



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Maria Natalia da Silva

**Análise das Emissões Gasosas de uma planta de Digestão Anaeróbia a partir
da Co-digestão de Lodo de ETE com resíduos Orgânicos Urbanos e
Industriais.**

Florianópolis

2024

Maria Natalia da Silva

Análise das Emissões gasosas de uma planta de Digestão Anaeróbia a partir da Co-digestão de Lodo de ETE com resíduos Orgânicos Urbanos e Industriais.

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental

Orientador(a): Prof.(a) Nelson Libardi Junior
Coorientador(a) MSc.(a) Carolina Bayer Gomes Cabral

Florianópolis

2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Da Silva, Maria Natalia

Análise das emissões gasosas de uma planta de digestão anaeróbia a partir da codigestão de lodo de ETE com resíduos orgânicos urbanos e industriais. / Maria Natalia Da Silva ; orientador, Nelson Libardi Junior , coorientadora, Carolina Bayer Gomes Cabral, 2024.

83 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental,
Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Co-digestão anaeróbia; . 3. Emissões de Gases de Efeito Estufa. 5. Ferramenta ECAM. I. Junior , Nelson Libardi . II. Cabral, Carolina Bayer Gomes . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. IV. Título.

Maria Natalia da Silva

Análise das Emissões gasosas de uma planta de Digestão Anaeróbia a partir da Co-digestão de Lodo de ETE com resíduos Orgânicos Urbanos e Industriais.

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental e aprovado em sua forma final pelo Curso Engenharia Sanitária e Ambiental.

Florianópolis, 03 de julho de 2024.

Insira neste espaço
a assinatura

Prof. Bruno Segalla Pizzolatti, Dr.

Banca examinadora

Insira neste espaço
a assinatura

Prof.(a) Nelson Libardi Junior Dr.(a)

Orientador(a)

Insira neste espaço
a assinatura

MSc.(a) Carolina Bayer Gomes Cabral

Co-orientadora

Prof. Paulo Belli Filho, Dr.

Avaliador

Universidade Federal de Santa Catarina

MSc. Sebastian Rosenfeld

Avaliador

Rotária do Brasil

Florianópolis, 2024.

A Sonia (in memoriam),
devo tudo isso a você. Obrigada.

AGRADECIMENTOS

Meu sincero agradecimento à minha mãe, Sônia Maria (in memoriam), que encheu minha casa de livros, meus pensamentos de sonhos e meu coração de carinho. Não existem palavras suficientes para expressar minha gratidão a você. Ao longo da jornada da engenharia e da vida, entendi que ainda não existe equação que quantifique a saudade que eu sinto de você. Ao meu pai, Valério, que me auxiliou nessa jornada e confiou nas minhas escolhas, mesmo que isso significasse minha ausência e distância de casa, muito obrigada pai, sem você nada disso seria possível.

Ao Guilherme, que ao longo desses anos tornou-se meu maior motivador. Muito obrigada pelas idas à BU nos finais de semana, pelas conversas sobre engenharia, por ser essa pessoa tão nobre e por sempre me colocar pra cima. A Fransisco e Aparecida, por serem pessoas tão incríveis como seu filho.

Ao Professor Nelson, por acreditar na ideia deste TCC, por ser sempre tão aberto às minhas ideias e por me acalmar nesta etapa final da universidade. A Carol, que além de ser minha co-orientadora, tornou-se uma referência como pessoa e engenheira para mim. Ao Bruno, por me auxiliar em grande parte do TCC. Ao Sebastian, minha sincera gratidão por aceitar participar da banca, mesmo com tantas tarefas em sua agenda.

À Rotária do Brasil, por ceder as informações necessárias para que este TCC acontecesse. Ao Orlando, Thiago, Claudinei, Emídio e todos da Rotária Operação na Usina, que me receberam tão bem e ajudaram no desenvolvimento deste estudo.

Aos meus amigos que tive a felicidade de encontrar durante esses anos na UFSC: Andreza, Carlos, Mônica, Amanda M e Giovanna. Obrigada por todas as conversas, festas, risadas e estudos. Aos amigos do fim do período: Renata e Amanda, foi um prazer dividir as dores do final da graduação com vocês.

Aos amigos que fizeram de Florianópolis uma casa: Douglas, Brenda, Eduardo, Adrielly. Às minhas amigas de estágio: Victória e Alice, obrigada pelas conversas, risadas e por aliviarem o peso desta finalização de curso!

Por fim, à Universidade Federal de Santa Catarina, pela excelência de ensino, e aos professores do ENS, por repassarem sua sabedoria com maestria.

“Nunca o homem inventará nada mais simples nem mais belo do que uma manifestação da natureza. Dada a causa, a natureza produz o efeito no modo mais breve em que pode ser produzido.” (VINCI, [s.d.])

RESUMO

A economia global contemporânea, baseada em um modelo linear de mercado, enfrenta desafios significativos devido à crescente demanda por recursos naturais e à sua finitude. No setor de saneamento, o aumento populacional e a produção excessiva de resíduos agravam esses desafios. As plantas de co-digestão anaeróbia se alinham aos princípios da economia circular ao transformar resíduos em recursos valiosos, como biogás e energia, contribuindo para a redução da poluição e a otimização do uso de recursos naturais. No entanto, à medida que novas plantas surgem, há uma lacuna de estudos e padrões estabelecidos, especialmente para cálculos precisos das emissões de gases de efeito estufa (GEE), limitando a capacidade de avaliação ambiental e dificultando a formulação de políticas públicas eficazes. Este estudo teve como objetivo identificar as principais fontes de GEE em uma planta de digestão anaeróbia que realiza a co-digestão de resíduos industriais e orgânicos urbanos, localizada em São José dos Pinhais, PR. Também se buscou quantificar as emissões utilizando a ferramenta *ECAM* e compará-las com cálculos manuais, identificando desafios inerentes a esses métodos. Para obter os resultados, foram realizadas visitas à planta durante duas semanas, além da quantificação manual e por meio da ferramenta *ECAM*. A análise do escopo da planta de co-digestão e dos principais focos de emissões revelou que as principais fontes primárias de GEE estão relacionadas a perdas de biogás durante o processo, ao consumo indireto de energia elétrica e ao transporte de lodo para o aterro sanitário. Fora do escopo do projeto da usina, as emissões do digestato no aterro sanitário também são significativas. Após a realização de todos os cálculos na ferramenta *ECAM*, notou-se uma diferença de 15,6% entre os resultados obtidos pela ferramenta *ECAM* e os cálculos manuais. As emissões totais geradas pela usina somaram 3.542.329 kgCO₂eq com a ferramenta *ECAM*, em comparação com 2.991.016 kgCO₂eq calculados manualmente. A maior discrepância foi encontrada no cálculo das emissões indiretas de eletricidade com uma diferença de 89%, seguida pela co-digestão, que apresentou uma diferença de 17,7%. As diferenças no transporte de lodo foram mínimas, com uma variação de apenas 0,2%, indicando que ambas as metodologias estão alinhadas nessa categoria específicas. Essas divergências são atribuídas à falta de atualização na ferramenta *ECAM*, especialmente quanto aos valores mais recentes do Potencial de Aquecimento Global (GWP), e à não utilização de dados nacionalizados para o cálculo das emissões de GEE no setor da eletricidade. Essa discrepância destaca a importância da atualização das ferramentas, incluindo o *ECAM*, e a necessidade de personalização para a quantificação precisa das emissões. Além disso, há uma carência significativa de materiais e estudos sobre esses cálculos no Brasil, o que ressalta a urgência de pesquisas futuras. Sugere-se um estudo futuro para quantificar as emissões na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) adjacente a planta desse estudo, comparando a realidade atual com um cenário sem a planta de codigestão, visando demonstrar a importância e os benefícios da planta de codigestão na redução das emissões de GEE.

Palavras-chave: Co-digestão anaeróbia; Emissões de Gases de Efeito Estufa; Ferramenta *ECAM*.

ABSTRACT

The contemporary global economy, based on a linear market model, faces significant challenges due to the growing demand for natural resources and their finiteness. In the sanitation sector, population growth and excessive waste production exacerbate these challenges. Anaerobic co-digestion plants align with the principles of the circular economy by transforming waste into valuable resources such as biogas and energy, contributing to pollution reduction and the optimization of natural resource use. However, as new plants emerge, there is a gap in studies and established standards, especially for accurate greenhouse gas (GHG) emissions calculations, limiting the ability for environmental assessment and hindering the formulation of effective public policies. This study aimed to identify the main sources of GHG in an anaerobic digestion plant performing co-digestion of industrial and urban organic waste, located in São José dos Pinhais, PR. It also sought to quantify the emissions using the ECAM tool and compare them with manual calculations, identifying inherent challenges in these methods. To obtain the results, visits to the plant were conducted over two weeks, in addition to manual quantification and using the ECAM tool. The analysis of the co-digestion plant's scope and main emission sources revealed that the primary GHG sources are related to biogas losses during the process, indirect electricity consumption, and sludge transportation to the landfill. Outside the plant's project scope, digestate emissions at the landfill are also significant. After performing all calculations with the ECAM tool, a 15.6% difference was noted between the results obtained by the ECAM tool and manual calculations. The total emissions generated by the plant amounted to 3,542,329 kgCO₂eq with the ECAM tool, compared to 2,991,016 kgCO₂eq calculated manually. The greatest discrepancy was found in the calculation of indirect electricity emissions, followed by co-digestion, which showed a difference of 17.7%. The differences in sludge transportation were minimal, with a variation of only 0.2%, indicating that both methodologies are aligned in this specific category. These discrepancies are attributed to the lack of updates in the ECAM tool, especially regarding the most recent Global Warming Potential (GWP) values, and the non-use of nationalized data for calculating GHG emissions in the electricity sector. This discrepancy highlights the importance of updating tools, including ECAM, and the need for customization for accurate emissions quantification. Additionally, there is a significant lack of materials and studies on these calculations in Brazil, underscoring the urgency of future research. It is suggested that a future study quantifies emissions at the adjacent Sewage Treatment Plant of this study's plant, comparing the current reality with a scenario without the co-digestion plant, to demonstrate the importance and benefits of the co-digestion plant in reducing GHG emissions.

