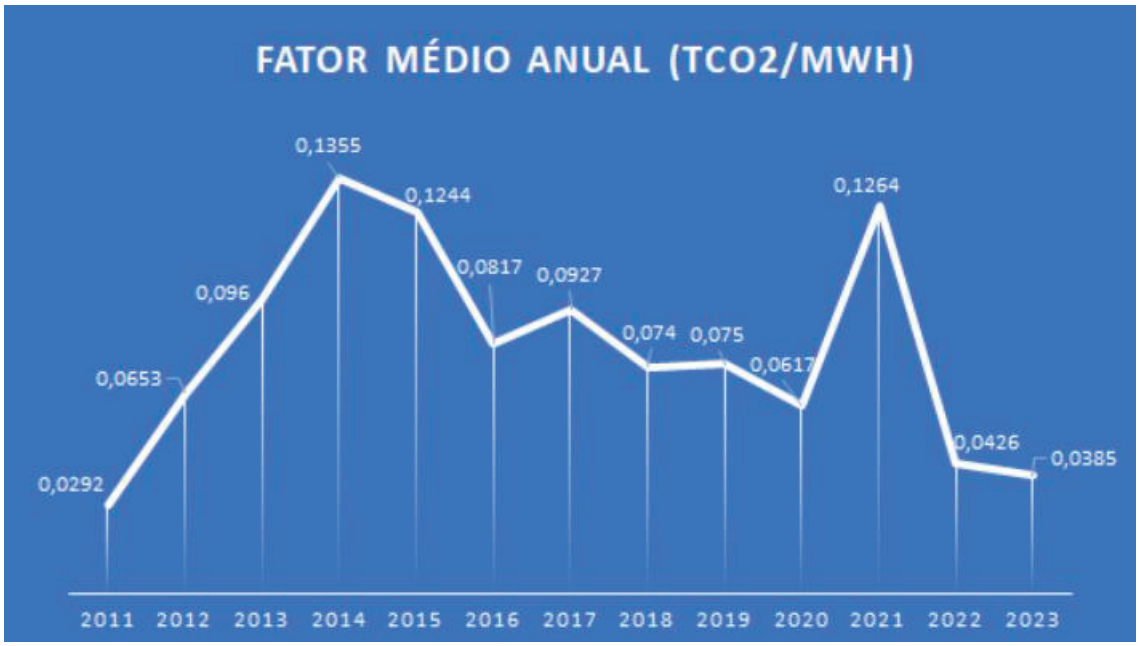
Ainda, EPA (2023) define três principais categorias de digestão anaeróbica a serem incluídas nos inventários de gases do efeito estufa, sendo:

- Digestão anaeróbica em instalações de biogás ou digestores independentes dedicados à indústria (alimentos ou bebidas) ou múltiplas fontes (várias matérias primas)
- Digestão utilizando resíduos agropecuários que reduzem o odor, encontrados principalmente em suinocultura, leiteiras e avícolas, utilizando o metano para conversão de energia. Nesse tipo de processo podem ser utilizados resíduos alimentares na co-digestão.
- Digestão em instalações de recursos hídricos que produzem biogás por meio do tratamento e redução de sólidos.

As iniciativas do MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo) devem apresentar benefícios efetivos, que possam ser medidos a longo prazo e estarem relacionados à redução das emissões dos gases do efeito estufa ou ao aumento da remoção de CO2, podendo envolver projetos de substituição de energias fósseis por renováveis, ações de reflorestamento entre outras medidas relacionadas (Frondizi, 2009).

Além disso, no mercado voluntário de emissões, o valor dos certificados é determinado por uma série de fatores, incluindo características do projeto, demanda e condições do mercado. No entanto, projetos que oferecem retorno significativo para as comunidades locais e que trazem benefícios econômicos tendem a ter um valor a mais agregado (Oliveira, 2022).

FIGURA 10 - FATOR MÉDIO ANUAL



FONTE: Ministério da Ciência e Tecnologia (2024).

O fator médio de emissões é uma medida que avalia o impacto ambiental da geração de energia elétrica, considerando a quantidade de poluentes emitidos durante esse processo. No Brasil, esse fator leva em conta a energia fornecida ao Sistema Interligado Nacional (SIN), que é coordenado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). A contribuição da geração de eletricidade a partir de combustíveis fósseis, como óleo e carvão mineral, é crucial para determinar esse fator. Quanto maior a proporção de energia proveniente dessas fontes, maior será o fator médio de emissões, uma vez que a queima de combustíveis fósseis é uma das principais fontes de emissões de gases poluentes. Assim, reduzir o fator médio de emissões é um objetivo importante para promover uma matriz energética mais limpa e sustentável, com menor impacto ambiental (Brasil, 2024).

O metano, um dos maiores influenciadores do efeito estufa, possui vida útil atmosférica de aproximadamente 12 anos. Assim, conforme existir a redução da emissão desse gás na atmosfera, o impacto nas mudanças climáticas responderá rapidamente (Zeng et al, 2023).

No Paraná, as mudanças climáticas também se tornaram relevantes nas últimas décadas e sobre isso, foi instituída a lei nº 19.500 de 21 de maio de 2018, que dispõe sobre a Política Estadual do Biogás e Biometano e adota outras providências. Em seu art. 1º:

> Institui a Política Estadual do Biogás, do Biometano e demais produtos e direitos derivados da decomposição de matéria orgânica (biodigestão), a qual estabelece princípios, regras, obrigações e instrumentos de organização, incentivos, fiscalização e apoio às cadeias produtivas, integradas ou não, visando ao enfrentamento das mudanças climáticas e à promoção do desenvolvimento regional com sustentabilidade ambiental, econômica e social.

Considerando a emissão de gases do efeito estufa, o biogás contribui para vários cenários, como redução no despejo de resíduos orgânicos, decréscimo e substituição dos combustíveis fósseis como o GLP e uso de biofertilizantes ao remodelamento de fertilizantes tradicionais com alto teor de nitrogênio (Bekchanov et al, 2019).

Para o ano de 2022, segundo levantamento do SEEG, o Paraná ocupava o 13º lugar em emissões no ranking dos estados, contando com 71.902.311 tCO_{2e}. O principal emissor concentra-se na agropecuária, fato explicado devido ao Paraná compor um dos grandes produtores do ramo. Portanto, a importância em considerar não apenas a mitigação das emissões, mas também desenvolvimento sustentável das comunidades envolvidas, demonstra a conexão entre impacto social e valorização dos certificados.

3.10 ATERROS E EMISSÕES

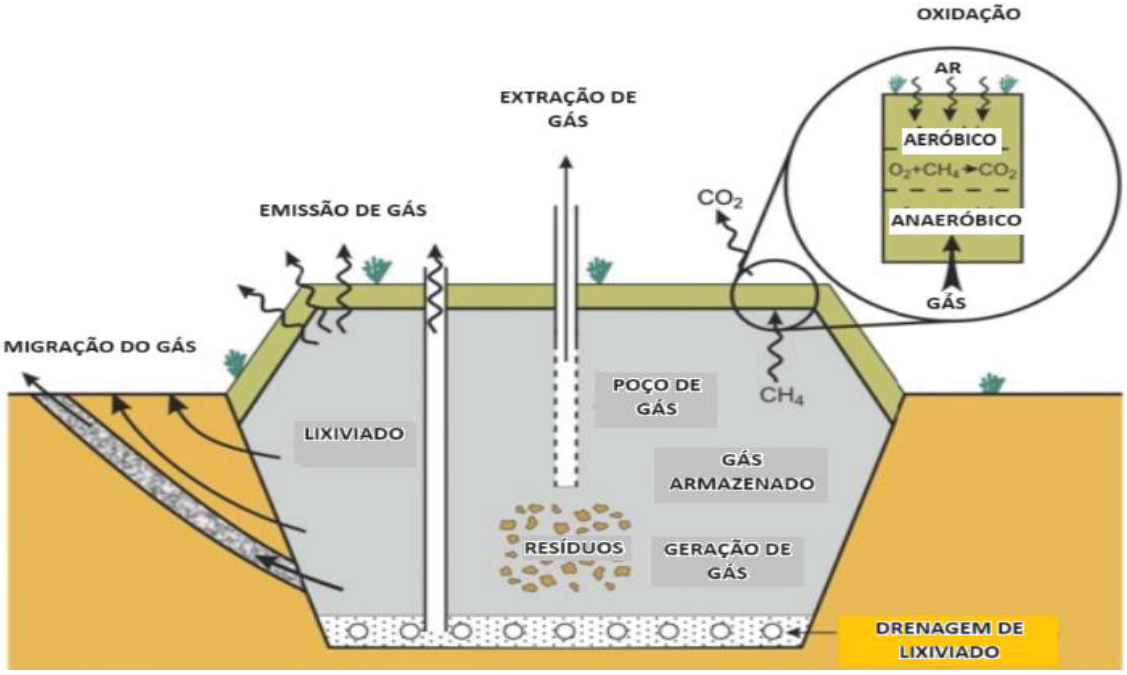
Segundo definição constante na Norma Brasileira (NBR) 9648, esgoto doméstico é tido como “Despejo líquido resultante do uso da água para a higiene e necessidades fisiológicas humanas”. Este é gerado pela água de abastecimento e quantificado pela água consumida (Nuvolari, 2011).

Conforme Nuvolari (2011), a destinação final do lodo de esgoto doméstico pode ser aterros específicos chamados *monofill*, ou até mesmo sanitários, misturados com o lixo doméstico. No Paraná, o lodo removido no tratamento de esgoto é acondicionado em caçambas e posteriormente enviado a aterros sanitários e outra parte é utilizada na agricultura (Sanepar,2023). No presente trabalho é considerado como destinação tradicional para esse resíduo o aterro sanitário, concentrando-se o maior percentual de descarte.

A fim de exemplificar as emissões emanadas em um aterro, a figura 7 indica o destino do CH_4 gerado pela decomposição dos resíduos, sendo as emissões de

gases o somatório de quatro etapas: CH_4 extraído e emitido para a atmosfera; CH_4 gerado e armazenado; CO_2 resultante do CH_4 oxidado na camada de cobertura e CO_2 da decomposição propriamente dita (Scheutz e Kjeldsen, 2019; Santos, J. J. N. Dos, 2023).

FIGURA 11 - EMISSÃO DE GASES EM ATERRO SANITÁRIO.



FONTE: Adaptado de Scheutz e Kjeldsen (2019).

Conforme Moreira (2020), devem ser observadas emissões fugitivas por meio desse sistema, pois apesar de existir recuperação energética, muito se perde na evaporação. Estima-se que as emissões de gases do efeito estufa aumentem em 17 % em um cenário sem alterações entre os anos de 2015 e 2030. Os anos de 1990 e 2015 registraram aumento de emissão em 29% (USEPA, 2024).

Ainda, segundo USEPA (2014), para o ano de 2025 os resíduos correspondem a 13,3% (1,775 $MtCO_2e$) das emissões de gases do efeito estufa, sendo que 61,2% (1,087 $MtCO_2e$) deste valor corresponde a aterros. Considerando isto, há influência de alguns fatores para variação dessas emissões, como pH, temperatura, composição e teor de umidade. Porém, deve existir um monitoramento adequado e que possa atuar significativamente nessa diminuição, já que o escape pode variar de 25 a 50% aproximadamente (Franqueto *et al*, 2020).

3.11 CRÉDITOS DE CARBONO

A emissão de gases do efeito estufa diminui o filtro de proteção do planeta, resultando no aumento da temperatura terrestre. Diante disso, há impactos generalizados promovendo secas, inundações, incêndios entre outros eventos que são cada vez mais frequentes no dia a dia das pessoas. A partir de então, surgiram acordos, protocolos para tentar frear as emissões advindas do crescimento acelerado de indústrias e demanda por energia buscando promover a descarbonização por métodos de compensação (Hernández & Bodnar, 2022).

Visando a necessidade de contenção do aquecimento global e redução das mudanças climáticas sem comprometer a economia, surgiram os créditos de carbono. Chamados de RCE (Redução Certificada de Emissão), são utilizadas por empresas como mecanismo adicional ao processo, porém para sua aplicação efetiva, há a necessidade de um projeto efetivando o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), seguindo as etapas de comitê executivo, autoridade designada e entidades operacionais (Chagas *et al*, 2022).

Uma unidade de RCE é equivalente a uma tonelada de dióxido de carbono, calculada de acordo com o Potencial de Aquecimento Global, sigla GWP traduzida do inglês. Esse potencial é utilizado para comparação entre as emissões dos gases do efeito estufa e seus acréscimos em dióxido de carbono lançados no ambiente. (Frondizi, 2009).

Um instrumento utilizado para a compensação das emissões produzidas por países desenvolvidos é chamado MDL, como já descrito anteriormente, realizando a compra de créditos de carbono de países em desenvolvimento, como o Brasil, por meio de manejo e valorização de áreas florestais, bem como programas de recuperação. As emissões provenientes dessa transação são compensadas pelo certificado de redução de emissões, que são transmutadas em ativos negociados no mercado voluntário. Um crédito de carbono equivale a 1 ton CO_2 que deixa de ser emitida. A negociação é realizada por meio de corretores diretamente na bolsa de valores e balcão como a Chicago Climate Exchange nos Estados Unidos (Hernández & Bodnar, 2022).

Os créditos de carbono constituem importante ferramenta econômica no mercado sustentável e pode ser calculado considerando diversas formas, entre eles o aproveitamento energético do biogás. Para isso, multiplica-se a energia gerada

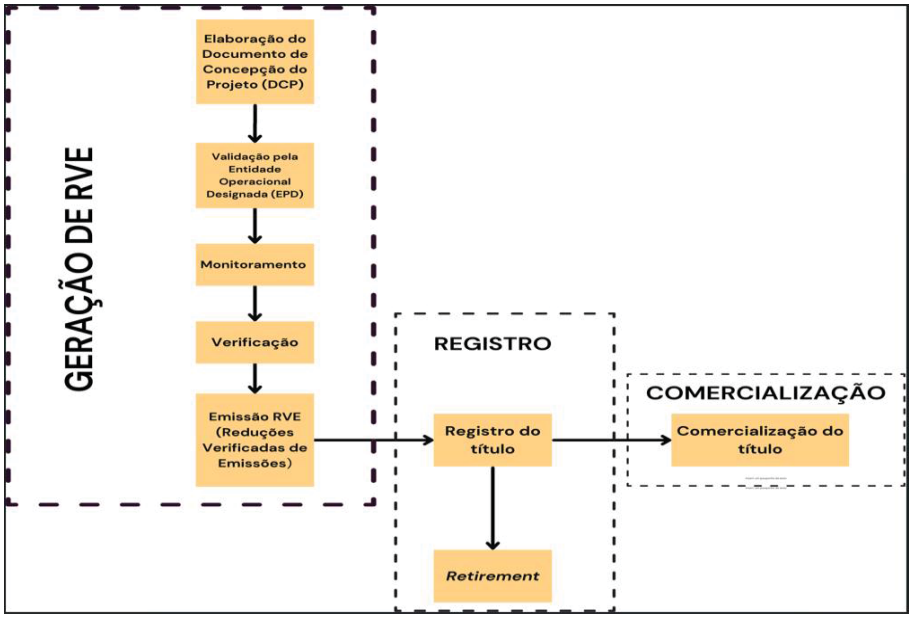
pelo fator de emissão médio (FEM) de CO2 disponibilizado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações anualmente, conforme Figura 6 (Almeida; Barbosa e Mendonça, 2024).