Keywords: Anaerobic co-digestion; Greenhouse Gas Emissions; ECAM Tool

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Emissões de GEE no ano de 2020 por setor no Brasil.....	22
Figura 2 – Tela Inicial ferramenta <i>ECAM</i>	26
Figura 3 – Interface <i>ECAM</i> : Opções de seleção de cenários.	26
Figura 4 – Mapa do município de São José dos Pinhais - PR.....	29
Figura 5 – Área da Planta de Biodigestão	30
Figura 6 – Fluxograma processo - Usina de Biodigestão	31
Figura 7 – Localização da Usina e da ETE.....	32
Figura 8 – Fluxograma Processo da ETE.....	32
Figura 9 – Distância CEASA e Usina de codigestão	34
Figura 10 – Chegada do Resíduo Orgânico na Usina	35
Figura 11 – Despejo do Resíduo Orgânico na Usina.....	35
Figura 12 – Resíduo Orgânico na Usina.....	36
Figura 13 – Coleta do resíduo orgânico para Análise.....	36
Figura 14 – Coleta e Resíduos Orgânicos.....	36
Figura 15 – Distância Industria resíduos da Pesca e Usina de Biodigestão .	38
Figura 16 – Descarga	39
Figura 17 – Descarga do resíduo através do tubo	39
Figura 18 – Resíduo Encaminhado para Análises.....	39
Figura 19 – Lodo Industrial	41
Figura 20 – Resíduo proveniente da massa de bolacha	41
Figura 21 – Tanques de Homogeneização (Vista Superior)	42
Figura 22 – Tanques de Homogeneização.....	42
Figura 23 – Biodigestores dos resíduos previamente acidificados	43
Figura 24 – Medidor Multitec 560	45
Figura 25 – Medidor <i>Vortex - Höntzsch</i> (UVA-Ex-d-VA40-E-10)	45
Figura 26 – Medidor <i>Vortex - Höntzsch</i> (UVA-Ex-d-VA40-E-10)	46
Figura 27 – Motores de Ciclo Otto	47
Figura 28 – Dados Iniciais utilizados no <i>ECAM</i>	49
Figura 29 – Escolha do Relatório com Potenciais de Aquecimento Global ..	50
Figura 30 – Inventário: Saneamento.....	50
Figura 31 – Dados de Entrada: Eletricidade Consumida	51
Figura 32 – Dados de Entrada: Produção de Biogás na Planta	52

Figura 33 – Dados de Entrada: Destinação final Digestato	53
Figura 34 – Dados de Saída ECAM.....	54
Figura 35 – Aba Seções Detalhadas	55
Figura 36 – Resultados Emissões Geradas – Codigestão Anaeróbia	65
Figura 37 – Resultados Emissões Geradas- Energia Consumida	66
Figura 38 – Total de Emissões Geradas na Gestão do Digestato	67
Figura 39 – Emissões transporte do digestato - <i>ECAM</i>	68
Figura 40 – Emissões transporte do digestato - Planilha.....	68
Figura 41 – Cálculos Totais Gestão de Digestato	69
Figura 42 – Emissões totais da disposição do digestato no aterro- <i>ECAM</i> ..	70
Figura 43 – Emissões totais da disposição do digestato no aterro- Planilha..	70
Figura 44 – Emissões Totais Geradas na Usina	72
Figura 45 – Emissões Totais Geradas (Escopo + Fora Escopo Usina)	73

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Exemplos de Plantas de Co-digestão e Cálculos de GEE	28
Quadro 2 – Fontes primárias de emissões de GEE na planta	48
Quadro 3- Cálculos Realizados pelo ECAM Emissão Elétrica	56
Quadro 4- Cálculos Realizados pelo ECAM Emissões: Codigestão.....	57
Quadro 5 - Cálculos Realizados pelo ECAM: Gerenciamento de Lodo.....	58
Quadro 6 – Dados Compilados Planta de Biogás.	62
Quadro 7 – BPM Substratos Planta de Codigestão.....	64
Quadro 8 – Emissões Totais Geradas Na Usina	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Quantidade de Lodo Recebido no ano de 2023	33
Tabela 2 –Resíduos orgânicos recebido no ano de 2023.....	37
Tabela 3–Resíduos de óleos da Industria Pesqueira recebidos em 2023....	40
Tabela 4 - Quantidade Resíduos Especiais recebidos no ano de 2023	41
Tabela 5– Digestato desaguado encaminhado destinado para o Aterro	44
Tabela 6– Volume de Biogás (Nm ³) e CH ₄ (%).....	46
Tabela 7 – Valores Emissões de GEE mensais da Planta de Codigestão ...	65
Tabela 8 – Cálculos para Emissões do Transporte e disposição do Aterro..	81
Tabela 9 – Consumo de Energia Elétrica	82
Tabela 10 – Cálculos Realizados para Emissões da Codigestão.....	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AR6	Assessment Report 6
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de Carbono
DBQ	Demanda Bioquímica de Oxigênio
ECAM	Energy Performance and Carbon Emissions Assessment and Monitoring
EPA	Environmental Protection Agency
ETE	Estação de Tratamento de Esgotos
GEE	Gases do Efeito Estufa
GWP	Global Warming Potential
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
N ₂ O	Óxido Nitroso
PLANSAB	Plano Nacional de Saneamento Básico
SIRENE	Sistema de Registro Nacional de Emissões
WaCCliM	Water and Wastewater Companies for Climate Mitigation

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
2	OBJETIVOS.....	20
2.1	OBJETIVOS GERAIS.....	20
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
3.1	MUDANÇAS CLIMÁTICAS	21
3.1.1	Geração dos gases de efeito Estufa (GEE) no setor do Saneamento. .	21
3.1.2	Dióxido de carbono.....	22
3.1.3	Metano	23
3.1.4	Óxido nitroso.....	24
3.1.5	Inventários e Cálculos de Emissões de Gases de Efeito Estufa.	24
3.1.6	Ferramenta <i>Energy Performance and Carbon Emissions Assessment and Monitoring (ECAM)</i>.....	25
3.2	BIOGÁS.....	27
3.3	EXEMPLOS DE CO-DIGESTAO EM ESCALA PLENA NO MUNDO.....	28
4	METODOLOGIA	28
4.1	DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	29
4.2	DESCRIÇÃO DO PROCESSO DA USINA DE BIODIGESTÃO.....	31
4.2.1	Lodo proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto	31
4.2.2	Resíduos Orgânicos	33
4.2.3	Resíduo proveniente da Industria do Peixe.....	37
4.2.4	Resíduo provenientes de Segmentos Variados da Industria.	40
4.2.5	Tanques de Mistura e Biodigestores.....	42
4.2.6	Biogás gerado na Planta e quantificação de Metano.....	44
4.2.7	Capacidade da Geração de Energia da Usina	47
4.3	IDENTIFICAÇÃO DAS FONTES PRIMÁRIAS DE GEE NA PLANTA DE CODIGESTÃO	48
4.4	ANALISE DOS GASES DO EFEITO ESTUFA REALIZADOS PELO SOFTWARE <i>ECAM</i>	48
4.4.1	Módulos de Entrada de Dados da ferramenta <i>ECAM</i>.....	48
4.4.2	Cálculos relacionados aos dados de Saídas do <i>Software ECAM</i>.....	48

Indicador não definido.

4.4.2.1	<i>Cálculos das Emissões relacionadas a Emissões Geradas do consumo indireto da Energia Elétrica</i>	55
4.4.2.2	<i>Cálculos das Emissões relacionados ao processo de Codigestão</i>	56
4.4.2.3	<i>Cálculos das Emissões relacionadas a Destinação do digestato e da disposição no aterro sanitário</i>	57
4.5	ANALISE DOS GASES DO EFEITO ESTUFA REALIZADOS DE FORMA MANUAL	59
4.5.1	Emissões relacionadas ao consumo de Energia Elétrica	60
4.5.2	Emissões relacionadas ao processo de Codigestão	60
4.5.3	Emissões relacionadas ao processo de Transporte do Digestato para o aterro e Disposição	62
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
5.1	DADOS LEVANTADOS NA PLANTA DE CODIGESTÃO ANAERÓBIA.....	62
5.2	CÁLCULOS RELACIONADOS A CODIGESTÃO	63
5.2.1	Emissões Geradas - Codigestão	65
5.3	EMISSÕES GERADAS DO CONSUMO DE ENERGIA DE REDE	66
5.4	EMISSÕES RELACIONADAS A GESTÃO DO DIGESTATO	67
5.4.1	Emissões Relacionadas ao Transporte do Digestato	68
5.4.2	Emissões Geradas – Disposição no Aterro	69
5.5	EMISSÕES TOTAIS GERADAS - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS ..	71
6	CONCLUSÃO	73
7	RECOMENDACOES	75
	REFERÊNCIAS	77
	APÊNDICE A	81
	APÊNDICE B	82
	APÊNDICE C	83

1 INTRODUÇÃO

A economia global contemporânea está fundamentada em um modelo linear de mercado que, embora tenha impulsionado o crescimento econômico, enfrenta desafios inegáveis (Rodrigo de Souza, 2023). A crescente demanda por recursos naturais, aliada à sua finitude, evidencia contradições latentes nesse paradigma econômico (Pereira et al., 2022). Tal cenário implica não apenas em pressões ambientais crescentes, mas também em desequilíbrios socioeconômicos e conflitos geopolíticos.

Diante das crises ambientais e climáticas em curso, torna-se premente repensar a sustentabilidade do sistema econômico vigente no contexto do saneamento (Silva al., 2023). O aumento populacional, a demanda voraz por serviços sanitários e a produção exacerbada de resíduos emergem como preocupações centrais, exacerbadas pelo modelo linear predominante (Pearce e Turner, 1990).

Nesse contexto, surge a urgência de repensar o sistema econômico vigente, buscando alternativas mais sustentáveis e alinhadas com os princípios da economia circular. A abordagem circular, influenciada por diversas fontes, incluindo a visão de Boulding (1966) sobre a Terra como um sistema fechado e circular, propõe um modelo no qual a economia e o ambiente coexistem em equilíbrio.

Tratando-se do contexto do setor do saneamento, os processos convencionais de tratamento de esgoto em Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs) são essenciais para tratar os efluentes domésticos, mas geram subprodutos residuais significativos, como lodo sólido e biogás. No Brasil, o lodo é frequentemente destinado a aterros sanitários, o que não só contribui para a acumulação de resíduos, mas também intensifica as emissões de gases de efeito estufa (Bringhenti et al., 2018). Paralelamente, o biogás gerado durante o tratamento ou na disposição do lodo é muitas vezes queimado ou liberado diretamente na atmosfera, resultando em perda de energia e maior poluição atmosférica (CETESB, 2006).

Contudo, esses resíduos representam recursos potenciais com importantes aplicações econômicas. O lodo, rico em nutrientes, pode ser empregado em práticas agrícolas para melhorar a fertilidade do solo e reduzir a dependência de fertilizantes químicos ((Silva, 1995).Ao mesmo tempo, o biogás pode ser convertido em diversas formas de energia, incluindo eletricidade, calor ou biometano, oferecendo uma fonte de energia alternativa e renovável (CETESB, 2006).

No entanto, enquanto a gestão de resíduos e a conversão de biogás apresentam um potencial significativo para impulsionar a sustentabilidade ambiental e econômica, enfrenta-se uma lacuna crítica na disponibilidade de metodologias precisas para quantificar as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) oriundas desses processos, particularmente nas plantas de codigestão anaeróbia. Essa carência metodológica não apenas limita a capacidade de ser possível avaliar e otimizar o desempenho ambiental dessas instalações, mas também dificulta a formulação de políticas eficazes e o cumprimento de compromissos internacionais de redução de emissões.

Em 2019, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) atualizou suas diretrizes de 2006 para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa, especificando que o setor de saneamento, anteriormente excluído das emissões totais nacionais, deveria ser considerado devido ao seu potencial como fonte significativa de metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) (GU et al., 2023), no entanto sua base generalista (Rosenfeldt et al., 2023) e seus dados insuficientes, dificultam a quantificação dos fatores de emissão que abordem a variação no tipo de esgoto e condições operacionais (GU et al., 2023).

As emissões de GEE são uma preocupação crescente no setor de saneamento, especialmente em atividades como o tratamento de esgoto e a gestão de resíduos sólidos. Por exemplo, as Estações de Tratamento de Esgoto podem gerar metano e óxido nitroso, dois gases de efeito estufa potentes, durante o processo de digestão anaeróbia. A disposição de resíduos em aterros sanitários também é uma fonte significativa de metano, devido à decomposição anaeróbia dos materiais orgânicos. Para as plantas de codigestão anaeróbia fruto desse estudo e que combinam resíduos sólidos urbanos com lodo de esgoto para otimizar a produção de biogás, têm o potencial de reduzir significativamente as emissões de GEE quando gerenciadas de forma adequada.

Contudo, a falta de metodologias precisas para quantificar essas emissões representa um desafio crítico. Sem uma compreensão clara dos fatores de emissão específicos para diferentes tipos de resíduos e condições operacionais, é difícil otimizar os processos de tratamento para minimizar a liberação de metano e óxido nitroso, dois potentes GEE. A implementação de diretrizes mais detalhadas e a coleta de dados mais robustos são essenciais para avançar na redução das emissões e alcançar os objetivos climáticos estabelecidos internacionalmente.

No contexto das plantas de codigestão anaeróbia, a importância dos GEE se torna ainda mais evidente. A digestão anaeróbia é um processo que naturalmente gera metano como subproduto, o que pode ser vantajoso se o metano for capturado e utilizado como biogás. No entanto, se liberado diretamente na atmosfera, o metano contribui significativamente para o aquecimento global devido ao seu alto potencial de aquecimento global, do inglês, Global Warming Potential (GWP).

A obtenção de ferramentas específicas para o monitoramento e a implementação de tecnologias inovadoras para a redução de emissões são essenciais para transformar o setor de saneamento. Esses avanços não apenas facilitam a avaliação precisa das emissões de GEE em plantas de codigestão, mas também permitem a otimização dos processos e a comparação de cenários, contribuindo significativamente para a seleção de projetos de mitigação das mudanças climáticas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

Analisar as emissões de gases de efeito estufa em uma planta que produz biogás a partir da codigestão anaeróbia de lodo de ETE com resíduos orgânicos urbanos e industriais.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar as fontes primárias de emissões de GEE na planta de codigestão anaeróbia;
- Quantificar as emissões de GEE associadas ao processo de digestão anaeróbia, incluindo a produção de biogás através do software *ECAM (Energy Performance and Carbon Emissions Assessment and Monitoring)* e em planilha realizada de forma manual
- Avaliar a ferramenta *ECAM* (através de cálculos realizados em planilha de forma manual) na estimativa de emissões em projetos de codigestão anaeróbia específicos, identificando desafios e ajustes necessários.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 GASES DO EFEITO ESTUFA

O sexto relatório de análise do Painel Intergovernamental sobre Mudanças do Clima (IPCC) ressalta que os aumentos nas concentrações de gases de efeito estufa (GEEs) desde aproximadamente 1750 são “diretamente atribuídos às atividades humanas” (IPCC, 2023). O relatório enfatiza de forma inequívoca que a influência humana tem contribuído para o aquecimento da atmosfera, dos oceanos e da terra, além de alertar sobre os danos substanciais e perdas irreversíveis causados pelas alterações climáticas (IPCC, 2023).

Atualmente, os relatórios do IPCC desempenham um papel crucial no entendimento das mudanças climáticas. O AR6, lançado em agosto de 2021, destaca a influência humana no aquecimento global e a urgência de ação, apresentando dados alarmantes sobre o futuro climático (IPCC AR6, 2021).

O relatório IPCC AR6 (2021) apresenta cinco cenários de emissões de gases de efeito estufa e suas consequências para o aumento da temperatura média global entre 2015 e 2100. Esses cenários variam de otimistas a pessimistas, indicando que o aquecimento atingirá ou excederá 1,5 °C nos próximos 20 anos, apesar das variações na redução das emissões de GEEs (IPCC AR6, 2021).

As consequências do aumento da temperatura média global incluem a elevação do nível do mar, estimando-se um aumento de 2 a 3 metros nos próximos 2 mil anos se o aquecimento global for limitado a 1,5 °C. Além disso, são previstos impactos como a acidificação e redução de oxigênio nos oceanos, com sérias consequências para a biodiversidade marinha global (IPCC AR6, 2021).

3.1.1 Geração dos gases de efeito Estufa (GEE) no setor do Saneamento.

No Brasil, o acesso ao saneamento básico é assegurado por lei, conforme estipulado na Lei Nº 11.445-2007, atendendo a 4 diretrizes: abastecimento de água, o esgotamento sanitário, o manejo das águas pluviais e o manejo dos resíduos sólidos urbanos (Lei Nº 11.445, 2007). Em 2013, a universalização do saneamento básico foi estabelecida como uma meta nacional através do Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB). Este plano delineia objetivos, diretrizes e medidas para o saneamento básico no país ao longo das próximas duas décadas.

Dessa forma, o aumento nas emissões em função da melhoria do saneamento é intrínseco ao desenvolvimento de um país (Hutton; Haller; Bartram, 2007). Nesse

contexto, é crucial considerar as implicações ambientais do saneamento. O setor de resíduos, que abrange a disposição de resíduos sólidos e o tratamento de esgoto sanitário, contribuiu com 4,2% das emissões totais do país (SIRENE,2020). A menor parcela dessas emissões é atribuída ao saneamento. No entanto, devido à falta de quantificação específica, não se tem o valor exato da parcela que o saneamento seria responsável. O metano (CH₄) é o principal gás emitido, com um total de 66,63 milhões de toneladas, seguido pelo óxido nitroso (N₂O) com 2,23 milhões de toneladas de CO₂ equivalente, e o dióxido de carbono (CO₂) totalizando 0,23 milhões de toneladas de CO₂ equivalente (SIRENE,2020).

Figura 1 – Emissões de GEE no ano de 2020 por setor no Brasil

Tabela 1.1. Resultados de emissões de gases de efeito estufa em 2020, por setor.

TOTAL DE EMISSÕES LÍQUIDAS EM 2020 – 1.675,76 MILHÕES DE TONELADAS DE CO ₂ eq								
Setores	Emissões totais	Contrib. setorial (%)	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	PFCs	HFCs	SF ₆
Energia	389,48	23,2%	366,91	12,57	10,01	-	-	-
IPPU	101,94	6,1%	92,45	0,80	0,36	0,24	7,76	0,33
Agropecuária	477,67	28,5%	26,00	298,6	153,06	-	-	-
LULUCF	637,04	38,0%	596,29	27,87	12,89	-	-	-
Resíduos	69,63	4,2%	0,23	66,63	2,76	-	-	-

Unidade das emissões: milhões de toneladas de CO₂eq.

Fonte: SIRENE (2020)

Além disso, de acordo com Sistema de Registro Nacional de Emissões – SIRENE, 2022, houve um aumento de 10% no setor de resíduos. No tratamento de esgoto, a geração desses gases de efeito estufa estão relacionados a diferentes áreas, desde o processo de coleta, tratamento e no despejo de esgotos (Rosenfeldt et al., 2023).

3.1.2 Dióxido de carbono

Embora seja um gás natural, o dióxido de carbono (CO₂) é um dos principais contribuintes para o aumento do efeito estufa. Isso se deve à sua ampla utilização em atividades antropogênicas, especialmente na queima de combustíveis fósseis.

Conforme o IPCC (2001), em estações de tratamento de esgoto sanitário, o CO₂ é produzido diretamente por bactérias durante o processo de respiração aeróbia, que converte matéria orgânica. No entanto, esse CO₂ segue um ciclo biogeoquímico de curto prazo ou fechado, o que significa que o dióxido de carbono emitido é recuperado pelos organismos, retornando ao seu estado inicial.

Ocorre indiretamente durante o consumo de energia elétrica, o transporte de subprodutos como lodo e a combustão de motores dentro de estações de tratamento de esgotos (ETEs)

O CO₂ é o principal gás de efeito estufa responsável pelo aquecimento global devido às atividades humanas. Ele é usado como a referência base para calcular o Potencial de Aquecimento Global (GWP) de outros gases de efeito estufa. Por definição, o GWP do CO₂ é 1 em qualquer horizonte de tempo, seja 20, 100 ou 500 anos (IPCC AR6, 1990).

3.1.3 Metano

Algumas atividades humanas, principalmente aquelas relacionadas à agricultura, à decomposição de resíduos e ao uso de combustíveis fósseis, têm contribuído para o aumento das emissões de metano (CH₄) na atmosfera, intensificando o efeito (Silva, 2010). No setor do saneamento, o metano é gerado a partir da decomposição da matéria orgânica em condições anaeróbicas e pode ser responsável por emissões significativas na atmosfera se não for capturado e queimado (Rosenfeldt et al., 2023)

De acordo com Chernicharo (2008), diversos fatores influenciam a produção de CH₄ em uma ETE, incluindo o grau de tratamento do esgoto, a presença de agentes tóxicos, o pH, a temperatura, o tempo de retenção e a competição entre bactérias metanogênicas e redutoras de sulfato.

O CH₄ é um dos gases mais significativos no contexto do aquecimento global. Quando considerado em um horizonte de 100 anos (GWP n100), o metano possui um Potencial de Aquecimento Global (GWP) de aproximadamente 27,9. Isso significa que, ao longo de 100 anos, uma tonelada de metano tem um impacto sobre o aquecimento global equivalente a 27,9 toneladas de dióxido de carbono (CO₂) (IPCC AR6, 2021), ainda, o metano possui alto impacto a curto prazo.

Em um horizonte de 20 anos (GWP n20), o metano tem um GWP significativamente mais alto, entre 84 e 87, refletindo sua alta capacidade de retenção de calor em períodos mais curtos (IPCC AR6,2021).

Ainda, segundo a *Environmental Protection Agency* (EPA,2019), devido aos fatores citados, a redução das emissões de metano tornou-se uma prioridade nas políticas climáticas, estratégias para mitigar as emissões de metano incluem

melhorias na gestão de resíduos, práticas agrícolas sustentáveis, e a captura e uso de metano em operações de petróleo e gás.

3.1.4 Óxido nitroso

O óxido nitroso está ligado à decomposição dos compostos nitrogenados encontrados no esgoto/efluente e aos processos de tratamento, com ênfase nos sistemas terciários (Loureiro; Dubeux; Zveibil, 2016). Nas ETEs, a emissão ocorre predominantemente durante a aeração (MELLO et al., 2013 apud Rosenfeldt et al., 2023).

O GWP do N_2O é 273, isso significa que, ao longo de 100 anos, uma tonelada de N_2O tem um impacto sobre o aquecimento global equivalente a 273 toneladas de CO_2 (IPCC AR6,2021).