No Brasil, a Lei 12.187/2009 instituiu a Política Nacional sobre Mudança Climática (PNMC) e em seu art. 4º, inciso VIII preconizou estímulo ao desenvolvimento do Mercado Brasileiro de Redução de Emissões, chamado MBRE, operacionalizado por meio da Comissão de Valores Mobiliários (CVM), onde são negociados “títulos mobiliários representativos de emissões de gases de efeito estufa evitadas certificadas.” (Brasil, 2009, art. 4).

Pensando em meios de comercialização foi instituída a ABNT NBR 15948 a qual promove princípios, requisitos e orientações para a venda dos MBRE, ou simplesmente créditos de carbono. As etapas que a norma aborda estão dispostas no diagrama a seguir e devem ser combinadas com o uso da ABNT NBR ISO 14064, esta já abordada durante a execução do presente trabalho. As normas são diretrizes para o mercado em ascensão após a promulgação de alguns decretos sobre a regulamentação dos ativos.

A principal barreira para a comercialização é a criação de um sistema centralizado capaz de atender ao registro, rastreabilidade e contabilização dos ativos, impedindo a dupla contagem presente no mercado atual. Alguns estados já possuem legislações sobre o funcionamento e incentivo à venda como São Paulo, Rio de Janeiro, Santa Catarina, Minas Gerais e Espírito Santo (Boechem, 2020).

FIGURA 12 - FLUXOGRAMA DO MERCADO VOLUNTÁRIO DE CARBONO



FONTE: ABNT NBR 15948 (2011).

Em 05 de junho de 2023, foi publicado o Decreto nº 11.550 o qual dispõe sobre o Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima, porém não faz menção a qualquer tipo de precificação, abarcando apenas a criação de um comitê para acompanhar as questões relacionadas à Política Nacional sobre Mudança do Clima. Portanto, no cenário atual o que se tem de mais próximo da regularização dos ativos é a Lei 13.576/2017 a qual instituiu a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio). Por meio desta, preconiza que os créditos de descarbonização, CBIO, podem ser negociados no mercado organizado, considerando inclusão de até mesmo leilões e será incidido imposto de renda nas transações (Silva, A. F., 2023).

No Paraná, tramita o PL 271/2024 no qual dispõe sobre a Política do Mercado Regulado de Créditos de Carbono no Estado do Paraná. A legislação trará transparência e adotará medidas específicas, buscando a uniformização do mercado.

No estudo de Cavalcanti (2024), um indicador provável a ser utilizado como suporte nas análises dos sistemas energéticos no Brasil é chamado de SCEA (Sistema de Contas Econômicas Ambientais de Energia). Nele podem ser estimados fluxos de energia e produção de informações para políticas públicas capazes de auxiliar nas demandas de planejamento energético e conservação. Os indicadores para suporte estão resumidos no quadro a seguir.

QUADRO 7 - ETAPAS E INDICADORES DO SCEA NO SUPORTE À GERAÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO

Etapa	**Ação**	**Resultados (continua)**
Definir o escopo da análise	Análise da geração de energia, distribuição, consumo e os setores de uso final	Listar e apresentar os valores quantitativos de cada um dos itens
Coleta de dados	Análise do consumo (eletricidade, combustíveis, energias renováveis e eficiência energética	Listar e apresentar os valores quantitativos à geração e consumo de energia
Etapa	**Ação**	**Resultados**
Identificação das emissões de GEE	Quantificar as emissões de GEE (escopos 1, 2 e 3 para GHG Protocol)	Listar e apresentar os valores quantitativos das emissões de GEE associados ao sistema energético

Avaliar a pegada de carbono	Apurar a soma de todas as emissões de GEE quantificadas no levantamento anterior	Listar e apresentar os valores quantitativos de todas as emissões de GEE
Identificação de oportunidades de redução de emissões	Identificar fontes de energia limpa, melhorias na eficiência energética e implementação de tecnologias de armazenamento e captura do carbono	Listar e apresentar as áreas onde as emissões de GEE podem ser reduzidas
Geração de créditos de carbono	Implementação de projetos de mitigação das emissões	Listar e apresentar as áreas e propostas de implementação de projetos de mitigação das emissões de GEE
Verificação e validação	Certificação do projeto, buscando atender aos padrões do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) ou Registro de Emissões Reduzidas (ERR)	Atrelar e certificar os projetos de redução de emissões aos critérios estabelecidos pelos padrões do mercado de créditos de carbono
Registro e comercialização	Após a aprovação e validação do projeto, solicitar e registrar os créditos de carbono gerados e, em seguida, comercializá-los no mercado de créditos de carbono.	Aprovação, validação do projeto, registro dos créditos e comercialização no mercado

FONTE: Cavalcanti (2024).

Portanto, é imprescindível que legislações regulamentem o mercado de carbono e promovam orientação adequada aos potenciais produtores de créditos. A redução nas emissões de GEE é de suma importância não só para mitigar os impactos nas mudanças climáticas, mas também para promoção do desenvolvimento sustentável (Cavalcanti, 2024).

4 METODOLOGIA

O presente trabalho é fundamentado por um estudo de caso, no qual foram realizadas visitas e entrevistas junto ao Supervisor de Qualidade e observações *in loco* para embasamento dos objetivos propostos. Para a identificação de destinações tradicionais dos resíduos citados ao longo do trabalho foi realizada pesquisa na base de dados científicos (CAPES), no Sistema de Biblioteca (SiBi) da UFPR e exemplos de casos internacionais.

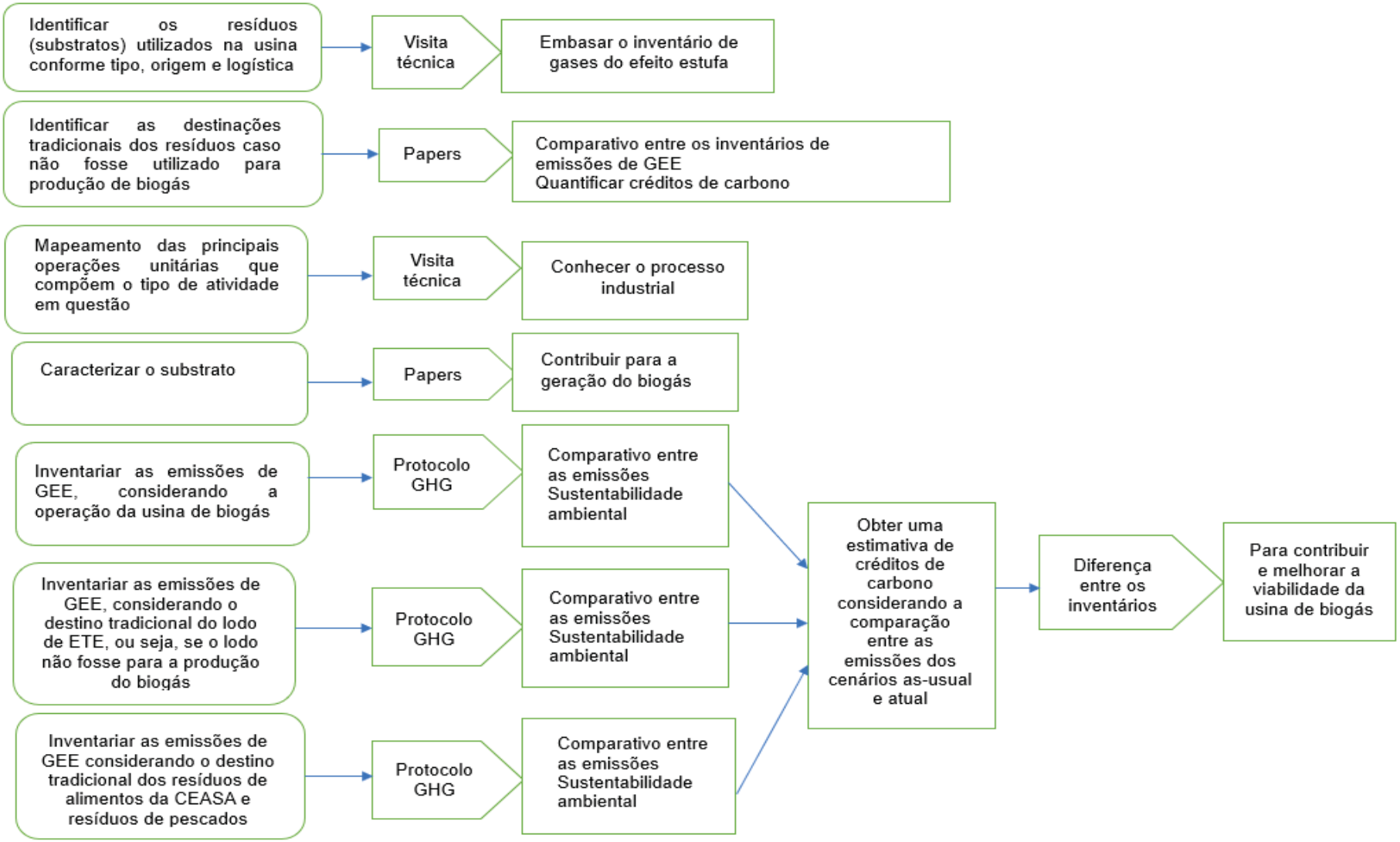
Também, foi realizado um levantamento de plantas de biogás no Paraná por meio de consulta na plataforma do Biogas Map onde se disponibiliza o panorama de plantas de biogás, assim pode ser observado a produção e a relação de resíduos que são utilizados comumente no processo. Nesta etapa também foram observados o quantitativo de plantas existentes no Paraná que produzem biogás.

Todas as etapas são explicadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Conforme Figura 13, o modelo conceitual das etapas da seção de métodos da dissertação elaborado permite uma organização no atingimento dos objetivos demonstrando a forma como cada um deles foi alcançado.

O diagrama conceitual elaborado para o estudo, está dividido em duas partes, sendo que a primeira é considerada causa dos objetivos específicos e a segunda corresponde às consequências dos resultados obtidos, pois créditos de carbono foram calculados com base na diferença de emissões estimadas.

A seguir são detalhadas todas as etapas como local do estudo de caso suas características, os resíduos que são utilizados e as destinações aplicadas tanto no cenário atual quanto no *as-usual*. Ainda, realizado mapeamento das operações unitárias envolvidas no processo, as emissões pontuais da usina em relação aos GEE’s, a adequação a cada escopo referente à planilha GHG protocol e o fluxograma do processo observado.

FIGURA 13 - DIAGRAMA CONCEITUAL DAS ETAPAS DA SEÇÃO DE MÉTODOS DA DISSERTAÇÃO



FONTE A autora, (2024)

4.1 LOCAL DE ESTUDO

A usina de biogás fica localizada no Estado do Paraná e recebe lodo proveniente de uma estação de tratamento de esgoto doméstico do seu entorno, responsável por aproximadamente 800.000 moradores. A localização é favorecida também por estar fora de domicílios e sem possibilidade de expansão geográfica, permitindo conforto em relação a odores e vetores, além de cortina vegetal adequada ao espaço. No ano de 2022, a empresa possuía 25 colaboradores. Diariamente, são produzidos 840 m^3 de lodo, os quais são enviados para o tratamento e geração de biogás para, em seguida, transformação em energia elétrica, como forma alternativa ao aterro sanitário.

Ademais, além do esgoto são utilizados outros resíduos a fim de aumentar a eficiência na produção de biogás e na purificação. Para tanto, são misturados restos de frutas e vegetais advindos do CEASA (Centrais de Abastecimento do Paraná) e resíduos de pescados provenientes de uma indústria de farinha de pescados. O processo de biodigestão acontece em temperatura estável a 37ºC (com variação de +/- 2ºC) e pressão interna de 20 mbar.

4.1.1 Resíduos

Os resíduos foram identificados por meio de visitas à planta e entrevistas com o Supervisor de Qualidade. Esse objetivo teve embasamento para o inventário de gases do efeito estufa e demonstração da eficiência da planta considerando a mistura de substratos utilizados.

4.1.2 Destinações tradicionais dos resíduos

Foram consultados artigos em relação ao tema a fim de conhecer as emissões geradas pelos métodos tradicionais e traçar um comparativo dos inventários de gases do efeito estufa via método tradicional de destinação com o aproveitamento para biogás dos mesmos substratos. Por consequência dessa análise comparativa, levantar créditos de carbono da planta em questão.

Para o presente trabalho foram abordados dados secundários, os quais, segundo Bonat (2009), consistem em fontes primárias já analisadas por

pesquisadores, as quais foram embasados em documentos, estatísticas, arquivos públicos, entre outros, tratados e publicados conforme estudos.

4.1.3 Mapeamento das Operações Unitárias

Para atingir o proposto foram realizadas visitas técnicas à planta e observação do processo além de consulta a artigos e periódicos relacionados ao estudo de caso. Isso foi feito para conhecimento do processo industrial, suas vantagens frente a outros já utilizados e diferenciais dessa técnica.

4.1.4 Caracterização do substrato

Foram realizados experimentos no laboratório a fim de obter a caracterização os diferentes tipos de substratos usados na produção de biogás. Com o objetivo de caracterizar o lodo da ETE, amostras em triplicata foram pesadas da entrada de lodo bruto e saída do reator. Após, foram levadas para a estufa, a 105°C, onde foram deixadas por 24 horas, conforme metodologia descrita em APHA, 2017 com adaptações.

Em seguida, determinou-se a umidade por meio das equações (5) e (6):

$$U(\%) = \frac{mumd - ms}{mumd} . 100 \quad (5)$$

$mumd$ = massa úmida

ms = massa seca

$$ST(\%) = \frac{mfs\ (g)}{mu\ (g)} . 100 \quad (6)$$

mfs = massa final do resíduo seco

mu = massa da amostra com umidade

A partir disso, a amostra seca foi pesada, em triplicata, e levada à estufa a 550ºC por 24 horas a fim de obter a quantidade de sólidos voláteis presentes. O cálculo foi realizado por meio da seguinte equação:

$$SV(g) = m_s - m_{calc} \quad (7)$$

Onde:

m_{calc} = massa da amostra calcinada

m_s = massa da amostra seca

4.1.5 Inventário de emissões

Com o objetivo de verificar a diferença entre as emissões, foram levantadas todas as emissões observadas, além de dados planilhados em excel. Para tanto, foi utilizado a ferramenta GHG protocol versão 2023, alimentada com valores de 2022, ano a ser inventariado. A ferramenta implementada foi adaptada pelo Centro de Estudos em Sustentabilidade (GVces), pertencente à Escola de Administração de Empresas da Fundação Getúlio Vargas (FGV) (Diniz; Yamaguchi; Santos; Carvalho; Alégo; Carvalho, 2021).

A ferramenta chamada protocol GHG, proveniente do inglês *Green House Gases,* utiliza três escopos para validação das emissões e abrangência do máximo possível de informações da planta inventariada. O escopo 1 corresponde às emissões diretas de GEE da empresa inventariante; o escopo 2 refere-se às emissões de geração de eletricidade, refrigeração ou vapor adquirido para consumo próprio e o escopo 3 contempla emissões indiretas da organização não indicadas no escopo 2 (FGV, 2011).

As emissões foram inventariadas considerando cada cenário dos substratos: Por meio da obtenção de biogás via mistura de resíduos (cenário atual), Aterro sanitário para o lodo de esgoto doméstico (*bussines-as-usual*), Aterro doméstico para as sobras alimentares (*bussines-as-usual*), Aterro industrial para os resíduos de pescados (*bussines-as-usual*);

Cada destinação deu origem a uma planilha de GEE específica, totalizando quatro levantamentos. Isso foi realizado para que existisse o comparativo de emissões geradas e com isso, execução da análise da sustentabilidade ambiental da planta, relacionada no presente trabalho.