O N_2O é um gás de efeito estufa potente e também um gás de longa vida, o que significa que ele permanece na atmosfera por muito tempo, contribuindo para o aquecimento global tanto no curto quanto no longo prazo. Suas principais fontes incluem a agricultura, principalmente através do uso de fertilizantes nitrogenados, e processos industriais (EPA,2019).

3.1.5 Inventários e Cálculos de Emissões de Gases de Efeito Estufa.

Atualmente, não existe um marco legal específico no contexto nacional ou estadual que exija a redução de emissões no setor de saneamento. No entanto, há uma crescente pressão da sociedade para promover o desenvolvimento sustentável e a transição para uma economia de baixo carbono. Na última Convenção do Clima da ONU em 2015, ministros de 195 países estabeleceram metas para reduzir gases de efeito estufa devido à pressão pública. O Brasil comprometeu-se a diminuir suas emissões em 37% abaixo dos níveis de 2005 até 2025 e em 43% até 2030 (Filippini et al.,2018)

A elaboração de inventários de gases de efeito estufa é uma ferramenta crucial no combate às mudanças climáticas, pois permite a identificação das principais fontes de emissão, além de facilitar a identificação das medidas mais eficazes a serem implementadas. Esses inventários, que podem ser elaborados em níveis local, regional ou nacional, são essenciais para quantificar as emissões e auxiliar na priorização de ações mitigadoras.

A contabilização das emissões em nível nacional é segmentada em diversos setores, conforme estabelecido pelo IPCC: energia; processos industriais e uso de produtos; agricultura, silvicultura e uso da terra; resíduos; e outros não previamente especificados.

O IPCC estabelece critérios para o cálculo das emissões de gases de efeito estufa no tratamento de esgotos em seu Guia para Inventários Nacionais. A metodologia mais recente, intitulada "2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories", baseia-se na utilização de fatores de emissão *standard* que levam em consideração as características das ETE, como a tecnologia adotada, as cargas efluentes e as capacidades de remoção de matéria orgânica e nitrogênio (ROSENFELDT et al., 2023).

No entanto, os fatores de emissão *standard* sugeridos não levam em consideração as condições específicas de cada ETE nem a variedade de tecnologias de tratamento utilizadas (ROSENFELDT et al., 2023). Apesar das diversas melhorias apresentadas na revisão de 2019, o relatório do IPCC destaca que o nível de incerteza em relação às emissões de N₂O permanece alto, tanto nos fatores de emissão quanto nos dados de atividade (IPCC, 2019).

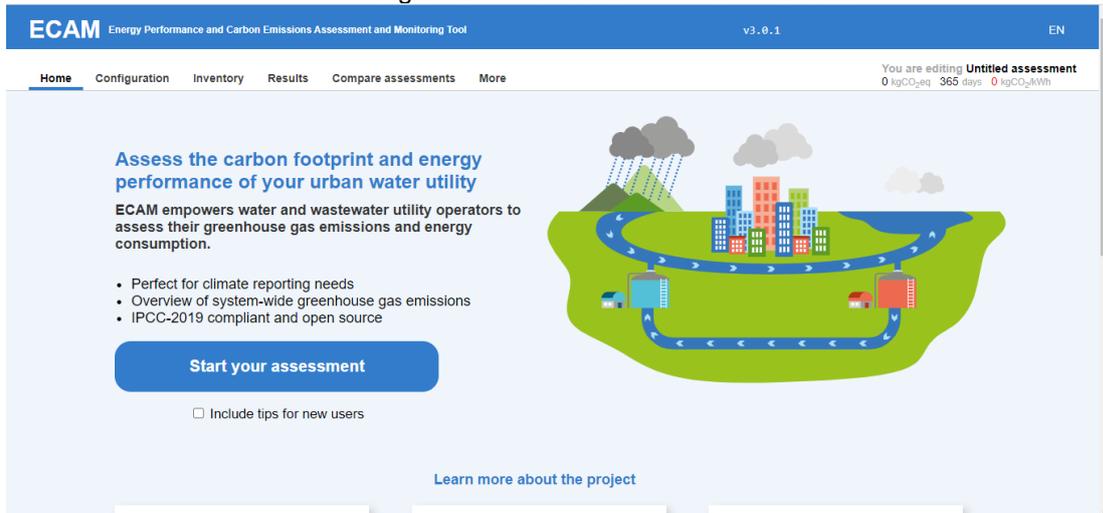
3.1.6 Ferramenta *Energy Performance and Carbon Emissions Assessment and Monitoring* (ECAM).

A ferramenta *Energy Performance and Carbon Emissions Assessment and Monitoring* (ECAM) é uma aplicação web gratuita e de código aberto, desenvolvida pelo projeto Water and Wastewater Companies for Climate Mitigation (WaCCliM). Essa ferramenta permite que operadores de serviços públicos de água e saneamento avaliem suas emissões de gases de efeito estufa e o consumo de energia (SILVA et al., 2022).

Inicialmente, a ferramenta foi desenvolvida como uma planilha eletrônica em 2015 para o projeto WaCCliM pelo consórcio *Urban Water Commons* (LNEC e ITA, *Universitat Politècnica de València*), em colaboração com a *Cobalt Water Global*. Essa versão inicial do ECAM estabeleceu as bases e as equações fundamentais para a sua versão web (SILVA et al., 2022).

Para garantir sua aplicabilidade a todas as empresas, mesmo aquelas com dados limitados, a ferramenta propõe valores padrão baseados na literatura, que podem ser ajustados pelo usuário para refletir as condições locais com mais precisão.

Figura 2 – Tela Inicial ferramenta ECAM



Fonte: Adaptado, WaCClim (2024)

O ECAM baseia-se nas Diretrizes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa, incluindo o refinamento de 2019. As equações utilizadas para calcular as emissões de gases de efeito estufa em diferentes estágios do ciclo urbano da água são principalmente derivadas dessas diretrizes.

Quando dados reais da empresa de água e saneamento não estão disponíveis, são utilizados valores padrão para calcular as emissões de gases de efeito estufa. No entanto, durante o processo de avaliação, caso dados reais estejam disponíveis, o usuário pode ajustar esses valores padrão para aumentar a precisão da avaliação (SILVA et al., 2022).

Figura 3 – Interface ECAM: Opções de seleção de cenários.

Factor de emisión de la red eléctrica	Fator de Emissão da rede elétrica	más información	0,043	kgCO ₂ /kWh
Consumo de proteína anual per cápita		más información		kg/persona/año
DBO ₅ generado (aguas residuales)		más información		g/persona/día
Proteína co-descargada industrial y comercialmente en el alcantarillado		más información		kgN/kgN
Proteína no consumida agregada a las aguas residuales		más información		kgN/kgN
Nitrógeno adicionado de productos domésticos agregado a las aguas residuales		más información		kgN/kgN

Fonte: Autora (2024)

3.2 BIOGÁS

O biogás, resultante da degradação biológica de substratos orgânicos em condições anaeróbias, é composto principalmente por metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂). Em proporções menores, também contém gases como o gás sulfídrico (H₂S), umidade (H₂O) e outros, como o nitrogênio (N₂) (PROBIOGÁS, 2015). Para fins energéticos, como geração de energia elétrica e térmica, o componente crucial é o metano (CH₄), que geralmente representa entre 50% e 72% do total, variando de acordo com os substratos e as condições de degradação (PROBIOGÁS, 2015).

Dentre os fatores que mais influenciam a produção do biogás, Tavares (2008) apud Cañote (2018) destaca:

- Natureza dos substratos: são essenciais como fonte de alimento para os microrganismos que decompõem a matéria orgânica e produzem biogás. Minerais como cálcio, magnésio, potássio, sódio, ferro, zinco, cobalto, molibdênio, cobre e manganês são cruciais em pequenas quantidades para reações enzimáticas. Elementos como carbono, nitrogênio, oxigênio, fósforo e enxofre são vitais para a eficiência da fermentação.
- Composição dos resíduos: quanto maior a concentração de carga orgânica no resíduo, maior será a geração de biogás. Os principais nutrientes dos microrganismos são carbono, nitrogênio e sais orgânicos. O nitrogênio é encontrado principalmente nos dejetos humanos e animais, enquanto os polímeros presentes nos restos de culturas representam a principal fonte de carbono.
- Umidade: o ideal é que o teor de água esteja entre 60% e 90% do volume total.
- Temperatura: a temperatura tem grande influência no processo de formação do metano. Isso porque a 10° C a atividade das bactérias é muito baixa e acima de 65° C as enzimas são destruídas pelo calor. A faixa ideal para produção de biogás está entre 32° C e 60° C.

As características físico-químicas do biogás se relacionam diretamente com as propriedades do metano e gás carbônico, visto que estes apresentam uma maior concentração no biogás. A presença de substâncias não combustíveis na composição do biogás como, por exemplo, a água e o dióxido de carbono, resulta na diminuição do seu poder calorífico, pois essas substâncias absorvem parte da energia gerada (FIGUEIREDO, 2007).

3.3 EXEMPLOS DE CO-DIGESTÃO EM ESCALA PLENA NO MUNDO

A codigestão anaeróbia é uma tecnologia amplamente utilizada em várias regiões do mundo para tratar resíduos orgânicos e produzir biogás. Na Alemanha, diversas plantas de codigestão operam em escala plena, processando uma variedade de resíduos, incluindo resíduos de alimentos, lodo de esgoto, resíduos agrícolas e industriais.

A seguir, apresenta-se no Quadro algumas dessas plantas, os tipos de resíduos tratados e as metodologias utilizadas para calcular os GEE.

Quadro 1- Exemplos de Plantas de Co-digestão e Cálculos de GEE

Planta	Local	Substratos	Cálculos de GEE
Planta de Lünen	Lünen, Alemanha	Resíduos de alimentos e lodo de esgoto	Utilizaram uma metodologia de análise de ciclo de vida (LCA) para avaliar as emissões de GEE desde a coleta dos resíduos até a produção de biogás e uso final. As emissões evitadas pela substituição de combustíveis fósseis e a redução de metano dos resíduos não tratados foram contabilizadas.
Planta de Leipzig	Leipzig, Alemanha	Resíduos agrícolas e esterco animal	Aplicaram um modelo de balanço de massa e energia para estimar as emissões de GEE, considerando as emissões de metano durante a digestão, bem como as emissões evitadas pela utilização do biogás em substituição ao gás natural.
Planta de Stuttgart	Stuttgart, Alemanha	Resíduos de alimentos e lodo de esgoto	Utilizaram o software GaBi para realizar uma análise de ciclo de vida, considerando as emissões de GEE durante todo o ciclo de vida do biogás, desde a coleta e transporte dos resíduos até a conversão do biogás em energia e a gestão de digestatos.
Planta de Hamburg	Hamburg, Alemanha	Resíduos orgânicos e resíduos industriais	Realizaram um inventário de emissões baseado na metodologia IPCC para estimar as emissões de metano e óxido nitroso durante a digestão anaeróbia, bem como as emissões evitadas pela substituição de energia fóssil com biogás.

Fonte : Autora (2024)

4 METODOLOGIA

Este estudo abordou a análise dos gases de efeito estufa (CH_4), (CO_2), (NH_2) gerados em uma usina de biodigestão anaeróbia com geração de energia, localizada na cidade de São José dos Pinhais, no estado do Paraná.

Durante a execução deste trabalho, foram realizadas visitas em campo ao longo de duas semanas, iniciando em 15 de abril de 2024 e encerrando em 26 de abril de 2024. Na primeira semana, as visitas tiveram como objetivo proporcionar uma compreensão mais aprofundada da planta em questão. Na semana subsequente, o foco foi coletar os dados necessários para a análise.

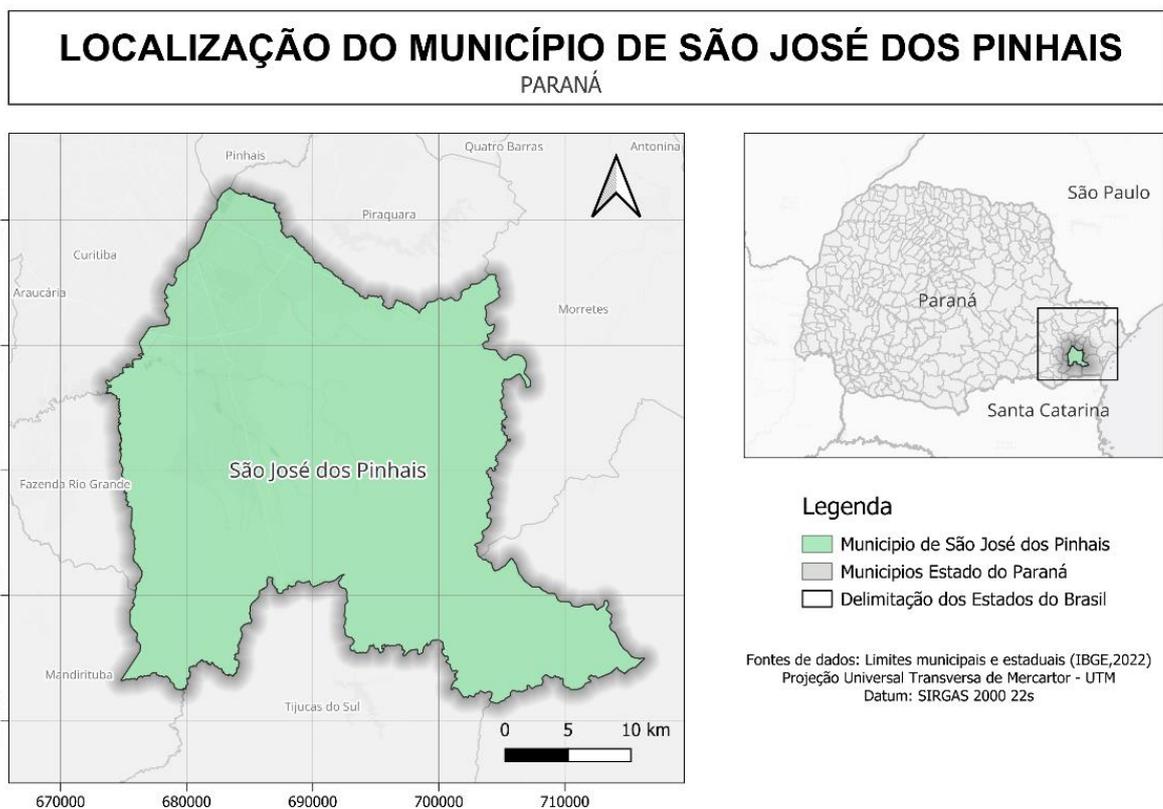
Por fim, foram realizados os cálculos de GEE através da ferramenta *ECAM* e em uma planilha manual afim de comparar os resultados.

4.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A usina de biodigestão fica localizada no município de São José dos Pinhais, na avenida das Américas, há 15 km do sudeste da capital Curitiba.

O município tem como limites os municípios de: Pinhais e Piraquara ao Norte; Tijucas do Sul ao Sul; Morretes e Guaratuba a Leste; Curitiba, Fazenda Rio Grande e Mandirituba a Oeste, como pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 – Mapa do município de São José dos Pinhais - PR



Fonte: Autora (2024)

Desde 2019, a usina opera 24 horas por dia, recebendo resíduos orgânicos de 4 a 5 vezes ao dia, em média. Além disso, utiliza o lodo da ETE adjacente como matéria-prima para a biodigestão. A ETE atende uma população de 1.300.000 habitantes, tratando uma vazão média de 2.520 L/s, com eficiência de remoção de DBO_5 superior a 90%. Figura 5 é apresentada a área da Planta em imagem de satélite.

Figura 5 – Área da Planta de Biodigestão



Fonte: Google Earth (2024).

Os resíduos orgânicos de frutas, legumes, verduras e hortaliças mencionados são provenientes da Central de Abastecimento, do município de Curitiba. Também são recebidos resíduos orgânicos de comércios e indústrias locais, e também do Estado de Santa Catarina, na forma de resíduos orgânicos sólidos ou líquidos.

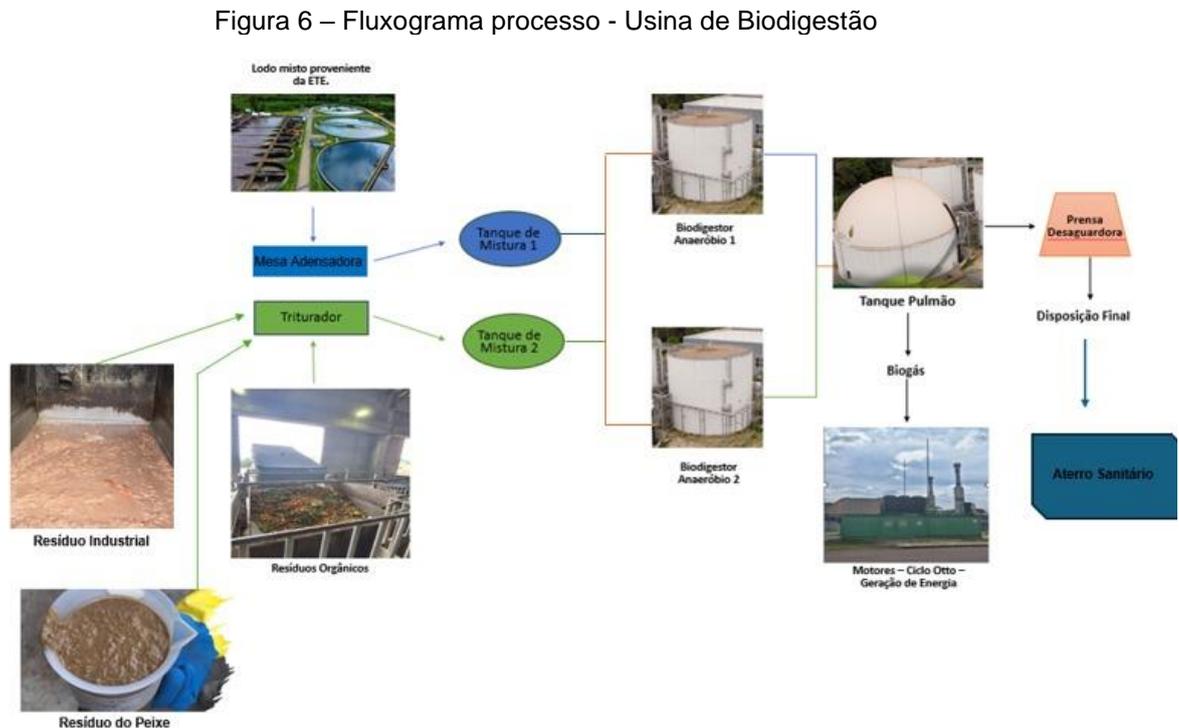
O recebimento do lodo proveniente da ETE tem início após a homogeneização no tanque de equalização. Em seguida, uma parcela desse lodo é direcionada para a usina por meio de bombas helicoidais, onde passa pelo processo de adensamento em mesas adensadoras. Após o adensamento, o lodo é transferido para o primeiro tanque de homogeneização ou tanque de mistura, onde ocorre a primeira fase da digestão anaeróbia.

Os resíduos orgânicos são trazidos à usina por caminhões e descarregados para o processamento. Primeiro, eles passam por um moinho de martelos, onde são triturados. Depois de triturados, os resíduos são transferidos para um segundo tanque de homogeneização, onde ocorre o processo de acidificação.

O efluente acidificado dos tanques de homogeneização é bombeado para os tanques biodigestores, onde ocorre a digestão anaeróbia, aquecida pelo calor gerado durante a conversão de biogás em energia elétrica. E posteriormente segue para o tanque de pós-digestão, onde também é armazenado o biogás. O biogás é convertido em energia por motogeradores de ciclo Otto, enquanto os sólidos são desidratados

em uma prensa desaguadora em seguida são encaminhados para o aterro sanitário localizado no município de Palmeira, também localizado no estado do Paraná.

É possível visualizar através da Figura 6 o fluxograma do processo da usina de biodigestão, é possível analisar através deste também fotos do processo.



Fonte: Autora (2024).

4.2 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DA USINA DE BIODIGESTÃO

4.2.1 Lodo proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto

Como mencionado anteriormente, a usina recebe o lodo proveniente da ETE que está localizada ao lado da Planta de Biogás. Essa Estação opera desde 1980 e recentemente passou por modificações para a implementação dos sistemas de lodos ativados convencionais, anteriormente a mesma operava com o sistema de lodos ativados com aeração prolongada.

Atualmente na ETE, o fluxo de tratamento da fase líquida se inicia com o tratamento preliminar, compreendendo gradeamento e desarenação. O efluente do tratamento preliminar segue para os decantadores primários, e posteriormente é encaminhado ao tratamento secundário tipo lodos ativados, composto por tanques de aeração, tipo valos de oxidação, e decantadores secundários (OJEA et al.,2023).

Na Figura 7 abaixo é possível visualizar a localização da ETE e sua proximidade com a planta.

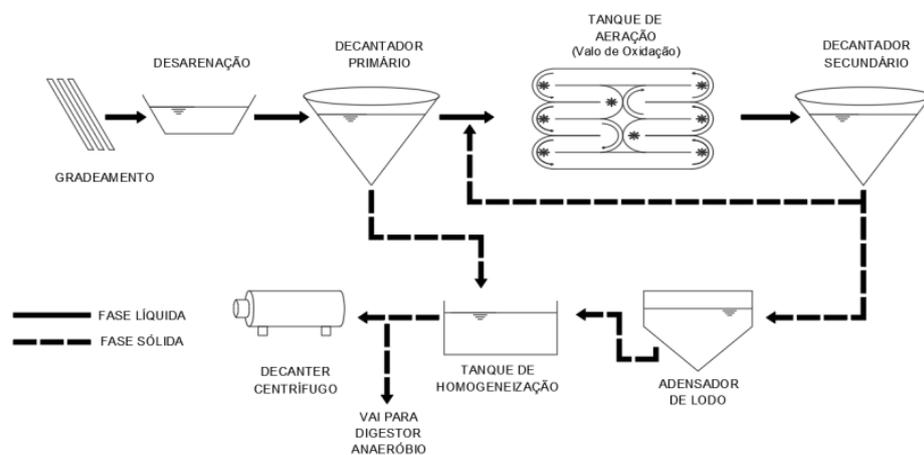
Figura 7 – Localização da Usina e da ETE.