A escolha da ferramenta aplicada baseou-se na representatividade do cenário, adaptação ao local de estudo e acessibilidade, pois é gratuita e amplamente

utilizada por diversas organizações, possibilitando assim um comparativo adequado das emissões propostas, considerando o cenário atual e o *bussines-as-usual* (base).

Quando considerado aterro sanitário, na planilha GHG Protocol, é necessário inserir informações de entrada, como as características operacionais e climáticas do local de disposição, além da idade e composição gravimétrica dos resíduos (BORBA et al, 2018).

No Paraná, a recente Resolução SEDEST 040/2023 a qual dispõe sobre o Registro Público Estadual de Emissões de Gases do Efeito Estufa, permite por meio do Selo Clima Paraná que empresas busquem Certificações e promovam o desenvolvimento sustentável viabilizando ações de redução das emissões dos GEE. Assim, para a usina é tecnicamente viável e possível a adesão ao programa, visto que há a possibilidade de aplicação da ferramenta GHG Protocol bem como seu reconhecimento no campo da sustentabilidade ambiental, avaliado preliminarmente por meio deste trabalho de cunho científico.

4.1.5.1 ESCOPO 1

Nessa categoria incluem-se combustão móvel e emissões relacionadas diretamente ao espaço da organização. O cálculo realizado para estimativa do flare, equipamento acionado quando da necessidade de alívio da pressão interna do biodigestor, foi obtido convertendo a quantidade de horas utilizadas na queima do excesso do biogás por meio do total gerado pela planta. Considerando essa proporção, têm-se o valor do combustível em toneladas.

Conforme orientações da empresa que presta manutenção nos extintores de incêndio da organização, apenas os extintores com carga de CO_2 emitem gases de efeito estufa na atmosfera, que neste caso é o próprio CO_2. Durante a recarga desses extintores, é descarregado todo o gás presente nele e inserido um novo gás dentro do equipamento. No local existem 4 unidades de extintores, sendo de 10 Kg a capacidade de cada um deles. A estimativa da capacidade total das unidades em operação dos extintores de incêndio é obtida através da equação 4.

$$E_{GEE} = QTD_{EX} * \text{capacidade do extintor} \quad (8)$$

Onde:

E_{GEE} = Emissão de GEE (tCO_2/ano)

QTD_{EX} = Quantidade de aparelhos extintores de CO_2
Capacidade do extintor = Kg

O total de biogás produzido no ano, referente à quantidade de resíduos inicial, foi convertido em toneladas por meio da densidade e introduzido na planilha GHG Protocol, além de um moto gerador que também é utilizado para emergências e extintores de incêndio, os quais são recarregados anualmente, representando emissões fugitivas.

4.1.5.2 ESCOPO 2

Nesse passo, foi inserida a quantidade de kW/h comprada da rede. Esses valores foram retirados das contas disponíveis da concessionária de energia, mês a mês, para o ano inventariado. A equação 5 permite calcular as emissões referente a esse escopo.

Para realização das estimativas, além do consumo da empresa, também foi adotado o fator de emissão do sistema interligado nacional, divulgado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI (Brasil, 2022), sendo de 0,0426 tCO_2/MWh para o ano inventariado.

$$EE = CE * FE \quad (9)$$

Onde:
EE = Emissões de GEE (tCO_2/ano)
CE = Consumo de eletricidade (KWh/ano)
FE = Fator de Emissão do SIN (tCO_2/MWh)

4.1.5.3 ESCOPO 3

A etapa final é composta por transportes fretados pela empresa, os quais são responsáveis pelo trajeto de resíduos orgânicos e pescados (únicas fontes de combustão móvel). Também, por resíduos sólidos das sobras da operação que atualmente são enviados para aterros e efluentes que são retornados à estação de tratamento. Com a revisão implantada pela FGV para o ciclo de 2023, o cálculo para essas emissões segue a equação 6 abaixo, considerando a quilometragem média

percorrida e caminhões rígidos com transporte de capacidade entre 3,5 a 7,5 toneladas.

$$EV = carga * distância * FE\ t.km \quad (10)$$

Onde:

EV = Emissões das viagens

FE = Fator de emissão do GEE (CH_4, N_2O, CO_2) devido a distância percorrida (tGEE/Km)

Os valores base utilizados pela planilha GHG são do IPCC. Porém, para efluentes não havia tal número, então foi utilizado para o valor da DBO a equação disponibilizada pelo próprio painel intragovernamental disponível em Chapter 6, Wastewater treatment and discharge, pg. 22.

$$TOW = P*DBO*0.001*365 \quad (11)$$

Onde:

TOW - Totais de orgânicos no efluente no ano de inventário (kg DBO/ano)

P - População no ano de inventário (pessoas) – Aqui consideramos 800.000 pessoas, englobando a população atendida pela estação de tratamento.

DBO – DBO5 no ano inventariado para o país em questão, conforme tabela 0,001 – Conversão de gramas DBO para kg DBO

TABELA 2 - VALORES ESTIMADOS DE DBO5 EM ÁGUAS DOMÉSTICAS RESIDUAIS PARA ALGUNS PAÍSES

País	**DBO_5 (g/pessoa/dia)**	**Faixa**	**Referência**
Brasil	50	45-55	2

FONTE: IPCC (2019).

Para a realização de cálculos de créditos de carbono foi considerado a diferenças das emissões calculadas por meio da plataforma GHG protocolo do total dos resíduos enviados para aterros e as emissões calculadas pela mesma ferramenta para a usina de biogás. Assim, a quantidade de tCO_{2e} foi estimada e

convertida em valores monetários considerando a bolsa de valores para ter um cenário o mais aproximado possível do real.

Cabe salientar que para os resíduos enviados ao aterro não foram considerados aspectos referentes à energia, transporte, combustão entre outras variáveis envolvidas no Escopo 2 e Escopo 3. As emissões contemplam apenas a questão dos resíduos e são enquadradas como Escopo 1.

4.2 CRÉDITOS DE CARBONO

Visando a contribuição e viabilidade da usina em questão, foi realizada uma estimativa de possíveis créditos de carbono que a planta poderia usufruir. Para isso, foi realizado um cálculo de balanço das emissões de tCO_{2e} comparando o cenário atual de obtenção de biogás realizado pela usina com o cenário *as-usual* considerando aterros sanitários de destino para o lodo e orgânicos e industrial para os resíduos de pescados. A equação 9 pode ser utilizada como o balanço de emissões retornadas da planilha GHG.

$$BTtCO_{2e} = (UBtCO_{2e} – AttCO_{2e}) \quad (12)$$

Onde:

$BTtCO2_e$ = Balanço para o ano de 2022 das tCO_{2e} que deixaram de ser emitidas para a atmosfera;

$UBtCO2_e$ = Quantitativo de emissões da usina de biogás calculadas pela planilha GHG para o ano de 2022;

$ATtCO2_e$ = Quantitativo de emissões do total de resíduos para o ano de 2022 no cenário *as-usual* retornadas pela planilha GHG;

Por fim, para cada 1 ton CO_{2e} que deixou de ser emitida multiplicou-se pelo valor corrente considerado no dia da consulta na bolsa de valores que pode ser expresso pela equação 10.

$$€TtCO_{2e} = BttCO_{2e} * 1tCO_{2e}€ \quad (13)$$

Onde:

$€TtCO_{2e}$ = Valor total em euros das emissões evitadas

$1tCO_{2e}€$ = Valor corrente de uma tonelada de carbono em euros negociadas na bolsa de valores no dia 21 de junho de 2024.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

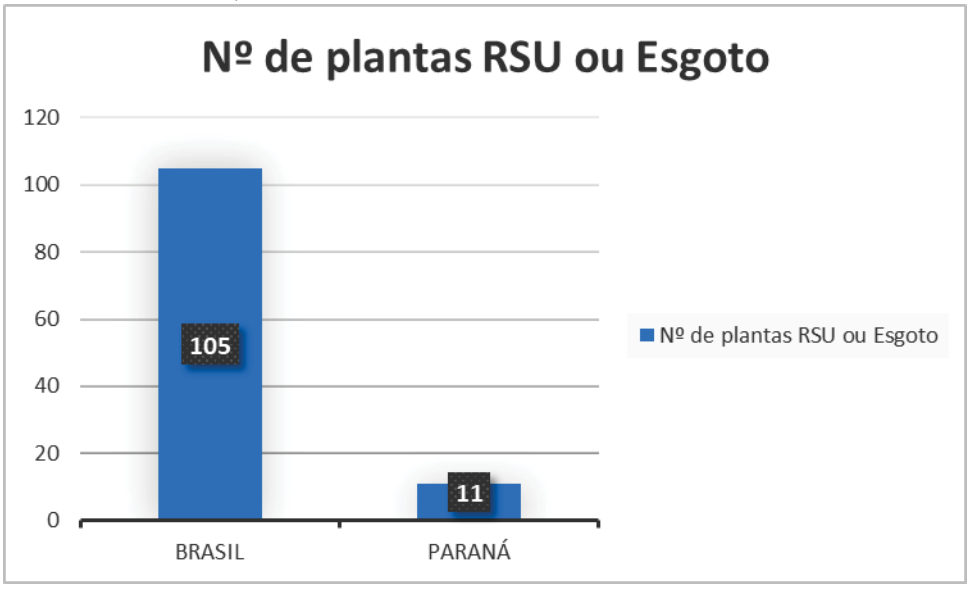
Nessa seção de resultados e discussões são apresentadas as operações unitárias envolvidas no processo do estudo de caso em questão. Também são apresentados os valores obtidos a partir da planilha do Protocolo GHG para os GEE tanto do cenário *as-usual* como do cenário atual. Ainda, são apresentados dados de levantamento de plantas similares que utilizam de tal processo.

Por fim, é exposta uma estimativa da geração de créditos de carbono que a usina possui capacidade de geração e aplicado valor corrente no mercado da bolsa de valores para esse ativo financeiro.

5.1 LEVANTAMENTO DE PLANTAS DO PARANÁ EM RELAÇÃO AO BIOGÁS

Em consulta ao BIOGASMAP (2024) foram analisados resultados referentes a todas as plantas de biogás existentes no Paraná, bem como o substrato utilizado por cada uma delas. Conforme figura 14, existem 11 unidades que utilizam lodo de esgoto ou resíduos para produção de biogás. Os dados referem-se ao ano de 2022 e para a análise, foi considerado somente o Estado do Paraná, que representa 10,48% se comparado ao número total das plantas nacionais existentes.

FIGURA 14 - FERRAMENTA UTILIZADA PARA RASTREAMENTO DAS USINAS DE BIOGÁS EXISTENTES NO PARANÁ QUE UTILIZAM RESÍDUOS OU ESGOTO



FONTE: BIOGASMAP (2024)

Em consulta a artigos, não foram encontradas usinas similares que utilizem a mistura de resíduos (lodo de esgoto sanitário e resíduos de alimento), objeto do estudo de caso. Foram utilizadas como base para a pesquisa Science direct, Elsevier e Periódicos da Capes.

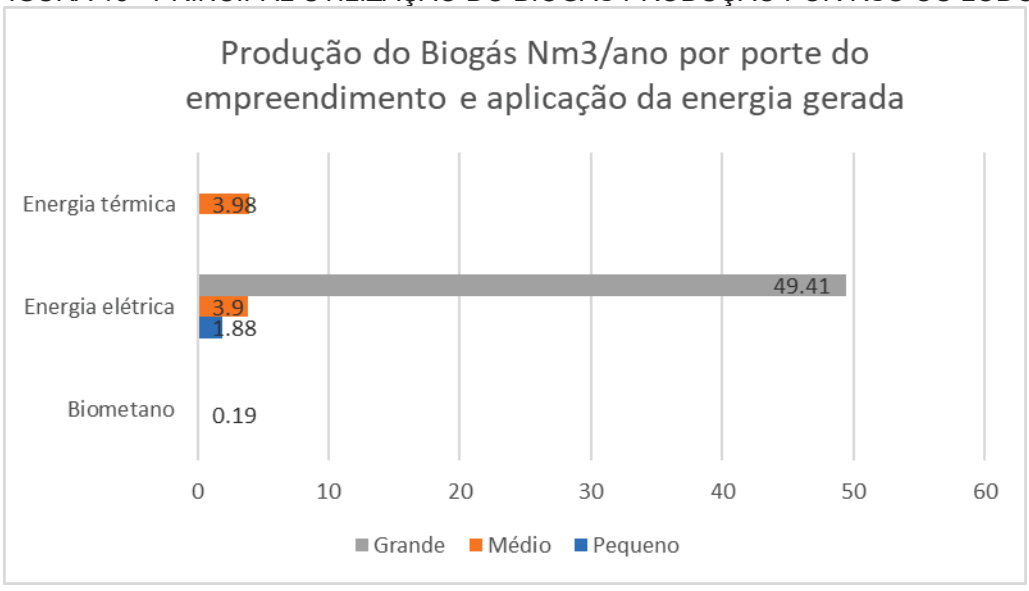
TABELA 3 - DADOS RELACIONADOS DO BIOGASMAP PARA A REGIÃO DO PARANÁ NO ANO DE 2022

	RSU ou esgoto	***Agropecuária***	***Indústria***
Número de unidades	11	144	57
Produção de biogás (Nm^3/ano)	59,35 (mi)	69,89 (mi)	176,14 (mi)

FONTE: BIOGASMAP (2024)

Também, com o uso do BIOGASMAP foi possível observar a principal utilização do biogás produzido por meio de lodo de ETE e resíduos, sendo a energia elétrica detentora de 93% da funcionalidade. Do total de 11 existentes, apenas uma planta utiliza biogás para energia térmica e uma para biometano, conforme tabela 15.

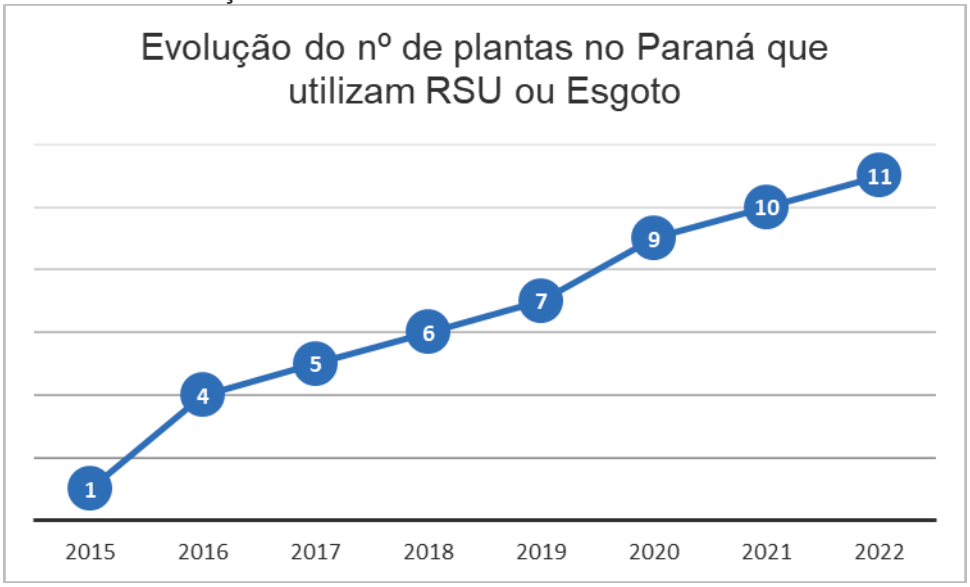
FIGURA 15 - PRINCIPAL UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS PRODUÇÃO POR RSU OU LODO



FONTE: Adpatado de BIOGASMAP (2024)

Em relação ao crescimento do número de plantas de biogás, pode ser observado na figura 16 que em 2015 existia apenas uma planta e a finalidade era energia elétrica. No ano de 2017 surgiu a primeira para biometano e em 2022 a de energia térmica, tendo um salto.