Fonte: Google Earth (2024).

Na Estação, o lodo oriundo dos decantadores primários e o lodo proveniente dos decantadores secundários (que primeiro passam pelo adensamento e posteriormente são encaminhados), são misturados no tanque de equalização, onde sofrem a homogeneização. Após essa etapa, uma parcela do lodo segue para a usina de biodigestão, enquanto o lodo excedente é encaminhado para o desaguamento em centrífugas. É possível visualizar o fluxograma do processo da ETE abaixo na Figura 8.

Figura 8 – Fluxograma Processo da ETE



Fonte: OJEA et al., (2023).

Conforme mencionado anteriormente, o lodo proveniente da ETE, após passar pelo processo descrito, é bombeado até a planta utilizando bombas helicoidais. Ao chegar, o lodo é direcionado para as mesas adensadoras, que realizam seu adensamento. Na entrada da planta, a vazão do lodo é medida por medidores de vazão. De acordo com a SANEPAR (2024), esses dados são registrados diariamente, sempre que o lodo chega à planta.

Em 2023, a planta recebeu um total de 293.412 kg de lodo (Tabela 1), considerando uma densidade de 1000 kg/m³ (SANEPAR, 2023). Ao chegar à planta, o lodo apresentava um teor de médio de sólidos de 3%, que aumentou para 7% após o processo de adensamento (SANEPAR, 2023) durante o acompanhamento nesse ano de 2023.

Tabela 1 – Quantidade de Lodo Recebido no ano de 2023

Meses (2023)	Lodo (m³)
Janeiro	25.275
Fevereiro	24.386
Março	25.628
Abril	25.932
Maio	27.110
Junho	2.688
Julho	24.175
Agosto	23.895
Setembro	22.474
Outubro	23.942
Novembro	19.198
Dezembro	26.709
Total (m³)	293.412

Fonte: Adaptado de SANEPAR (2023)

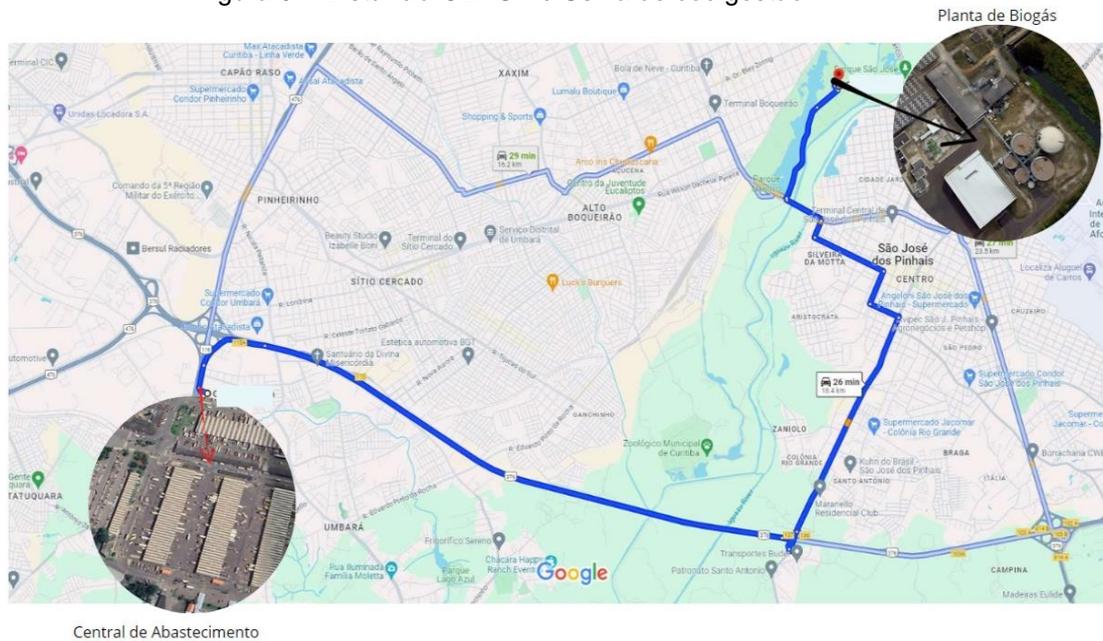
4.2.2 Resíduos Orgânicos

Os Resíduos Orgânicos são encaminhados diariamente para a usina, com uma média de 4 a 5 caminhões provenientes da Central de Abastecimento, localizada a 20 km de distância (Figura 9). É de suma importância salientar, que caso esses resíduos não fossem direcionados para a planta, esses seriam encaminhados para o aterro sanitário como destino.

Além disso, todos os resíduos passam por uma seleção inicial com base em suas características físico-químicas, conforme detalhado no relatório de caracterização, seguindo as diretrizes do padrão ABNT NBR 10.004 (OJEA et

al.,2023). Adicionalmente, a qualidade desses resíduos é analisada para determinar se são adequados para utilização no processo em questão.

Figura 9 – Distância CEASA e Usina de codigestão



Fonte: Google Maps adaptada pela autora (2024).

Os resíduos orgânicos chegam à usina em caminhões (Figura 10 e Figura 11). Na chegada e na saída são pesados em balança do tipo rodoviária, para posterior verificação do peso dos resíduos depositados na usina.

Figura 10 – Chegada do Resíduo Orgânico na Usina



Figura 11 – Despejo do Resíduo Orgânico na Usina



Fonte: Autora (2024).

Ainda, todos os dias amostras dos resíduos são recolhidos para serem realizadas análises dos sólidos e da fração volátil no laboratório dentro da usina, seguindo metodologia *Standard Methods, 2450 Solids – 2450 G* (APHA,2012). Abaixo é possível visualizar o resíduo orgânico recebido.

Figura 12 – Resíduo Orgânico na Usina



Figura 13 – Coleta do resíduo orgânico para Análise



Fonte: Autora (2024).

Figura 14 – Coleta e Resíduos Orgânicos



Fonte: Autora (2024).

A quantidade de resíduos orgânicos recebidos na planta varia ao longo dos meses do ano, sendo o pico nos meses de verão (janeiro até março) como pode ser visualizado na Tabela 2, e o teor médio de sólidos presentes nas amostras desses orgânicos de 12,47%.

Tabela 2 – Quantidade de resíduo orgânico recebido no ano de 2023

Meses (2023)	Massa de resíduos orgânicos (kg)	Teor médio de sólidos
Janeiro	971.180	9,00%
Fevereiro	900.350	9,00%
Março	912.530	9,00%
Abril	729.830	9,00%
Mai	654.610	9,00%
Junho	559.710	9,00%
Julho	527.841	13,55%
Agosto	469.800	9,00%
Setembro	615.270	9,00%
Outubro	611.600	9,00%
Novembro	995.900	46,13%
Dezembro	1.152.060	9,00%
Total (kg)	9.100.681	-

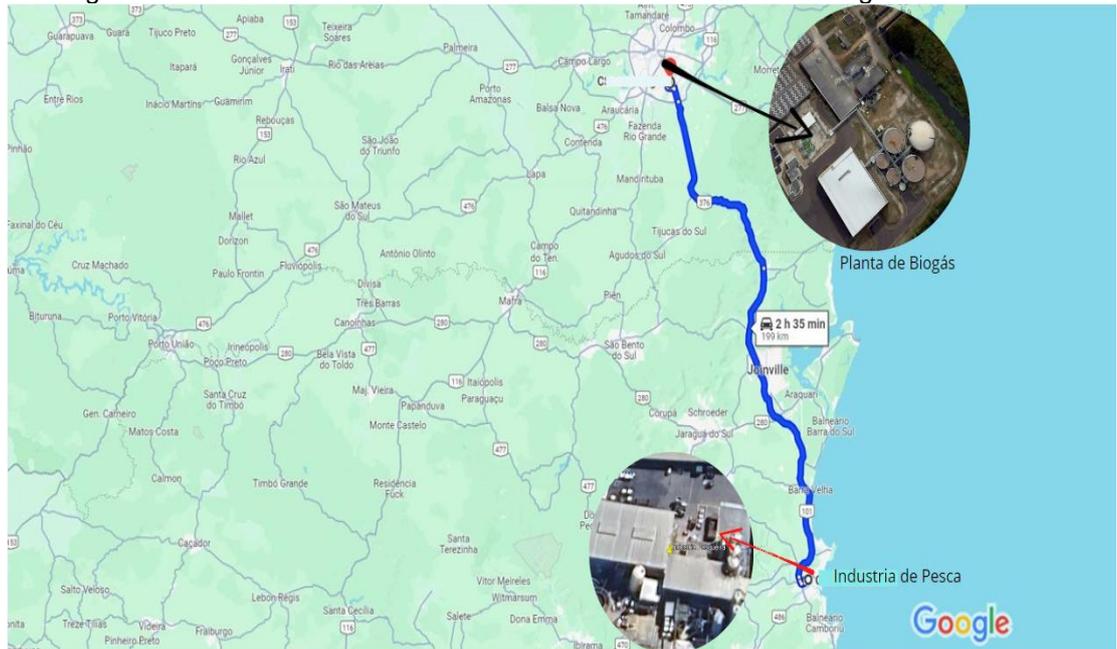
Fonte: Adaptado de SANEPAR (2023)

4.2.3 Resíduo proveniente da Indústria do Peixe.

Em 2023 e continuando até o presente, a planta tem recebido, em média, de 2 a 3 caminhões por semana com resíduos da indústria pesqueira, incluindo óleo de peixe e farinha.

Esses resíduos provêm de indústrias localizadas em Itajaí, Santa Catarina, a aproximadamente 200 km de distância da Usina de Biogás como é possível visualizar na Figura 15.

Figura 15 – Distância Indústria resíduos da Pesca e Usina de Biodigestão



Fonte: Google Maps adaptado pela autora (2024).

O óleo e a farinha são produzidos com materiais como vísceras, escamas, carcaças e peles, já processados anteriormente nessas indústrias antes de serem enviados à planta.

Na Figura 16 e Figura 17 é possível visualizar a chegada do resíduo, assim como é realizada a descarga do óleo para futuro processamento na planta.

Além disso, assim como no caso dos resíduos orgânicos, são realizadas análises periódicas dos sólidos voláteis desses resíduos, conforme ilustrado na Figura 18.

Figura 16 – Descarga



Figura 17 – Descarga do resíduo através do tubo



Fonte: Autora (2024).

Figura 18 – Resíduo Encaminhado para Análises



Fonte: Autora (2024).

Em 2023, um total de 585.301 de litros de resíduos das indústrias pesqueiras foi encaminhado para a planta (Tabela 3).

Tabela 3 – Quantidade Resíduos de óleos da Industria Pesqueira recebidos no ano de 2023.