FIGURA 16 - EVOLUÇÃO DO Nº DE PLANTAS NOVAS E EXISTENTES NO PARANÁ



FONTE: Adpatado de BIOGASMAP (2024)

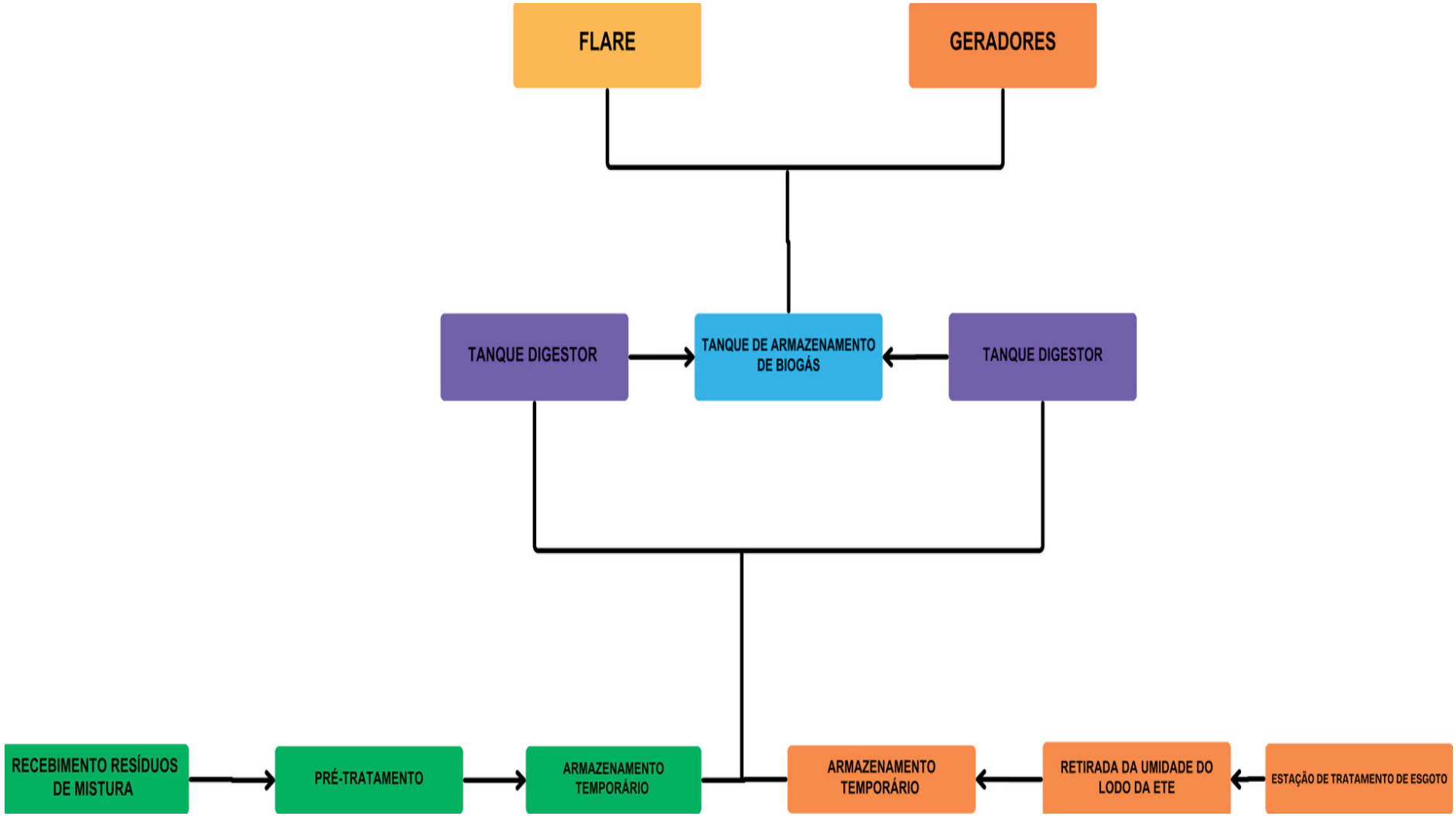
5.2 OPERAÇÕES UNITÁRIAS DO PROCESSO

A figura 17 representa um breve diagrama de blocos do processo realizado. Todo o sistema é fechado, o que promove mais eficiência e diminuição de emissões fugitivas, contribuindo para a redução dos componentes relacionados aos gases de efeito estufa.

O processo possui dois pré-tratamentos, um em cada entrada. Na entrada do lodo, proveniente da estação de tratamento de esgoto a qual chega por bombeamento, possui mesas desaguadoras para aumento de concentração de sólidos de 2,5% passando para uma faixa de 6,0% de sólidos totais. Após o desague, o lodo é encaminhado para o tanque de mistura e seguirá para a etapa da digestão anaeróbia, chamada de acidificação.

Um moinho de martelos, em outra entrada do processo, reduz o tamanho de partículas de orgânicos por trituração e separação da fração não orgânica. Tais resíduos chegam por meio de caminhões e o pré-tratamento é utilizado para promover a facilitação da biodigestão do material tornando-o mais uniforme. Esse resíduo é composto basicamente por frutas, verduras e vegetais advindos da Central de Abastecimento do Paraná S.A. – CEASA. Cabe salientar que nessa etapa os resíduos não orgânicos advindos da separação de pré-tratamento são enviados para aterros, coprocessamento em indústrias cimenteiras ou utilizado como fertilizante a depender das características do rejeito.

FIGURA 17 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO PROCESSO DE BIODIGESTÃO



FONTE: A autora (2024).

Em relação aos resíduos de pescados, estes já chegam com características prontas para serem inseridos nos tanques e com boa dosagem de gordura, acelerando o processo das bactérias existentes. São dispostos juntamente com os orgânicos. Conforme o estudo de Fonseca *et al* (2020), os resíduos de filetagem de peixe são excelentes fontes para a produção do metano e para equilibrar a produção da relação C/N (Carbono/Nitrogênio) na matéria orgânica, sendo a mistura com outros biorresíduos indicada, conforme ocorre na planta objeto deste estudo.

Para o ano de 2022, os resíduos orgânicos foram dispostos conforme tabela 4. Os principais resíduos utilizados foram orgânicos (CEASA), gorduras provenientes de fontes de caixas e misturas e resíduos especiais provenientes de indústria de pescados.

TABELA 4 - RESÍDUOS UTILIZADOS EM MAIOR QUANTIDADE NA MISTURA

	1º TRIMESTRE	2º TRIMESTRE	3º TRIMESTRE	4º TRIMESTRE
LODO (M^3)	76.125	77.692	81.903	73.463
ORGÂNICOS – FRUTAS E VEGETAIS (KG)	2.240.540	1.483.050	1.123.320	2.263.860
RESÍDUOS ESPECIAIS – PESCADOS (KG)	981.930	754.410	1.040.370	716.340

FONTE: A autora (2024)

Cada entrada do processo em questão possui um tanque exclusivo de capacidade de 600 m^3 e, após cada um desses tanques, ocorre a dosagem nos reatores. O sistema é fechado e não ocorre perda de biogás para a atmosfera. O produto da primeira etapa de acidificação é direcionado para outro tanque onde ocorre o processo de biodigestão. Nessa etapa, o ciclo dura em torno de 25 a 30 dias e passa pelos demais estágios de transformação (acetogênese e metanogênese) até a produção do biogás. A temperatura se mantém constante para a proliferação de bactérias e para a ocorrência da biodegradação. Após a digestão, parte do líquido armazenado é reciclado pela usina e outra parte passa pela mesa desaguadora, que separa os sólidos os quais serão destinados para aterros, coprocessamento e uma pequena parte para compostagem.

No processo de decomposição, também ocorre a microaeração, consistindo em injeção de oxigênio direto no tanque. Esse sistema permite a obtenção de um gás mais limpo e com menor teor de enxofre na composição, evitando a sulfetogênese excessiva e tendo um prolongamento da vida útil dos equipamentos, já que essa etapa promove corrosão. Aqui é adicionado uma pequena quantidade que não causa desordem às bactérias presentes e não descaracteriza o processo, que continua sendo anaeróbico.

Finalmente, o biogás produzido é convertido em energia elétrica por meio de motores ciclo otto, sendo injetada diretamente na rede e utilizada para aquecimento dos biodigestores e manutenção da planta. O excedente é utilizado pela concessionária responsável.

Eventualmente o gás excedente é queimado em um flare, evitando então a perda de metano para a atmosfera. O flare é necessário pois a recomendação de sua instalação prevê possíveis falhas no sistema (Biogás – Efluentes e resíduos rurais, 2024).

As temperaturas e tempos de detenção variam conforme a demanda operacional, sendo menor para o tanque com o lodo e maior para o tanque contendo orgânicos. Todos os tanques são do tipo CSTR (*Continuous Stirred Tank Reactor*), com agitação contínua e controle de temperatura (aproximadamente 37º, com variação de +/- 2ºC), além de mistura completa. Para a manutenção dessa temperatura também é utilizado o biogás produzido pela usina, transformando em energia térmica e mantendo o processo continuamente.

A concentração de metano no biogás é de 60,8% e a estimativa de conversão é de 50% de sólidos totais voláteis. A produção de biogás anual para a planta em questão foi de 2.528.846 Nm^3 para o ano de 2022, representando aproximadamente 1,5% do total produzido por todas as plantas utilizadoras de lodo de esgoto.

Em relação aos resíduos sólidos gerados na usina como um todo, os rejeitos são enviados para coprocessamento e aterro. Já os efluentes, são retornados para a estação de tratamento localizada ao lado da empresa, a mesma que envia o lodo.

Ainda, conforme preconiza a Lei 14026 de 15 de julho de 2020, o atendimento a tratamento de esgotos deve perfazer o percentual de 90% da população até o ano de 2033. Isso revela a necessidade crescente de métodos que

minimizem impactos e atendam eficientemente o processo, transformando resíduos em fontes de energia limpa capazes de atender todo o sistema e contribuir com demandas não usuais.

O TRH mínimo para o reator comumente utilizado é de 15 a 20 dias, variando em função do tipo de substrato (Kunz *et al*, 2019). Para a usina em questão o tempo de retenção é de 19 dias e o calculado foi de 21 dias conforme estudo de Ojea (2023).

5.3 CARACTERIZAÇÃO DO SUBSTRATO

Foi utilizado como referência dessa caracterização o estudo de Inocêncio (2023), com base seca e base úmida para determinação de sólidos totais, sólidos voláteis e sólidos fixos. Essa caracterização é realizada para contribuir com a eficiência do processo.

TABELA 5 - CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS UTILIZADOS NA USINA PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Análises	**Reator**		**Lodo de ETE bruto**		**Resíduo de pescado**		**Resíduo orgânico**	
	Base úmida	Base seca	Base úmida	Base seca	Base úmida	Base seca	Base úmida	Base seca
SÓLIDOS TOTAIS (%)	4,07	100	4,81	100	22,82	100	10,90	100
SÓLIDOS VOLÁTEIS (%)	2,49	61,15	2,50	61,15	21,98	96,35	10,06	93,30
SÓLIDOS FINAIS (%)	-	-	1,57	38,85	0,83	3,65	0,84	6,70
Umidade (%)	95,90		95,20		77,18		89,10	

FONTE: A autora (2024)

Ainda, conforme estudo de Hasan *et al* (2019), a produção do biogás é diretamente relacionada à concentração de sólidos voláteis na entrada do biodigestor; quanto maior o valor, maior será a fração convertida, determinando-se também a quantidade de matéria biodegradável ofertada. Portanto, a adição de

pescados ao processo é explicada pelo alto valor em sólidos voláteis encontrado no experimento.

Os resultados dos experimentos realizados no laboratório para o lodo de ETE possui valores convergentes aos do estudo base de Inocêncio (2023). Pode-se inferir que valores altos de ST e SV, como nos dois cenários para resíduos de orgânicos, significam atrativos para a codigestão anaeróbica e potenciais produtores de biogás. Conforme Karlsson *et al* (2014), a adição de resíduos alimentares ao lodo de ete explica-se pelo fato de aumento de material (SV) na entrada do biodigestor em processos contínuos, tornando-se uniforme durante o dia e propício para os microrganismos responsáveis pela biodigestão, pois terão substratos suficientes para consumo.

TABELA 6 - CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DO RESÍDUO ORGÂNICO E LODO DE ETE

Análises	***Resíduo orgânico***		***Lodo de ETE***	
	Base úmida	Base seca	Base úmida	Base seca
ST (%)	21,50	100,00	4,30	100,00
SV (%)	19,00	92,39	2,57	59,81
SF (%)	2,00	7,61	1,73	40,19
Umidade (%)	79,00	0,00	95,70	0,00

FONTE: Inocêncio (2023)

5.4 PROTOCOLO GHG (GREEN HOUSE GASES)

As fontes inventariadas nos três escopos estão representadas no quadro 8. Cumpre salientar que o levantamento foi realizado para o ano de 2022.

QUADRO 8 - FONTES INVENTARIADAS

Escopo	***Fontes inventariadas***
Escopo 1 – Emissões diretas de GEE	Estacionárias – gerador, motor acoplado ao gerador de energia elétrica e flare Fugitivas - extintores
Escopo 2 – Emissões indiretas de GEE	Consumo de eletricidade – abordagem por localização
Escopo 3 – Emissões indiretas de GEE	Resíduos gerados na operação – Aterro e coprocessamento Efluentes – retorno da água residual para ETE Transporte e distribuição (Upstream) – Caminhões que não são do empreendimento (fretados)

FONTE: A autora (2024)

A divisão da representatividade referente às fontes inventariadas está listada na tabela 7 e foram referenciadas com base nas emissões de GEE para cada escopo levantado.

TABELA 7 - EMISSÕES TOTAIS DE GEE E REPRESENTATIVIDADE

	Emissão GEE	***Representatividade***
Escopo 01	3,245 tCO_2e	0,02 %
Escopo 02	224,307 tCO_2e	1,37 %
Escopo 03	16.087,104 tCO_2e	98,61 %
Escopos 1+2+3	16.314,656 tCO_2e	100 %

FONTE: A autora (2024)

Considerando o PBGHG (Programa Brasileiro GHG), os resultados retornados ao Escopo 1 foram divididos em:

- 3,21 tCO_{2e} para combustão estacionária
- 0,04 tCO_{2e} para emissões fugitivas

A tabela 8 apresenta o detalhamento das emissões do escopo 1, por categoria e por tipo de GEE.

TABELA 8 - EMISSÕES DO ESCOPO 01 POR CATEGORIA E TIPO DE GEE

Categoria	***CO_2***	***CH_4***	***N_2O***	***CO_2 Biogênico***
Combustão estacionária	0,05 tCO_2	1,57 tCO_2e	1,59 tCO_2e	4.780,41 tCO_2
Fugitivas	0,04 tCO_2	-----	-----	-----
Total	0,08 tCO_2	1,57 tCO_2e	1,59 tCO_2e	4.780,41 tCO_2e

FONTE: A autora (2024)

A soma de todas as fontes diretas levantadas na planta foi de 3,25 tCO_{2e}. Aqui estão incluídos os motores e extintores utilizados. Para o ano de 2022 já não eram mais utilizados equipamentos de combustão móvel no empreendimento.

Cabe considerar que houve a formação de 4.708,40 tCO2 biogênico, atestando a fonte de energia limpa. Estas emissões, também conhecidas como CO2 renovável, são consideradas neutras em termos de impacto climático, pois são provenientes do carbono capturado durante o ciclo de vida de organismos vivos ou de materiais de origem biológica.

Em relação aos extintores, somente uma unidade foi considerada para entrada na planilha, pois é reconhecida como potencial em emissão de GEE, os demais extintores não são caracterizados como fontes diretas.

TABELA 9 - EMISSÕES ESCOPO 1

Categoria	***Fontes inventariadas***	***Emissão***	***Representatividade***	***CO_2 biogênico***
Combustão estacionária	Gerador, motor acoplado ao gerador de energia elétrica e flare	3,21 tCO_2e	98,76 %	4.780,40 tCO_2
Fugitivas	Extintor (CO_2)	0,04 tCO_2e	1,24%	------

Fonte: A autora (2024).

Para o Escopo 2, os resultados encontrados foram de:

- 224,31 tCO_{2e}

Esse valor corresponde a toda energia comprada da rede concessionária no ano inventariado e é obrigatório na declaração das fontes elencadas por toda a organização. As emissões de GEE pela “abordagem baseada na localização” utiliza como fator de emissão de CO_2 um fator médio para geração da eletricidade do Sistema Interligado Nacional (SIN). Para o ano de 2022 a média anual FE do SIN foi de 0,0426.

Por fim, para o Escopo 3 foram inseridos todos os dados relacionados indiretamente à atividade e os valores foram de:

27,76 tCO_{2e} para transporte & distribuição (*Upstream*)

8.702,71 tCO_{2e} para resíduos sólidos da operação

7.356,55 tCO_{2e} para efluentes gerados na operação

Os caminhões que transportam resíduos orgânicos até a planta são custeados pelas empresas de origem, sendo apenas o frete de responsabilidade da empresa de biogás, portanto foram enquadrados no escopo 3 e transporte *upstream*. Ressalta-se que para esse cálculo foi utilizada a distância percorrida estimada para

caminhões rígidos de 3,5 a 7,5 toneladas, e os anos da frota foram de 2003, 2004, 2010, 2012.

Somados todos os valores da categoria referente ao escopo 3 têm-se 16.087,11 tCO_{2e} e 164,77 tCO2 biogênico, conforme tabela 10.

TABELA 10 - EMISSÕES DO ESCOPO 03

Categoria	***Fontes inventariadas***	***Emissão***	***Representatividade***	***CO_2 biogênico***
Transporte e distribuição *(upstream)*	Caminhões fretados	27,76 tCO_{2e}	0,170 %	2,82 tCO_2
Resíduos gerados nas operações	Sólidos (aterro/ coprocessamento) e líquidos (efluentes que retornam à ETE)	16.059,35 tCO_{2e}	99,83 %	161,95 tCO_2

FONTE: A autora (2024)

A tabela 11 apresenta as emissões de GEE do escopo 03, desagregadas por categoria de fonte de emissão de GEE. Como já descrito no item 3.8.1 estas emissões de CO_2 biogênico estão relacionadas as fontes móveis que usam biodiesel, etanol e gasolina aditivada com etanol anidro. Tem-se também emissões de carbono biogênico proveniente de biomassa enviado para aterro e tratamento de efluentes. Porém, a maior preocupação é na quantidade de CH_4 liberada nessa etapa, perfazendo 563,45 t.

TABELA 11 - EMISSÕES ESCOPO 03 POR CATEGORIA E TIPO DE GEE

Categoria	***CO_2***	***CH_4***	***N_2O***
Transporte e distribuição *(upstream)*	27,64 tCO_{2e}	0,00 tCO_{2e}	0,00 tCO_{2e}
Resíduos gerados nas operações	281,96 tCO_{2e}	15.776,71 tCO_{2e}	0,79 tCO_{2e}
Total	309,60 tCO_{2e}	15.776,71 tCO_{2e}	0,79 tCO_{2e}

FONTE: A autora (2024)

Na tabela 12 estão dispostas todas as emissões por tipo de gases em toneladas dos três escopos abordados no estudo. Verifica-se a evidência do CO_2 biogênico no escopo 01, corroborando com a sustentabilidade ambiental promovida pela usina.

TABELA 12 - RESUMO CENÁRIO ATUAL

	CO_2 (t)	CH_4 (t)	N_2O (t)	tCO_2e (t)	CO_2 biogênico (t)
Escopo 1	0,087	0,056	0,006	3,25	4780,401
Escopo 2	224,307	-	-	224,31	-
Escopo 3	309,600	563,454	0,003	16087,10	164,770
TOTAL	533,994	563,510	0,009	16314,65	4945,171

FONTE: A autora (2024).

Com a finalidade de comparar os valores do cenário atual com o cenário as-usual, foram elencadas as emissões de cada resíduo nos aterros de destinação de cada um deles. A planilha utiliza alguns fatores para distinção de locais, como temperatura, precipitação e potencial de evapotranspiração. Essas condições são pré-estabelecidas pela referência INMET no ano de 2018, conforme a inserção da localidade do aterro que será disposto. Na tabela 13 pode ser verificada as emissões totais para cada um desses rejeitos.

Ressalta-se que não foram considerados os aspectos do escopo 02 e escopo 03 para esse cenário, como transporte, energia elétrica entre outros fatores que demandam o funcionamento de aterros. Assim, pode-se concluir que o quantitativo de emissões é tendencial a ser maior do que o calculado.

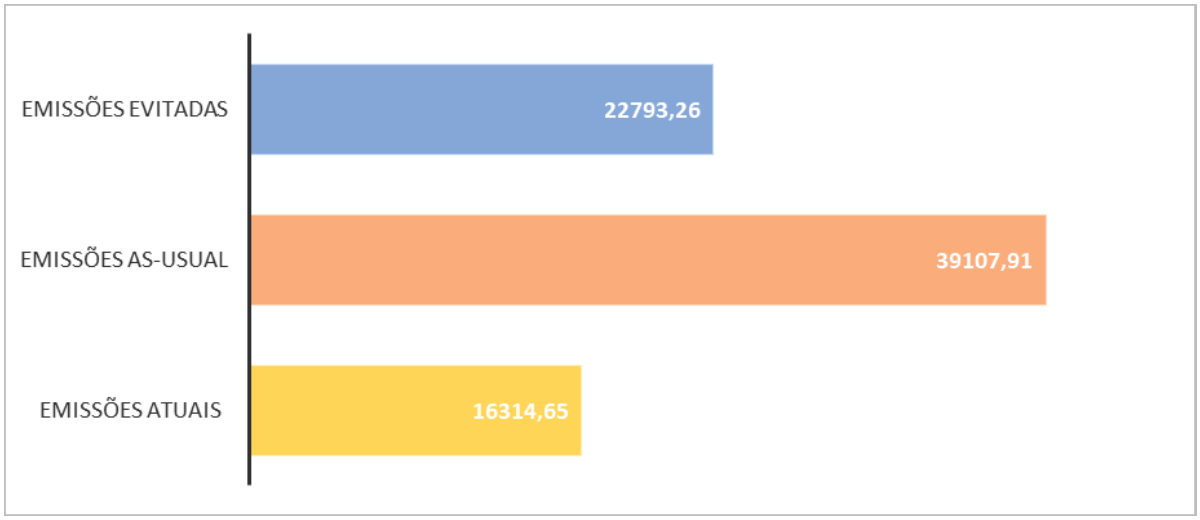
TABELA 13 - RESUMO CENÁRIO AS-USUAL

	CH_4 (t)	tCO2e (t)	CO_2 biogênico (t)
LODO	931,68	26086,93	262,71
PESCADOS	60,62	1697,33	17,09
CEASA	404,42	11323,65	114,03
TOTAL	1396,72	39107,91	393,83

FONTE: A autora (2024).

Considerando o comparativo, podemos concluir que 58,29% das emissões de tCO_{2e} foram evitadas de serem lançadas à atmosfera devido ao ciclo de produção de biogás da planta em questão. O comparativo dos cenários considerados no estudo está ilustrado na figura 18, permitindo uma visualização ampla das emissões que foram evitadas com a existência da usina.

FIGURA 18 - COMPARATIVO DAS EMISSÕES CONSIDERANDO OS CENÁRIOS *AS USUAL* E ATUAL



FONTE: A autora (2024)

Conforme Projeto Angela *(Abatement N_2O Gas Emissions Latin America*) da Solvay, Rodhia elimina por ano cerca de 4,5 milhões de tCO_2e correspondendo a emissões de um milhão de carros rodando. Para o estudo, as emissões evitadas de tCO_2e correspondem a uma frota de quase 5100 veículos.

Assim como no estudo Da Silva *et al* (2023), também houve redução nas emissões quando foi utilizada a mistura de resíduos de pescados e lodo de ETE para formação de biogás. Esse resultado foi de aproximadamente 1.619 tCO_{2e} quando comparados ao envio para lixões. Para o metano, esse valor chegou a 64,76 tCH_4, valor próximo ao calculado para pescados no presente trabalho que foi de 60,62 tCH_4.

Ainda, conforme análise de Aragão, Moreira e Possetti (2020), onde foram calculadas emissões oriundas da produção de biogás proveniente da estação de tratamento de lodo de esgoto de Jacuípe II utilizando a planilha GHG *protocol*, os resultados foram de 20.378,00 tCO_{2e} (2016), 17.730,80 tCO_{2e} (2016) e 19.490,50 tCO_{2e} (2016), valores elevados se comparados ao presente trabalho, pois a produção mensal de cada ano foi de 74.780,44 Nm^3.mês-1 no ano de 2016; 51.679,47 Nm^3.mês-1 no ano de 2017 e 70.877,59 Nm^3.mês-1 no ano de 2018. Cabe salientar que a estação é responsável pelo atendimento a 129.600 contribuintes e a conversão é realizada por meio de 8 reatores UASB, além de decantadores, desarenadores e tanques.

Já na pesquisa de Júnior et al (2022), foram calculadas as emissões das atividades da Companhia de Saneamento de Alagoas (Casal) para o ano de 2018 e teve como resultado 31.099,33 tCO2e. Observado também que os maiores emissores de GEE foram os reatores UASB e lagoa de estabilização. Considerando que a unidade CASAL é responsável por atender 588.805 habitantes têm-se um número expressivo quando comparada às emissões da usina de biogás, permitindo inferir melhor aproveitamento quando da utilização da tecnologia apresentada ao longo do trabalho. Salienta-se que a metodologia utilizada para o cálculo das emissões de GEE no estudo de Júnior et al (2021) é a mesma aplicada ao presente trabalho.

Cabe salientar que os objetivos do desenvolvimento sustentável com relação direta ao presente estudo referem-se aos números 7 (Energias renováveis e acessíveis) e 13 (ação contra a mudança global do clima). Outros estão envolvidos indiretamente a exemplo do 6, 8 e 11, integrando uma cadeia de busca pela sustentabilidade e novas tecnologias capazes de atender aos acordos formados nas conferências climáticas.

5.5 CRÉDITOS DE CARBONO

Com o objetivo de analisar o quantitativo de créditos de carbono provenientes da usina de biogás, foi utilizado o cálculo de balanço das emissões considerando o cenário atual e o *as-usual*.

A diferença das emissões calculadas para a usina de biogás e os resíduos enviados ao aterro resultaram em 22793,26 tCO2e para o ano de 2022. Em consulta à bolsa de valores[1] no dia 21 de junho de 2024, o valor corrente utilizado foi de 68,05 euros. Portanto, o quantitativo monetário referente aos créditos de carbono perfaz 1.551.081,34 euros, sendo uma receita financeira adicional ao empreendimento. Para a efetiva comercialização de tais créditos, o projeto base deve passar por organismos acreditados no mercado e seguir as etapas indicadas na ABNT NBR 15948:2011, tendo validade a partir do recebimento do certificado e podendo ser convertido em ativos.

---

[1] https://br.investing.com/commodities/carbon-emissions

É de suma importância a delimitação das emissões que serão incorporadas ao inventário, pois quanto mais precisas as informações, maior credibilidade e transparência será ofertada para a certificação. Ainda, para a comercialização no mercado externo é necessário o mapeamento do escopo 3, geralmente mais impreciso para mapeamento devido à dificuldade de alcance das informações, mas que possui um delimitador na validação dos resultados e sendo considerado um dos mais importantes na emissão do certificado.

6 CONCLUSÃO

A estimativa de emissões referentes ao cenário atual elencando os resíduos considerados, demonstrou potencial de mitigação de 22793,26 t de emissões de CO_2 para o ano de 2022, ano utilizado como base no inventário. Demonstrou também que a utilização de diferentes substratos é um importante aspecto para a viabilidade financeira, que pode ser alcançada pela implementação de um projeto de MDL e, consequente, vendas de RCEs.

o aproveitamento dos resíduos como fonte de energia renovável é perceptível e alinha-se ao preconizado pelas Organizações responsáveis pelos assuntos climáticos, sendo uma alternativa considerada sustentável e efetiva, pois supre o atendimento do processo produtivo da usina, podendo ser considerada autossustentável. Ainda, uma sugestão futura pode estar relacionada ao uso da energia solar em substituição à energia elétrica proveniente da concessionária que supre rotinas administrativas, sendo o *off grid* indicado e que manteria a usina funcionando em situações de emergência inclusive.

O balanço das emissões de tCO_{2e}, considerando o cenário atual e o as-usual, também demonstrou potencial de mitigações, pois retira o equivalente a 5100 veículos de emissões geradas na atmosfera. Os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável elencados no presente estudo referem-se ao 7 (Energias renováveis e acessíveis), 13 (ação contra a mudança global do clima), 6 (água potável e saneamento), 8 (trabalho decente e crescimento econômico) e 11 (cidades e comunidades sustentáveis).

A delimitação de levantamento de fontes a serem inventariadas é um dos quesitos chave para um projeto consistente e que demonstre adequadamente o cenário do empreendimento, sendo considerado o principal entrave quando o trabalho é iniciado.

Tendo em vista os resultados obtidos, é possível inferir pela viabilidade ambiental da usina de biogás ao comparar com as emissões que foram evitadas de serem lançadas à atmosfera, caso os resíduos aproveitados como substratos fossem enviados ao aterro.

Para trabalhos futuros sugere-se estudos de rotas alternativas aos rejeitos enviados para aterro, bem como dos rejeitos enviados para compostagem a fim de melhorar o potencial desse fertilizante, aplicação e enriquecimento.

Ainda, recomenda-se o acompanhamento das legislações referentes aos créditos de carbono ao longo do tempo para melhor entendimento e solidificação dos meios de comercialização.

7 REFERÊNCIAS

ABIQUIM – Associação Brasileira da Indústria Química. **Projeto Ângela: abatimento de 4,5 milhões de toneladas por ano de gases de efeito estufa (GEE)**. Disponível em: https://ods.abiquim.org.br/acao-contra-a-mudanca-global-do-clima/cases/projeto-angela--abatimento-de-4-5-milhoes-de-toneladas-por-ano-de-gases-de-efeito-estufa--gee. Acesso em: 21 jul. 2024.

ABREMA (Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente). Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023. Disponível em: https://www.abrema.org.br/panorama/. Acesso em: 21 jul. 2024.

ALBUQUERQUE, D. K. O. de; COUTO, L. D. do. O Acordo de Paris e o Estado Democrático de Direito: uma investigação sobre a base estatal para qual o Acordo aponta. **O que nos faz pensar**, Rio de Janeiro, v. 30, n. 50, p. 306-322, jan./jul. 2022.

ALMEIDA, M. J. de; BARBOSA, T. A.; MENDONÇA, L. C. G. Geração de créditos de carbono a partir de resíduos sólidos em Sergipe. **Revista CEREUS**, v. 16, n. 1, p. 91-107, jan./abr. 2024. Disponível em: http://ojs.unirg.edu.br/index.php/1/article/view/4522/2208. Acesso em: abr. 2024.