Meses (2023)	Resíduos Óleos Industria 1 (L)	Teor médio de sólidos – Industria 1	Resíduos Óleos Industria 2 (L)	Teor médio de sólidos Industria 2
Janeiro	25.826	30,92%		
Fevereiro	29414	31,71%		
Março	27.221	28,02%		
Abril	29.394	25,41%	23.165	28,44%
Maiο	26.184	24,88%	50.103	16,91%
Junho	27.139	24,13%	28.062	14,75%
Julho	28.942	23,43%	23.638	16,11%
Agosto	32.058	20,11%	22.163	8,28%
Setembro	28.492	22,20%	28.403	13,22%
Outubro	24.500	34,03%	42.247	11,07%
Novembro	25.803	19,67%	23.731	13,30%
Dezembro	25.387	28,10%	13.430	12,49%
Total (L)	330.360	-	254.942	-

Fonte: Adaptado de SANEPAR (2023)

4.2.4 Resíduo provenientes de Segmentos Variados da Industria.

Desde o ano de 2020 até setembro de 2023, a planta recebeu diversos resíduos industriais de uma indústria alimentícia situada no centro de Curitiba, a 21 km de distância da planta.

Os materiais recebidos incluem soro de leite, lodo (Figura 19), massa de bolacha (Figura 20), chiclete e sorvete para fins metodológicos. Também, para praticidade, esses resíduos serão citados durante este trabalho como "Resíduos Especiais".

Figura 19 – Lodo Industrial



Figura 20 – Resíduo proveniente da massa de bolacha



Fonte: SANEPAR (2023).

Durantes o ano de 2023 a Planta recebeu ao todo 157.988 kg de todos os resíduos citados acima. Assim como para os outros resíduos, também foram realizadas análises periódicas dos sólidos voláteis durante o período em que a planta recebeu esses resíduos. Na Tabela 4 é possível visualizar o total de Resíduos Especiais recebido durante o período de 2023.

Tabela 4 – Quantidade Resíduos Especiais recebidos no ano de 2023

Meses (2023)	Massa de Resíduos Especiais (kg)	Teor médio de sólidos Resíduos Especiais (%)
Janeiro	8.805	44,16%
Fevereiro	4.430	15,25%
Março	33.055	29,33%
Abril	8.333	20,80%
Maiο	18.810	30,44%
Junho	6.945	24,72%
Julho	27.920	15,19%
Agosto	5.350	19,73%
Setembro	29.350	13,53%
Total (kg)	157.988	-

Fonte: Adaptado de SANEPAR (2023)

4.2.5 Tanques de Homogeneização e Biodigestores

Atualmente a usina possui dois tanques de homogeneização (Figura 21 e Figura 22), que possuem capacidade 5000m³, sendo totalmente vedados, aquecidos e dispendo de agitadores para que ocorra a perfeita homogeneização.

Figura 21 – Tanques de Homogeneização (Vista Superior)



Fonte: Rotária do Brasil (2024).

Figura 22 – Tanques de Homogeneização



Fonte: Rotária do Brasil (2024).

O produto acidificado, efluente dos dois tanques de homogeneização, é bombeado por bombas helicoidais aos tanques biodigestores. Os biodigestores anaeróbios (Figura 23), são aquecidos por serpentinas que conduzem água quente no interior do digestor.

Por sua vez, o aquecimento da água se dá pelo calor produzido nos motogeradores quando realizam a conversão de biogás em energia elétrica e térmica (OJEA, 2023).

Figura 23 – Biodigestores dos resíduos previamente acidificados



Fonte: Rotária do Brasil (2024).

O digestato, efluente dos tanques digestores, vai para o tanque de pós digestão, no qual acontece a separação de gás e sólidos (biogás e digestato). O biogás gerado no processo vai para o sistema de conversão de biogás em energia, compreendidos por motogeradores de ciclo Otto.

O digestato desaguado, efluente do tanque de pós digestão, é encaminhado para a prensa desaguadora, saindo da prensa com teor de sólidos de aproximadamente 20% (SANEPAR,2023).

Logo após esse digestato desaguado, assim como já mencionado acima, é encaminhado para o aterro sanitário localizado no Município de Palmeira a 104 km na planta.

Ao todo, no ano de 2023 foram encaminhados para o aterro o total de 23.848.610 kg de digestato desaguado (Tabela 5).

Tabela 5– Digestato desaguado encaminhado destinado para o Aterro

Meses (2023)	Massa de digestato encaminhada para o Aterro Sanitário (kg)
Janeiro	2.042.600
Fevereiro	1.958.640
Março	2.178.910
Abril	2.018.690
Maio	2.291.610
Junho	2.295.690
Julho	2.277.620
Agosto	1.897.530
Setembro	1.511.530
Outubro	1.646.930
Novembro	1.669.630
Dezembro	2.059.230
Total (kg)	23.848.610

Fonte: Adaptado de SANEPAR (2023)

O encaminhamento para o aterro é realizado por caminhões, esse transporte ocorre, em média, duas vezes por dia, conforme a necessidade de esvaziamento da caçamba.

4.2.6 Biogás gerado na Planta e quantificação de Metano

A produção diária de biogás na planta é quantificada utilizando dois medidores do tipo Vortex - Höntzsch (UVA-Ex-d-VA40-E-10), da fabricante *Hoentzsch*. Já para a quantificação de Metano presente no biogás gerado é utilizado o medidor *Multitec 560* da fabricante *Sewerin*. As medições são realizadas diariamente para garantir a maior representatividade dos dados.

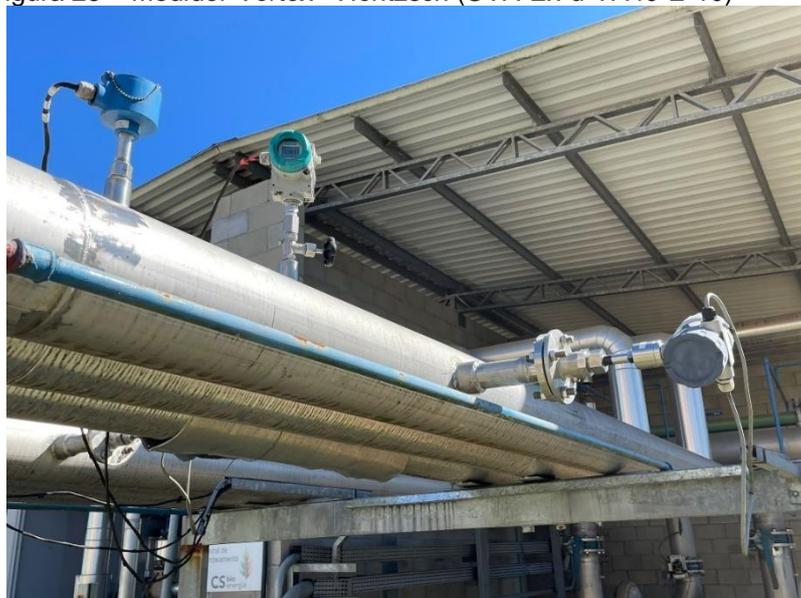
O dispositivo Multitec 560 (Figura 24) é portátil é destinado a medições em plantas de pequeno e médio porte. É ideal para locais como estações de tratamento de águas residuárias e unidades de biogás. Quando utilizado como medidor de gás, consegue identificar e documentar a composição de gases de processos biológicos (Sewerin, 2024). Para a medição, esse dispositivo utiliza sensores infravermelhos para a medição do CH₄, CO₂ (Ambos de 0 a 100% Vol.) e sensores eletroquímicos para os gases O₂ (0 a 25,0% Vol.) e H₂S (0 a 2000 ppm) (HERNANDEZ et al., 2021).

Figura 24 – Medidor Multitec 560



Fonte: Rotária do Brasil (2024)

Já o dispositivo: *Vortex - Höntzsch* (UVA-Ex-d-VA40-E-10) (Figura 25 e Figura 26), realiza a medição da vazão de biogás. Esse dispositivo é composto por uma unidade de medição do tipo vórtice da marca *Höntzsch*.

Figura 25 – Medidor *Vortex - Höntzsch* (UVA-Ex-d-VA40-E-10)

Fonte: Rotária do Brasil (2024)

Figura 26 – Medidor Vortex - Höntzsch (UVA-Ex-d-VA40-E-10)



Fonte: Rotária do Brasil (2024)

As medições são realizadas 3 vezes ao dia, para que seja possível registrar e acompanhar a evolução da produção de biogás de forma mais detalhada. No caso de estudo para o ano de 2023, foram produzidos ao total 3.711.668 Nm³ de biogás (Tabela 6) já para a presença de CH₄ no gás, a média foi de 62,77%.

A vazão de biogás no final do sistema de captação, condicionamento e aproveitamento energético não corresponde à quantidade total de biogás gerado, devido às perdas que ocorrem entre a geração nos biodigestores e o processo final. Quando ambos os geradores estão em operação, soma-se o valor lido por cada dispositivo para determinar a quantidade total de biogás. As perdas mencionadas são intrínsecas ao processo.

Tabela 6 – Volume de Biogás (Nm³) e CH₄(%)

Meses (2023)	Volume Biogás Gerado na Planta (Nm ³) (Sem descontar valores de perda intrínseco ao processo)	CH ₄ (%)
Janeiro	335.887	62,45%
Fevereiro	336.863	63,04%
Março	365.847	62,77%
Abril	298.982	63,87%
Maio	348.068	64,44%
Junho	333.293	62,89%

Meses (2023)	Volume Biogás Gerado na Planta (Nm ³) (Sem descontar valores de perda intrínseco ao processo)	CH ₄ (%)
Julho	353.717	63,75%
Agosto	309.189	63,89%
Setembro	290.975	60,06%
Outubro	200.556	64,90%
Novembro	223.331	61,38%
Dezembro	314.960	59,9%
Total (kg)	3.711.668	-

Fonte: Adaptado de Sanepar (2023)

4.2.7 Capacidade da Geração de Energia da Usina

Os dois motogeradores de Ciclo Otto (Figura 27) presentes na usina têm a capacidade de converter até 20.000 m³ de biogás por dia, resultando em uma capacidade de geração de energia elétrica anual de 21 GWh. Além disso, o calor recuperado do co-gerador é equivalente a 300.000 litros de óleo combustível (CSBIONERGIA,2017).

Figura 27 – Motores de Ciclo Otto



Fonte: Autora (2024).

4.3 IDENTIFICAÇÃO DAS FONTES PRIMÁRIAS DE GEE NA PLANTA DE CODIGESTÃO

Para a realização da identificação das fontes primárias de Gases de Efeito Estufa foram necessários:

1. **Identificação das Unidades de Tratamento:** Foram identificadas todas as unidades envolvidas no processo, desde a chegada do lodo da ETE até a geração de energia através do motogerador.
2. **Levantamento de Dados Operacionais:** Foram coletados dados operacionais, incluindo consumo de energia elétrica, uso de combustíveis, volume de lodo recebido diariamente pela ETE, quantidade de resíduos orgânicos e industriais e suas respectivas distâncias da planta, quantidade de biogás produzido e utilizado, entre outros parâmetros relevantes.
3. **Análise dos Equipamentos Utilizados:** Através de visitas, conversas com os engenheiros responsáveis e observação direta dos processos e equipamentos envolvidos.