APHA – American Public Health Association et al. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 23. ed. Washington, D.C.: American Public Health Association, 2017.

ARAGÃO, T. N. M.; MOREIRA, I. T. A.; POSSETTI, G. R. C. II-048 – Aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto: estudo de caso na ETE Jacuípe II – Bahia. In: **XIX SILUBESA** - ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2020, Recife. Anais... Recife: ABES, 2020.

ARAUJO, E. C. G. et al. Produção de biogás utilizando biomassa de poda e lodo de esgoto no município de Recife (PE). **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá, v. 14, n. 1, p. 217-228, 2021.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS (ABNT). **NBR ISO: 14.064**: Gases de efeito estufa – Especificação e orientação a organizações para quantificação e elaboração de relatórios de emissões e remoções de gases de efeito estufa. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS (ABNT). **NBR 15.948**: Mercado voluntário de carbono – Princípios, requisitos e orientações para comercialização de reduções verificadas de emissões, 2011.

BEKCHANOV, M.; MONDAL, M. A. H.; ALWIS, A. de; MIRZABAEV, A. Why adoption is slow despite promising potential of biogas technology for improving energy security and mitigating climate change in Sri Lanka? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 105, p. 378-390, 2019. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119301030#bib29.Acesso em: set. 2023.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL. BEN Relatório Síntese. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-2021. Acesso em: mar. 2024.

BERNI, M. Transição energética: descentralização, descarbonização e digitalização. **Revista O Papel**, São Paulo, p. 80-81, set. 2021.

BIOGÁS – **Efluentes e resíduos rurais** – versão 1.0. CETESB, Ministério da Ciência e Tecnologia – software e manual. São Paulo: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2006. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/proclima/wp-content/uploads/sites/36/2014/05/biogas_vol11.pdf. Acesso em: 11 mai. 2024.

BITTENCOURT, S.; AISSE, M. M.; SERRAT, B. M. Gestão do uso agrícola do lodo de esgoto: estudo de caso do estado do Paraná, Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 6, p. 1129-1139, 2017.

BLEY Jr, C. **Biogás: a energia invisível**. 2. ed. São Paulo: CIBiogás-ER, 2015.

BOECHEM, F. **Créditos de carbono: o que falta para o desenvolvimento do mercado no Brasil**. EPBR. Disponível em: https://epbr.com.br/creditos-de-carbono-o-que-falta-para-o-desenvolvimento-desse-mercado-no-brasil-e-como-o-pl-412-2022-pode-contribuir/. Acesso em: 07 jul. 2024.

BONAT, D. **Metodologia da Pesquisa**. 3ª ed. Curitiba: IESDE Brasil S.A., 2009.

BORBA, P. F. S. de; MARTINS, E. M.; CORREA, S. M.; RITTER, E. Emissão de gases do efeito estufa de um aterro sanitário no Rio de Janeiro. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, n. 1, jan./fev. 2018, p. 101-111.

BORGES, Ane Caroline pereira. 2016. Energias renováveis: uma contextualização da biomassa como fonte de energia**. Revista Eletrônica do Prodema**. Fortaleza.

BRASIL, **Lei nº 14026, de 15 de julho de 2020**. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm. Acesso em: 30 jun. 2024.

BRASIL, **Lei nº 12187, de 29 de dezembro de 2009**. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, edição extra, 29 dez. 2009, p.109, col. 2. Disponível em:

https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm. Acesso em: 07 jul. 2024.

BRASIL. **Ministério da Ciência Tecnologia e Inovação**. Fator de emissão de CO2 na geração de energia elétrica no Brasil em 2023 é o menor em 12 anos. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/central-de-conteudo/noti/fator-de-emissao-de-co2-na-geracao-de-energia-eletrica-no-brasil-em-2023-e-o-menor-em-12-anos. Acesso em: 14 abr. 2024.

BRASIL. **Ministério do Meio Ambiente**. Disponível em https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/governo-federal-lanca-medidas-de-incentivo-a-producao-e-ao-uso-sustentavel-do-biometano. Acesso em: 22 mai. 2023.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. Portaria MMA nº 71, de 21 de março de 2022. Institui o Programa Nacional de Redução de Emissões de Metano - Metano Zero. **Ministério do Meio Ambiente**. Disponível em: https://in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-mma-n-71-de-21-de-marco-de-2022-387378473 . Acesso em: 22 mai. 2023.

BRASIL**, Ministério do Meio Ambiente**. Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/agendaambientalurbana/lixao-zero/plano_nacional_de_residuos_solidos-1.pdf. Acesso em: 30 mai. 2023.

BRASIL, **Ministério das Cidades**. Guia Técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto. Disponível em: https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/probiogas/probiogas-guia-etes.pdf. Acesso em: 26 mai. 2023.

BRANDT, E. M. F. et al. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário – Parte 5: biogás e emissões fugitivas de metano. **Revista DAE** – Edição Especial, v. 66, n. 214, nov. 2018.

BRETAS, P.; MELO M. **Água: a engenharia e a sustentabilidade**. Belo Horizonte: Conselho Regional de Engenharia e Arquitetura de Minas Gerais, 2018.

CARVALHO, P. C. M. de; NETO, M. R. B. **Geração de Energia Elétrica – Fundamentos**. 1 ed. São Paulo: Érica, 2012.

CASSINI, S. T. **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás**.1 ed. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003.

CAVALCANTI, W. M. Geração de créditos de carbono e a análise do sistema de contas ambientais de energia – SCEA. Revista Eixos Tech, Passos, v. 11, n. 3, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.18406/2359-1269v11n32024411. Acesso em: 14 jul. 2024.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, CETESB. 2009. **Guia para a elaboração de inventários corporativos de emissões de Gases do Efeito**

Estufa (GEE). São Paulo. Disponível em: cartilha_ghg_online.pdf (cetesb.sp.gov.br). Acesso em 26 mai. 2024.

CHAGAS, R. M.; FEITOSA, J. R. T.; FERREIRA, N. B. V. Crédito de carbono e sua aplicabilidade: Estudo de caso em uma empresa hidroelétrica no interior de Rondônia. **Revista FAROL**, Rondônia, v. 16, n. 16, p. 50-56, jul. 2022. Disponível em: https://revista.farol.edu.br/index.php/farol/article/view/382/242. Acesso em: 26 mai. 2023.

CHERNICHARO, LEMOS C. A. de. **Reatores Anaeróbios**. 2 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.

COELHO, S. T.; GARCILASSO, V. P.; FERRAZ JUNIOR, A. D. N.; SANTOS, M. M.; JOPPERT, C. L. **Tecnologias de produção e uso de biogás e biometano**. 218 p. ISBN: 978-85-86923-53-1. São Paulo: IEE-USP, 2018. Disponível em: http://gbio.webhostusp.sti.usp.br/sites/default/files/anexosnoticias/livro-tecnologias-producao-uso-biogas-biometano.pdf. Acesso em: 25 mai. 2023.

CRUZ, U. B. de. **Inventário de emissões de gases do efeito estufa e estratégias de mitigação em instituições de ensino superior: O caso da Universidade Federal de Sergipe**. 2020. 266 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal da Bahia, Núcleo de Pós-Graduação em Administração da Escola de Administração, Salvador, 2020.

DA SILVA, D. M. S.; CAVALCANTI, J. V. F. L.; JÚNIOR, A. N. do F; PERES, S.; ALVES, M. M.; BENACHOUR, M. Biogas production and greenhouse gas mitigation using fish waste from Bragança/Brazil. **Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly,** Recife, 29 (4), p. 319−331, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.2298/CICEQ220614004S. Acesso em 15 jun. 2024.

DINIZ, Eduardo H.; YAMAGUCHI, João Akio; SANTOS, Teresa Rachael dos; CARVALHO, André Pereira de; ALÉGO, André Salem; CARVALHO, Mateus. Greening inventories: blockchain to improve the ghg protocol program in scope 2. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 291, p. 125900, abr. 2021. Elsevier BV.

ENERGIA E BIOGÁS. **O que é biogás, biometano e digestato?** Disponível em: https://energiaebiogas.com.br/biogas. Acesso em: 16 ago. 2023.

EPA, United States Environmental Protection Agency (2024). **Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks 1990-2022**. Disponível em: us-ghg-inventory-2024-main-text_04-18-2024.pdf (epa.gov). Acesso em 26 mai. 2024.

FABRETI, A. A. Pós-tratamento de efluente de lagoa de estabilização através de processo físico-químico. 2006. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária), São Paulo, 2006. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-09032007-163934/pt-br.php. Acesso em: 06 jul. 2024.

FILHO, J. A. C. **Biogás Independência Energética do Pantanal Mato-Grossense**. Corumbá, EMBRAPA – Unidade de Execução de Pesquisa de Âmbito Estadual de Corumbá, 1981. Circular Técnica nº 9.

FRANQUETO, R.; MARTINS, E. H.; CABRAL, A. R.; SCHIRMER, W. N. (2020). Monitoramento de emissões fugitivas a partir da camada de cobertura de aterro sanitário. **Revista Uningá Review**, Maringá, v. 35.

FRONDIZI, I. M de R. L. **O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo: Guia de Orientação 2009**. Rio de Janeiro: Imperial Novo Milênio, 2009.

FUNDAÇÃO BANCO DO BRASIL. **Guia para elaboração de Projetos de MDL com geração de trabalho e renda**. 2010. Disponível em: https://www.issuelab.org/resources/19265/19265.pdf. Acesso em: 02 jun. 2023.

Fundação Getúlio Vargas (FGV). **Especificações de Verificação do Programa Brasileiro GHG Protocol**. 2011. Disponível em: https://repositorio.fgv.br/server/api/core/bitstreams/ab3a77f9-921a-4df7-a281-bb1340963a47/content. Acesso em: mar. 2024.

FONSECA, C.; FRARE, L. M.; D'ÁVILA, L.; EDWIGES, T. 2020. Influence of different waste compositions from tilapia fish on methane production**. Jounal of Cleaner Production**, 265, 121795.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS (FGV). **PROGRAMA BRASILEIRO GHG PROTOCOL**. 2023a. Disponível em: https://eaesp.fgv.br/sites/eaesp.fgv.br/files/u641/faq_ghg_2023_v1.0.pdf.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS (FGV). **Programa Brasileiro GHG Protocol. 2023**. Atualizações da ferramenta Ciclo 2023. Disponível em: comunicado_ferramenta.pdf (fgv.br). Acesso em: jun. 2024.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS (FGV). Nota técnica: definição das categorias emissões de gases de efeito estufa (GEE) de Escopo 1 – versão 4.0, 2018. Disponível em: https://repositorio.fgv.br/server/api/core/bitstreams/9174f356-eaee-46cf-a0c1-4c55969e07d9/content. Acesso em: mar. 2024.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS (FGV). Nota técnica: Definição das categorias emissões de gases de efeito estufa (GEE) de Escopo 2 – versão 1.0, 2018b. Disponível em: https://repositorio.fgv.br/server/api/core/bitstreams/36827f62-f18b-4cc2-9312-75c147f9b4f3/content. Acesso em: mar. 2024.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS (FGV). Nota técnica: Definição das categorias emissões de gases de efeito estufa (GEE) de Escopo 3 – versão 2.0, 2018c. Disponível em: https://repositorio.fgv.br/server/api/core/bitstreams/53ebbde3-aa33-498d-b791-0468bf3b36c4/content. Acesso em: mar. 2024.

FURTADO, A. C., LINS, L. P., MITO, J. Y. L. de, PADILHA, J. C. O aproveitamento energético do biogás como ferramenta para os objetivos do desenvolvimento

sustentável. **INTERAÇÕES**, Campo Grande, MS, v.23, n.4, p. 1275-1286, out./dez. 2022.

HASAN, C.; FEITOSA, A. K.; SILVA, M. C. de A.; MARDER, M.; KONRAD, O. Produção de Biogás a partir de resíduos agroindustriais: Análise dos teores de sólidos totais, voláteis e fixos em amostras pré e pós digestão anaeróbia. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 8, n. 1, p, 257-273, 2019.

HERNÁNDEZ, J. G. V.; BODNAR, Z. Mercado de Créditos de Carbono desde la perspectiva de la gobernanza climática transnacional: Experiencias de Brasil y Colombia. **Revista Novos Estudos Jurídicos**, eletrônica, v. 27, n. 3, set-dez, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.14210/nej.v27n3.p452-474. Acesso em: 07 jul. 2023.

IPCC. Technical Sumary. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. 2019. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2022/11/SRCCL_Technical-Summary.pdf. Acesso em: set. 2023.

JUNIOR, J. C. S. da; SOUZA de, F. D.; BARBOZA, M. G.; VICH, D. V.; SALOMON, K. R. Inventário das emissões de gases de efeito estufa (GEE) em uma companhia de saneamento. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica**, Alagoas, v. 15, nº 2, p. 530-547. Disponível em: https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.2.75644. Acesso em: 16 jun. 2024.

JUNIOR, O. P. Da S. Pós-tratamento físico-químico de efluente de lagoas de estabilização: potencialidade da utilização do lodo na construção civil. 2022. 162 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento), São Carlos, 2022. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-07122022-120937/pt-br.php. Acesso em: 06 jul. 2024.

KARLSSON, T; KONRAD, O.; LUMI, M.; SCHMEIER, N. P.; MARDER, M.; CASARIL, C. E.; KOCH, F. F.; PEDROSO, A. G. **Manual básico de biogás**. 1ª ed. Lajeado: Ed. Da Univates, 2014.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C.do. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Concórdia: Sbera; Embrapa Suínos e Aves, 2019.

LINS, E. A. M.; SILVA, J. M. da; PEREIRA, V. C. H.; LEMOS, L. C. C. L. de; FERNANDES, R. G. F. B. Análise e recomendações para a gestão dos resíduos urbanos no bairro de Caixa da Água, Olinda, Pernambuco. In: Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, XIV, 2023, Natal. **Anais**. Natal: IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais. Disponível em: https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2023/III-001.pdf. Acesso em 30 jun. 2024.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA. **Gov.br**. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/brasil-tera-50-da-matriz-energetica-limpa-ate-2030. Acesso em: 07 jun. 2023.

MOREIRA, J. R. S. *et al*. **Energias Renováveis, geração distribuída e eficiência energética.** 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

MOTTA, F. S. da. **Produza sua energia. Biodigestores anaeróbios**. Recife Gráfica Editora S.A., janeiro 1986.

NUVOLARI, A. **Esgoto Sanitário: Coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola**. 2ª edição. São Paulo: Blucher, 2011.

OLIVEIRA, Y. P. L. de. Desafios do mercado de carbono após o acordo de Paris: Uma revisão. **Meio Ambiente (Brasil).** V. 4, n. 1, p. 02-20, 2022.

OJEA, A. P. C. dos, S; MARENDA, T.; HERNANDEZ, O. A. D.; AISSE, M. M.; . Avaliação Preliminar do desempenho e produção de biogás de um biodigestor anaeróbio a partir da codigestão de lodo de ETE com resíduos orgânicos urbanos e industriais. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 32, 2023, Curitiba. **Anais**. Curitiba: 32º Congresso da ABES .

PARANÁ. **Lei nº 19500 de 21/05/2018**. Dispõe sobre a Política Estadual do Biogás e Biometano e adota outras providências. Legislação do estado do Paraná, Palácio do Governo, 21 de maio de 2018. Disponível em: https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=360329#:~:text=Disp%C3%B5e%20sobre%20a%20Pol%C3%ADtica%20Estadual,Biometano%20e%20adota%20outras%20provid%C3%AAncias. Acesso em: 27 nov. 2023.

PARVEZ, K.; AHAMMED, M. M. K. Effect of composition on anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid wastes: A review. **Bioresource Technology Reports**, v. 25, p.101777, 2024.

REVISTA ANALYTICA. Lodo de esgoto: fonte sustentável de nutrientes. 2020. Disponível em: https://revistaanalytica.com.br/lodo-de-esgoto-fonte-sustentavel-de-nutrientes/#:~:text=O%20Marco%20Legal%20do%20Saneamento,de%20tratamento%20de%20efluentes%20sanit%C3%A1rios. Acesso em: 06 jul. 2024.

ROBERTA JANSEN. Cop-28 e mudanças climáticas: quais países são os maiores poluidores? Disponível em: https://www.terra.com.br/planeta/noticias/cop-28-e-mudancas-climaticas-quais-paises-sao-os-maiores-poluidores-veja-grafico,4f2a2dfb15eb7c98ef106001129b6961chx93gm8.html. Acesso em: 09 mar. 2024.

RODIN, V.; LINDORFER, J.; BÖHM, H.; VIEIRA, L. Assessing the potential of carbn dioxide valorisation in Europe with focus on biogenic CO2. **Journal of CO2 Utilization**. V41, 2020, 101219, issn 2212-9820.

RODRIGUES, L. S Dos; SPELTA, A. C. F.; SANTOS, R. P. De; LIMA, C. A. De; DUTRA, J. C. Da F.; SILA, I. J. Da. 2014. Avaliação de reator anaeróbio de manta

de lodo no tratamento de efluentes de frigorífico. B. Indústr. Anim., Nova Odessa, v.71, n.4 p.365-370.

SALES, M. A. M. P. Aplicação de lodo granular aeróbio e consórcio algal-bacteriano no tratamento de esgoto doméstico: formação, mecanismo de remoção de nutrientes e balanço de oxigênio. 2023. 122 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023. Disponível em: https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/55964. Acesso em: 06 jul. 2024.

SANEPAR. **Inventário de Gases do Efeito Estufa**. 2023. Disponível em: rev01_gpda_inventariogee_2022.pdf (sanepar.com.br). Acesso em: 21 abr. 2024.

SANTOS, J. J. N. Dos. **Eficiência de biowindows para mitigação das emissões fugitivas de metano em aterros sanitários de regiões semiáridas**. 2023. 162 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2023.

SANTOS, R. A. Dos. **Biodegradação de lodo de ETA e ETE avaliada mediante ensaios de toxicidade e caracterização microbiológica**. 2023. 122 f. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) – Instituto de Biociências do Campus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2023. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/items/0c57d4e8-2f2d-4578-878b-dac2dc2a567c. Acesso em: 06 jul. 2024.

SCHEUTZ, C.; KJELDSEN, P. Guidelines for landfill gas emission monitoring using the tracer gas dispersion method. **Waste Management**, v. 85, p. 351-360, 2019.

SCHMIDELL, W. Coleção biotecnologia industrial, Volume 2 - Engenharia Bioquímica**.** 2 ed. São Paulo: **Bluche**r, 2021.

SEADI, T. Al; RUTZ, D; OLIVEIRA, M; KÖTTNER, T.; OLIVEIRA, A.; VOLK, R.; JANSSEN, R. **BioGas Handbook.** Esbjerg, University of Southern Denmark Esbjerg, 2008. E-book. Disponível em: https://www.lemvigbiogas.com/BiogasHandbook.pdf. Acesso em: 14 nov. 2023.

SILVA, A. F. **Créditos de carbono no contexto brasileiro: aspectos fiscais**. 2023. 105 f. Dissertação (Mestrado em Direito) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/76239. Acesso em: 07 jul. 2024.

SILVA, da L. M. R. **Aproveitamento de biogás em sistemas híbridos de energias renováveis para estações de tratamento de esgoto**. 2022. 110 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/handle/10183/239158. Acesso em: 13 nov. 2023.

SILVA, D. H. da. **Protocolos de Montreal e Kyoto: pontos em comum e diferenças fundamentais**. 2009. Revista Brasileira de Políticas Internacionais, v. 52, n. 2, p. 155-172.

SIMONCINI, J. B. V. B.; TANAGINO, P. I. D.; DE PAULA, R. C. A.; MARQUES, M. D. Educação ambiental e resíduos sólidos urbanos no Brasil. **Associação Propagadora Esdeva**, Seminário de Pesquisa e Extensão, VIII, Juiz de Fora, v. 8, n.1, 2022.

SLOPIECKA, K., LIBERTI, F., MASSOLI, S., BARTOCCI, P., FANTOZZI, F. Chemical and physical characterization of food waste to improve its use in anaerobic digestion plants. **Energy Nexus**, v. 5, p. 100049, 2022.

SOUZA, T. A. de. Fontes alternativas de energia no Brasil: biomassa, eólica e solar. 2022. **UniAcademia**, v. 4, n. 1.

SOUZA, A. L. de; RIZZATTO, M. L. **Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos: uma revisão**. Matão: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, 2022.

SWEDISH TECHNOLOGY CENTRE. **Basic data on biogas**. 2 nd. ed. Malmö, Suécia: SGC, 2012.

TEIXEIRA, R. L. P. Energias renováveis no nordeste do Brasil e as relações com a adaptação às mudanças climáticas. 2023. 349 f. Tese (Doutorado em Estudos Urbanos e Regionais) – Setor de Ciências Humanas, Letras e Artes. 2023. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/54913. Acesso em: 20 jul. 2024.

ULLOA-MURILLO, L. M., VILLEGAS, L. M., RODRÍGUEZ-ORTIZ, A. R., DUQUEACEVEDO, M., CORTÉS-GARCÍA, F. J. Management of the organic fraction of municipal solid waste in the context of a sustainable and circular model: Analysis of trends in Latin America and the Caribbean. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, n. 10, p. 6041, 2022.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (**EPA**). (2024). Non-CO2 Greenhouse Gas Emission Projections & Mitigation. Disponível em: Projeções de Emissões de Gases de Efeito Estufa Não-CO2 e Mitigação | EPA dos EUA. Acesso em: 27 abr. 2024.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (**EPA**). (2023). How Do I get Carbon Dioxide Equivalent (CO2e) Results for Nonroad Equipment?. Disponível em: How Do I get Carbon Dioxide Equivalent (CO2e) Results for Nonroad Equipment? | US EPA. Acesso em: 05 mai. 2024.

BARTRAM, D.; EBIE, Y.; FARKAŠ, J; GUENGUEN, C.; KARTHIK, M.; PETERS, G. M.; SHORT, D. M.; ZANZOTTERA, N. M. Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – Chapter 6 Wastewater treatment and discharge. 2019. V.5, ch. 6, pg. 22.

WOOD, D.; RATHNASABAPATHY, M.; STOBER, K. J.; MENON, P. 2024. Challenges and progress in applying space technology in support of the sustainable development goals. **Acta Astronautica**, v. 219, p. 678–692.

YANG, L.; GE, X. 2016. Biogas and Syngas Upgrading. In**:** Advances in Bioenergy. **Elsevier**, v. 1, p. 125-188.

ZENG, Z. C.; PONGETTI, T.; NEWMAN, S. *et al***.** Decadal decrease in Los Angeles methane emissions is much smaller than bottom-up estimates. 2023. **Nature Communications 14**, v.5353. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s41467-023-40964-w.

APÊNDICE 1 – PLANILHA GHG

Programa Brasileiro GHG Protocol
INICIATIVA GVCES

Consolidação para preenchimento no **Registro Público de Emissões (RPE)**

Ferramenta GHG Protocol
Versão 2024.0.2

Orientações

(A) **O primeiro passo para a utiliza da ferramenta é a escolha do ano inventariado**. Esta escolha é essencial, pois há fatores de emissão que variam com base no ano escolhido.
(B) Preencha somente as células LARANJA CLARO das abas da Ferramenta.
(C) Atente-se para a utilização das unidades corretas nos dados inseridos. Se necessário, converta as unidades utilizando a aba 'Fatores de Conversão' antes de preencher a planilha.
(D) Utilize a notação do sistema brasileiro de unidades de medida, utilizando "." para designar milhares e seus múltiplos e "," para designar decimais.
(E) O Menu de Navegação, presente na parte superior de todas as abas da Ferramenta, pode ser utilizado para facilitar a navegação do usuário.
(F) Orientações para cada método de cálculo estão inclusas no cabeçalho da cada aba.

APÊNDICE 2 – PLANILHA GHG – COMBUSTÃO ESTACIONÁRIA

Obs.: Para informações sobre o cálculo de emissões referentes ao consumo de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) consulte a Seção 1, da aba 'Fatores de Emissão'.

Passo 1. Indique a finalidade das atividades da organização inventariante[1]

Fatores de emissão para o setor:	Energia

[1] *O cálculo é efetuado somente quando selecionado o setor de atividade que mais se adequa às atividades da organização.*
Os setores listados seguem o Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática (IPCC) e o Inventário Nacional. Para mais informações, consulte a aba "Fatores de Emissão".
Caso a organização atue em mais de um setor, selecione aquele que melhor representa a atividade exercida pelas fontes de emissão estacionárias.
Caso existam diversas unidades de operação em setores muito distintos, utilize uma planilha para cada unidade.

Passo 2. Indique a quantidade total de combustível consumido para cada unidade, local, ou ponto (de acordo com o tipo de combustível) na Tabela 1.

Se necessário, converta o dado de consumo para coincidir com as unidades apresentadas.

Tabela 1. Fontes estacionárias de combustão

Registro da fonte	Descrição da fonte	Combustível utilizado	Quantidade consumida	Unidades	O combustível utilizado é formado por:		Qu
					Combustível fóssil	Biocombustível	Combu
	gerador	Óleo Diesel (comercial)	20,00	*Litros*	*Óleo Diesel (puro)*	*Biodiesel (B100)*	
	motor acoplado ao gerador de energia elétrica	Biogás (outros)	2.781,73	*Toneladas*	-	*Biogás (outros)*	
	flare	Biogás (outros)	21,32	*Toneladas*	-	*Biogás (outros)*	

Disclaimer | Atualizações | Introdução | **Combustão estacionária** | Combustão móvel | Emissões fugitivas | Processos industriais | Atividades de agri

APÊNDICE 3 – PLANILHA GHG – EMISSÕES FUGITIVAS

Opção 1. Abordagem por estágio do ciclo de vida.

- Unidades novas são aquelas instaladas durante o ano inventariado. Para unidades novas, só devem ser contabilizados os dados de carga para unidades compradas vazias. Não inclua dados para unidades novas que foram pré-carregadas pelo fabricante.
- Unidades dispensadas são unidades que foram dispensadas/descartadas durante o ano inventariado.
- Unidades existentes são todas as outras unidades que não as novas e dispensadas.
  - Carga / Recarga = gás adicionado a unidades pela organização ou fornecedor (não inclua pré-cargas feitas pelo fabricante).
  - Capacidade = a soma das capacidades de todas as unidades (não inclua pré-cargas feitas pelo fabricante).
  - Quantidade Recuperada = total de gás recuperado de todas as unidades dispensadas

O cálculo utiliza a equação: **E = (EUN + EUE + EUD) * GWP**, em que:

E = emissões em CO_2e (kg);

EUN = emissões da instalação de novas unidades: gás usado para carregar o equipamento novo menos capacidade do equipamento (a diferença corresponde às perdas para a atmosfera);

EUE = gás adicionado a unidades existentes como manutenção pela organização ou fornecedor (não inclui pré-cargas feitas pelo fabricante);

EUD = emissões do descarte de unidades antigas: capacidade da unidade dispensada menos a quantidade de gás recuperada (a diferença corresponde às perdas para a atmosfera).

Tabela 1. Emissões de GEE por equipamentos de RAC e extintores - balanço de materiais por estágio do ciclo de vida

Registro da fonte	Gás ou composto	GWP	Unidades Novas		Unidades Existentes	Unidades Dispensadas		E = Emissões de CO_2e (t)
			Carga (kg)	Capacidade (kg)	Recarga (kg)	Capacidade (kg)	Recuperada (kg)	
extintor	Dióxido de carbono (CO2)	1			40,00	10,00	10,00	0,04

APÊNDICE 4 – PLANILHA GHG – ENERGIA ELÉTRICA (LOCALIZAÇÃO)

Sistema Interligado Nacional (SIN)

- A unidade de entrada para os cálculos é **MWh** (megawatt-hora). Se necessário, faça a conversão.
- Para cada unidade ou estrutura, informe apenas as quantidades mensais **OU** o total anual. **NÃO** preencha as duas opções simultaneamente.
- Caso sejam inseridos dados conflitantes (consumo anual **E** mensal), a ferramenta indicará o conflito mudando a formatação da célula e o usuário deverá corrigir o preenchimento.
- Dê preferência ao relato mês a mês (estimativa mais precisa). Na ausência de dados mensais de consumo, informe o consumo total anual.

Tabela 1. Quantidade total mensal ou anual de eletricidade comprada, proveniente do SIN, i 2022

Registro da fonte	Descrição da Fonte	Eletricidade Comprada (MWh)													Eletricidade total comprada (MWh)	Emissões								
		Relate aqui a compra mensal de eletricidade (MWh)												Relate aqui a compra anual de eletricidade (MWh)		Emissões mensais de CO_2 (t)								
		jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez			jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	s
															1380	5,660	6,432	10,440	11,410	10,164	6,084	7,720	20,992	
	funcionamento administrativo da planta	423	318	360	329	399	372	435	394	544	575	551	540		5.240,347	30,956	15,980	14,613	7,101	11,180	16,378	18,211	18,028	2
Total		422,902	317,977	359,804	328,911	398,911	371,71	434,982	394,373	543,668	575,319	551,47	540,32	0	5240,347	30,96	15,98	14,61	7,10	11,18	16,38	18,21	18,03	

Sistemas isolados

Emissões totais de compra de eletricidade - abordagem baseada em localização

Tabela 4. Emissões totais por compra de energia elétrica - abordagem por localização

Emissões totais em CO_2 equivalente (toneladas métricas)	224,307
Emissões totais de CO_2 biogênico (toneladas métricas)	-

APÊNDICE 5 – PLANILHA GHG – TRANSPORTE & DISTRIBUIÇÃO (UPSTREAM)

Opção 4. Caso não possua a quantidade de combustível consumida, estime as emissões com base na distância percorrida pela frota e idade da frota.

- Escolha primeiro o ***Tipo da frota de veículos*** e depois o ***Ano da frota*** .
- Para cada veículo ou grupo de veículos, informe apenas as distâncias mensais **OU** a distância anual. **NÃO** preencha as duas opções simultaneamente.
- Caso sejam inseridos dados conflitantes (distância anual **E** mensal), a ferramenta indicará o conflito mudando a formatação da célula e o usuário deverá corrigir o preenchimento.
- Dê preferência ao relato mês a mês. Na ausência de dados mensais sobre a distâncias percorridas, informe o total anual.

Tabela 4. Cálculo de emissões por distância percorrida e idade da frota no ano c 2022

Registro da frota	Descrição da frota	Tipo da frota de veículos	Ano da frota	Escolha um tipo de relato (mensal ou anual)										
				Distância mensal percorrida (km)										
				jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	n
		Caminhão - rígido (3,5 a 7,5 toneladas)	2003	1.250,00	1.250,00	1.250,00	1.250,00	1.250,00	1.250,00	1.250,00	1.250,00	1.250,00	1.250,00	
		Caminhão - rígido (3,5 a 7,5 toneladas)	2004	1.250,00	1.250,00	1.250,00	1.250,00	1.250,00	1.250,00	1.250,00	1.250,00	1.250,00	1.250,00	
		Caminhão - rígido (3,5 a 7,5 toneladas)	2010	1.250,00	1.250,00	1.250,00	1.250,00	1.250,00	1.250,00	1.250,00	1.250,00	1.250,00	1.250,00	
		Caminhão - rígido (3,5 a 7,5 toneladas)	2012	1.250,00	1.250,00	1.250,00	1.250,00	1.250,00	1.250,00	1.250,00	1.250,00	1.250,00	1.250,00	
Total														

Transporte ferroviário

Orientações:

(A) Utilize essa seção da planilha apenas para relatar as emissões referentes a transporte ferroviário de carga realizado por empresa terceira.
Emissões de frotas de outros modais devem ser estimadas e/ou relatadas nas outras seções desta aba.
(B) Emissões por consumo de eletricidade no transporte ferroviário devem ser contabilizadas no Escopo 2. Para isso, utilize a aba "Compra de Energia Elétrica".
(C) **Escolha** entre a Opção 1 (cálculo por distância percorrida) **OU** a Opção 2 (cálculo por consumo de combustível).
A opção 1 é mais precisa que a opção 2. **Não preencha a mesma fonte emissora em mais de uma opção.**
(D) Preencha os dados somente nas células em LARANJA CLARO, utilizando as unidades corretas.

Opção 1. Utilize esta opção caso possua a distância percorrida e o peso da carga transportada.

- Em ***Concessionária*** , indique o nome da concessionária ferroviária que prestou o serviço de transporte.
- Consulte o mapa da malha ferroviária brasi http://www.antf.org.br/mapa-ferroviario/
- Caso não possua essa informação, escolha "média nacional".
- O fator de emissão está relacionado à distância percorrida (em km) e quantidade da carga transportada (em t). Atenção com os dados de distância percorrida por cada carregamento para evitar dupla contabilização.

Tabela 5. Cálculo de emissões por transporte de carga fracionada com base na distância percorrida no an 2022

Descrição da frota			Carga transportada	distância x	Fator de emissão	Fator de emissão de	Fator de emissão de	Emissões de	Emissões de	Emissões de	Emissões

APÊNDICE 6 – PLANILHA GHG – RESÍDUOS SÓLIDOS RESTANTES DA OPERAÇÃO

- Preencha o fator de emissão de CH_4 do processo de incineração. Se não possuir, deixe em branco, será utilizado o default sugerido por IPCC, (2019) que é zero, devido às altas incertezas a respeito das emissões de CH_4.
- Preencha o fator de emissão de N_2O do processo de incineração. Se não possuir, deixe em branco, será utilizado o default sugerido por IPCC, (2019).

Fator de emissão de CH_4 do processo de incineração		[g CH_4/t de resíduo (base úmida)]
Fator de emissão de N_2O do processo de incineração		[g N_2O/t de resíduo (base úmida)]

Tabela 3. Emissões totais de resíduos tratados por incineração

	Ano	2022
Emissões de CO_2 fóssil	[tCO_2/ano]	282,42
Emissões de CH_4	[tCH_4/ano]	-
Emissões de N_2O	[tN_2O/ano]	-
Emissões de CO_2 biogênico	[tCO_2/ano]	77,15
Emissões em CO_2e no ano inventariado	[tCO_2e/ano]	282,42

Emissões totais do tratamento de resíduos sólidos

Tabela 4. Emissões totais de resíduos sólidos de Escopo 3

Emissões totais em CO_2 equivalente (toneladas métricas)	8.702,71
Emissões totais de CO_2 biogênico (toneladas métricas)	161,949

[1] - Methane Correction Factor - Fator de correção do metano. (IPCC, 2006)

[2] - Nas emissões de CO_2 biogênico, são consideradas as emissões de CO_2 provenientes da queima de CH_4 em flares em aterros. Além disso, também são contabilizadas

APÊNDICE 7 – PLANILHA GHG – EFLUENTES GERADOS NA OPERAÇÃO

Tabela 3. Emissões Totais de Efluentes Líquidos industriais

Emissões de CH_4 por tratamento e/ou disposição final de efluentes	[tCH_4/ano]	262,73
Emissões de N_2O por tratamento e/ou disposição final de efluentes	[tN_2O/ano]	0,00
Emissões em CO_2e por tratamento e/ou disposição final de efluentes	[tCO_2e/ano]	7.356,55
Emissões em CO_2 biogênico por tratamento de efluentes	[tCO_2/ano]	-

Emissões totais do tratamento de efluentes

Tabela 5. Emissões Totais de Efluentes Líquidos

Emissões de CH_4 por tratamento e/ou disposição final de efluentes	[tCH_4/ano]	262,73
Emissões de N_2O por tratamento e/ou disposição final de efluentes	[tN_2O/ano]	0,00
Emissões em CO_2e por tratamento e/ou disposição final de efluentes	[tCO_2e/ano]	7.356,55
Emissões em CO_2 biogênico por tratamento de efluentes	[tCO_2/ano]	-

Tabela 2. Emissões totais de efluentes líquidos de Escopo 3

Emissões totais em CO_2 equivalente (toneladas métricas)	7.356,55
Emissões totais de CO_2 biogênico (toneladas métricas)	-

APÊNDICE 7 – BIOGAS MAP – PANOMARA DO BIOGÁS NO PARANÁ

BIOGASMAP

CIBIOGAS ENERGIAS RENOVÁVEIS

Consulte nesta aba o atual panorama brasileiro de plantas de biogás. Utilize o menu lateral para filtrar o conteúdo de seu interesse

Panorama do Biogás - 2022

Selecione a região ou estado de interesse

Região

Sul

Estado

Paraná

Selecione as características das plantas de biogás

Fonte de Substrato

RSU ou Esgoto

Status Operacional

Todos

Escala de produção

Todos

Principal uso do biogás

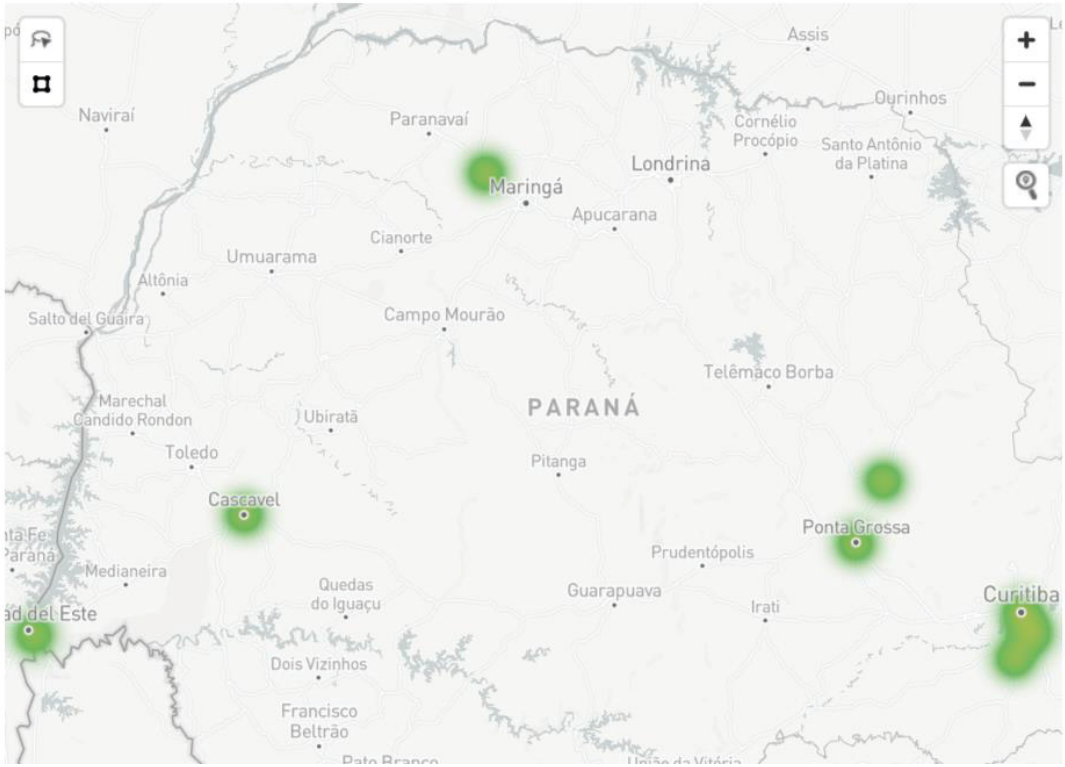
Todos

N° de Plantas

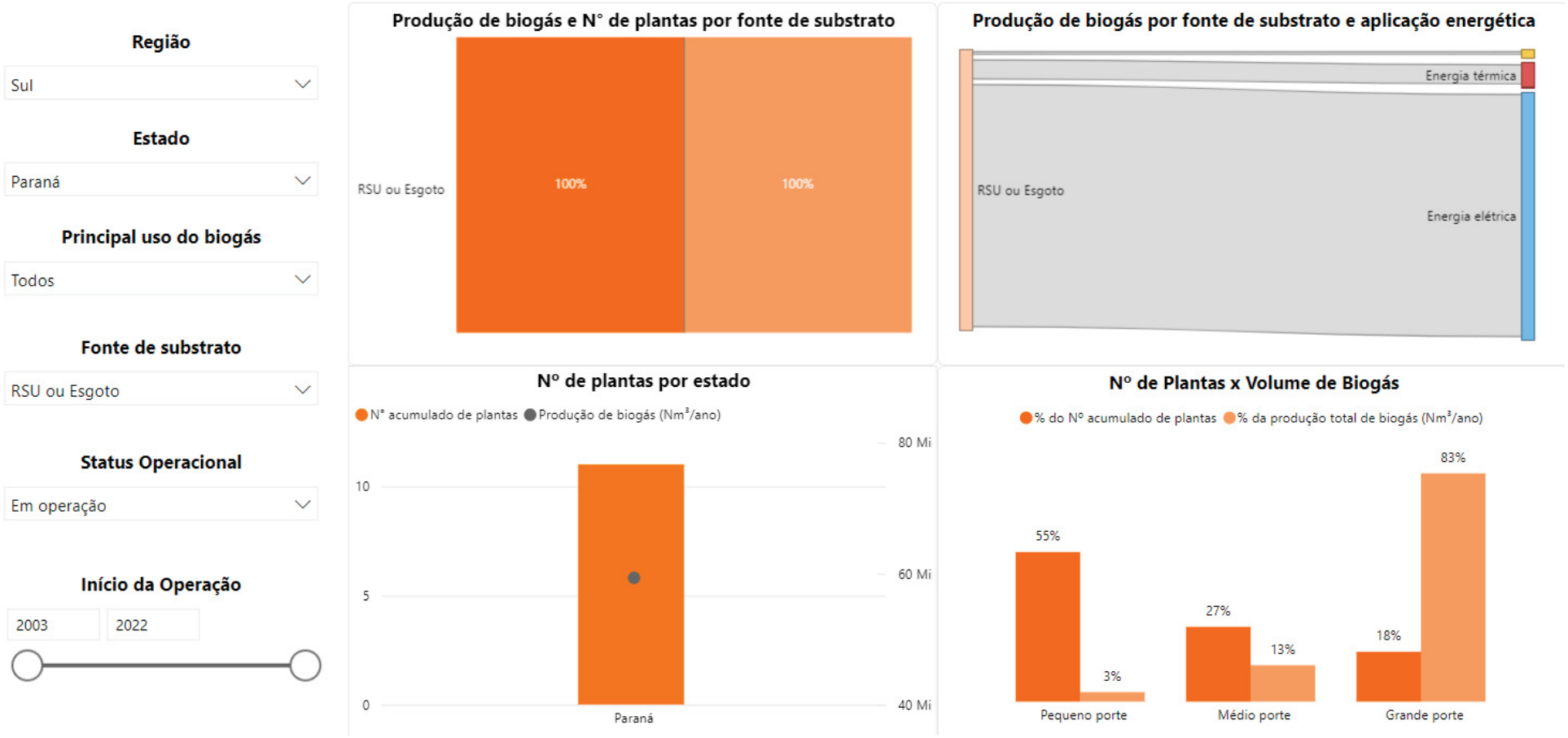
11

Produção de biogás (Nm³/ano)

59,35 Mi



APÊNDICE 8 – BIOGAS MAP – NÚMERO DE PLANTAS POR FONTE DE SUBSTRATO



APÊNDICE 9 – BIOGAS MAP NÚMERO DE PLANTAS NO PARANÁ EM OPERAÇÃO E PRODUÇÃO

Região

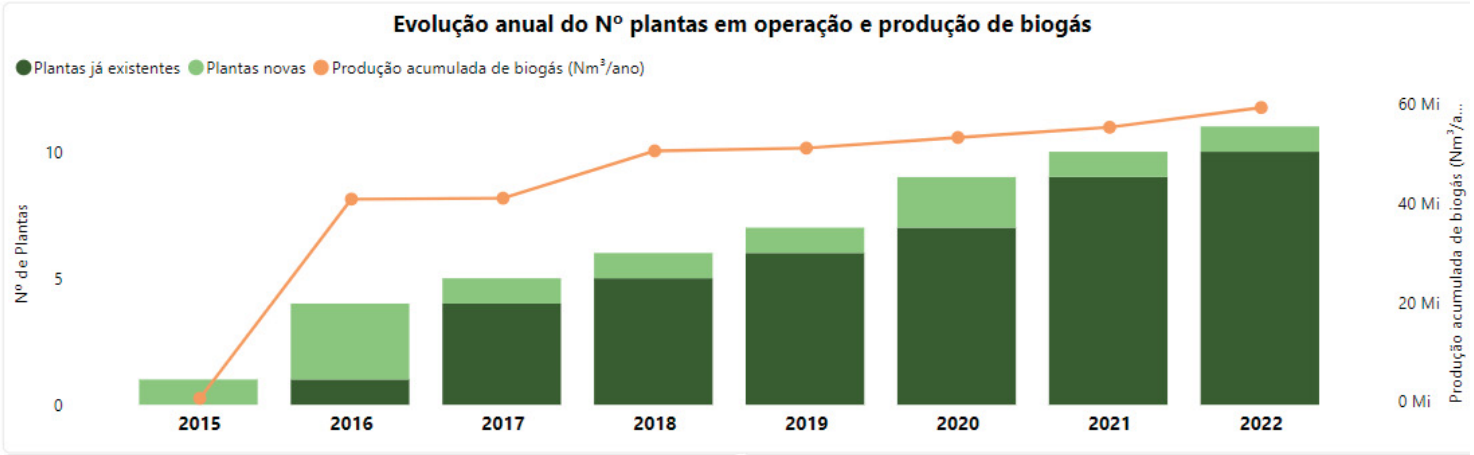
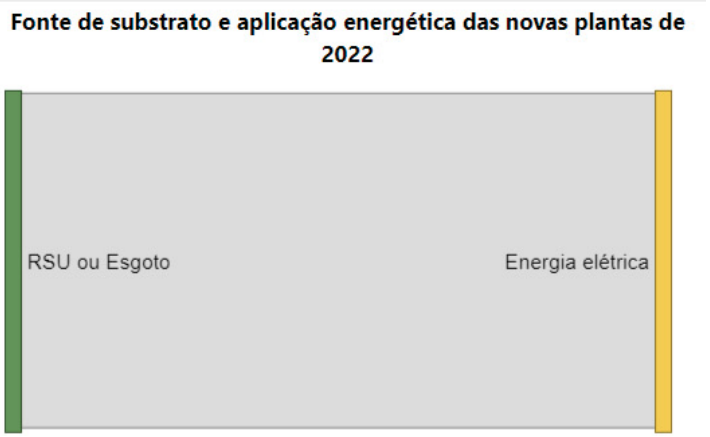
Sul

Estado

Paraná

Principal uso do biogás

Todos

Fonte de substrato

RSU ou Esgoto