No Quadro 2 é possível visualizar as fontes primárias levantadas para esse estudo.

Quadro 2 – Fontes primárias de emissões de GEE na planta

Tanque de Equalização da ETE
Mesas adensadoras
Área de Descarga e Trituração de Resíduos Orgânicos
Bombas helicoidais
Tanques de homogeneização e biodigestão (caso não estejam bem vedados)
Sistema de transporte e armazenamento de biogás
Prensa desaguadora
Tubulações e conexões de transporte dos substratos e biogás durante a planta
Transporte até o aterro sanitário
Transporte dos resíduos até a planta

Fonte: Autora (2024)

4.4 ANÁLISE DOS GASES DO EFEITO ESTUFA REALIZADOS PELO SOFTWARE ECAM

4.4.1 Módulos de Entrada de Dados da ferramenta ECAM

Os dados coletados foram inseridos na ferramenta ECAM, começando pela configuração inicial, que envolveu a definição dos limites do sistema e a entrada de

informações gerais sobre a planta. A ferramenta, como mencionado anteriormente, está disponível apenas nas versões em inglês e espanhol, e não é recomendável utilizar traduções automáticas pelo navegador, pois podem ocorrer erros de tradução.

Seguindo a interface do *software*, após a escolha do idioma, foram adicionadas as informações iniciais (Figura 28). Nessa etapa, foi possível escolher o relatório de base, determinando dessa forma o *Global Warming Potential* (GWP) correspondente, assim como o período de avaliação desejado.

É possível visualizar que dentro do software há várias seções adicionais, como DBO₅ gerada e carga de nitrogênio; no entanto, como este estudo é focado nas emissões de uma planta de digestão anaeróbia, esses dados mais generalistas não foram preenchidos.

Figura 28 – Dados Iniciais utilizados no ECAM

The screenshot displays the ECAM software interface for gas emission analysis. At the top, a dropdown menu for 'Relatório Base de GWP' is highlighted in red, showing the selection of 'IPCC 5th AR (2014/2013) CCF'. Below this, the 'Período de Avaliação' (Evaluation Period) is set from 31/01/2023 to 31/12/2023, totaling 334 days. The 'País' (Country) is set to 'Brasil' and the 'Moneda' (Currency) is 'BRL'. A red box highlights the 'Factor de emisión de la red eléctrica' (Electric grid emission factor) set to 0,043 kgCO₂/kWh. Other parameters like 'Consumo de proteína anual per cápita', 'DBO₅ generado', and 'Proteína co-descargada industrial' are listed but empty. A blue button 'Acceder al inventario' is at the bottom.

Fonte: Autora (2024)

Com a escolha do Relatório Base de GWP, seleciona-se o Potencial de Aquecimento Global para diferentes gases de efeito estufa com base nos relatórios de avaliação do IPCC. Esses relatórios variam desde a primeira avaliação realizada em 1990 até a 5ª Avaliação - 2014/2013.

Para os cálculos realizados neste estudo dentro da ferramenta, foram utilizados os dados mais recentes presentes na 5ª Avaliação - 2014/2013. Esta escolha se deve ao fato de que este relatório considera os feedbacks climáticos, ou seja, os efeitos de retroalimentação do clima sobre o ciclo do carbono. Esse fator é crucial para uma avaliação mais completa e precisa dos impactos climáticos.

Ao considerar os feedbacks climáticos, o relatório proporciona uma compreensão mais detalhada de como as emissões de gases de efeito estufa interagem com o clima, que é base de interesse desse estudo.

É possível visualizar na Figura 29 a seguir que a escolha do relatório base de GWP impacta diretamente nos cálculos futuros porque define os valores de referência utilizados para converter as emissões de diferentes gases de efeito estufa em equivalentes de dióxido de carbono ($\text{CO}_{2\text{eq}}$).

Figura 29 – Escolha do Relatório com Potenciais de Aquecimento Global

Configuración > Informes de Evaluación del Potencial de Calentamiento Global

Potencial de aquecimento Global para os próximos 100 anos					
Informe	CO ₂ (CO ₂ equivalentes)	CH ₄ (CO ₂ equivalentes)	N ₂ O (CO ₂ equivalentes)	Comentarios	Seleccionar
IPCC 5th AR (2014/2013) CCF	1	34	298	Con retroalimentación clima-carbono	seleccionar
IPCC 5th AR (2014/2013)	1	28	265	Sin retroalimentación clima-carbono	seleccionar
IPCC 4th AR (2007)	1	25	298		seleccionar
IPCC 3th AR (2001)	1	23	296		seleccionar
IPCC 2nd AR (1995)	1	21	310		seleccionar
IPCC 1st AR (1990)	1	11	270		seleccionar

Fonte: Autora (2024)

Esses valores indicam que o CH_4 possui um potencial de aquecimento global 34 vezes maior que o CO_2 , enquanto o óxido nitroso N_2O representa um potencial 298 vezes superior ao do CO_2 ao longo de um período de 100 anos. É importante frisar que todos os cálculos realizados pelo *ECAM* adotaram esse valor para GWP.

Na próxima tela do software, aparecem as opções para cálculos de emissões em projetos de tratamento de água ou saneamento. Para este estudo, seguiu-se na aba "Saneamento > Tratamento", conforme demonstrado na Figura 30:

Figura 30 – Inventário: Saneamento



Fonte: Autora (2024)

Após a inserção dos dados de entrada, iniciou-se a análise na ferramenta *ECAM*. Devido à natureza específica do estudo, nem todas as abas foram preenchidas. Isso ocorre porque a ferramenta é projetada para realizar cálculos para estações de tratamento de esgotos e para estações de tratamento de água, adaptando-se às necessidades desse projeto.

Para essa etapa inicial adotou-se o valor total de consumo de energia elétrica durante o ano de 2023 na Planta (Figura 31).

Figura 31 – Dados de Entrada: Eletricidade Consumida

Total Nitrogen load in the influent wwt_tn_infl	Estimation: 0 kg	0	kg
Total Nitrogen load in the effluent wwt_tn_eff		0	kg
Untreated systems [100 %] (0 kg)			
CH ₄ emission factor (treatment) wwt_ch4_efac_tre		0	kgCH ₄ /kgBOD
Type of treatment undefined (0)			
N ₂ O emission factor (treatment) wwt_n2o_efac_tre		0	
Type of treatment undefined (0)			
CH ₄ emission factor (discharge) wwt_ch4_efac_dis		0	kgCH ₄ /kgBOD
Discharge undefined (0)		0	
Energy consumed from the grid wwt_nrg_cons		66,233	kWh
Emission factor for grid electricity wwt_conv_kwh	Estimation: 0.38 kgCO ₂ eq/kWh	0.38	kgCO ₂ eq/kWh

Consumo de Energia Elétrica pela Planta (2023)

Espaço para edições realizadas pelo usuário conforme necessidades

Fator de Emissão da Rede (UNFCCC)

Fonte: Autora (2024)

Para a realização dos cálculos de emissões associadas ao processo de codigestão, a ferramenta integra dados sobre o biogás produzido por meio da digestão anaeróbia na planta. Como demonstrado na figura, a interface da ferramenta permite que o usuário insira informações detalhadas sobre diferentes aspectos do biogás.

Estão disponíveis campos para a entrada de dados sobre o volume de biogás produzido, a quantidade queimada, o percentual valorizado como energia ou calor. Além disso, o usuário pode especificar o percentual de metano presente no biogás e a eficiência energética obtida na valorização do biogás para a produção de energia elétrica.

Figura 32 – Dados de Entrada: Produção de Biogás na Planta

Existe produção de biogás por digestão anaeróbia? Yes

Biogás Produzido	Biogas produced (volume) wwt_biog_pro	Estimation: 0 Nm ³	3,711,668	Nm ³ ▾
Biogás Queimado	Biogas flared (% volume) wwt_biog_fla	Estimation: -0%	0	%
Biogás Valorizado	Biogas valorised as heat and/or electricity (% volume) wwt_biog_val	Estimation: 94.73%	94.73	%
	Biogas leaked to the atmosphere (% volume) wwt_biog_llkd	Estimation: 5.27%	5.27	%
	Biogas sold (% volume) wwt_biog_sold	Estimation: -0%	0	%
% Metano no Biogás	Percentage of methane in the biogas (% volume) wwt_ch4_biog		62.78	%
	Fuel type (digester) wwt_dige_typ	(0) Diesel ▾		
	Fuel consumed for the digester wwt_fuel_dig		0	L ▾
Eficiência Energética	Energy efficiency for biogas valorization with respect to the theoretical maximum wwt_nrg_biog_eff		43	%
	Electrical energy produced from biogas valorization wwt_nrg_biog	Estimation: 10,440,928 kWh	9,365,320	kWh ▾

Energia Elétrica Produzida a partir da valorização Do Biogás

Fonte: Autora (2024)

Por fim, a ferramenta também oferece a opção de adicionar informações sobre a destinação do lodo, como mencionado anteriormente. No entanto, a ferramenta ECAM não foi projetada para realizar cálculos em plantas que utilizam codigestão de diferentes substratos. Assim, assumiu-se que os valores apresentados nestas abas referem-se ao digestato, que é encaminhado para o aterro.

No campo superior, é possível inserir a quantidade de lodo enviado para aterro sanitário (peso seco). Logo abaixo, temos o campo Sólidos Voláteis Totais (SVT), que indica a porcentagem desses sólidos no lodo enviado. O Fator de incerteza, que é definido conforme Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC) de 2008, também é apresentado para ajustar os cálculos de emissões.

Outros campos importantes incluem o CH₄ no gás de aterro, a Fração orgânica decomponível de sólidos de águas residuais brutas, a porcentagem decomposta nos primeiros 3 anos, e a Correção de metano para aterros anaeróbios.

Figura 33 – Dados de Entrada: Destinação final Digestato

O lodo é enviado para aterro sanitário?		No	Yes
Lodo enviado para aterro sanitário (peso seco)	Sludge sent to landfilling (dry weight) wwt_mass_sl_u_land	23,848,610	kg
Sólidos Voláteis Totais (SVT)	Total Volatile Solids (TVS) content of sludge sent to landfilling wwt_sl_u_if_TVS	51	%
Fator de incerteza	Digested (51) Uncertainty factor (UNFCCC/CCNUC, 2008) wwt_sl_u_if_uncertainty	0.9	adimensional
Porcentagem decomposta nos primeiros 3 anos	CH ₄ in landfill gas wwt_sl_u_if_CH4_in_gas	50	%
Conteúdo de nitrogênio	Decomposable organic fraction of raw wastewater solids wwt_sl_u_if_DOCf	80	%
	Percentage decomposed in first 3 years wwt_sl_u_if_decomp_3yr	69.9	%
	Methane correction for anaerobic managed landfills (default=1) wwt_sl_u_if_MCF	1	ratio
	Landfill (1)		
	N content of sludge sent to landfilling (% of dry weight) wwt_sl_u_if_N_cont	4	%
	Digested (4)		
	N ₂ O emission factor for low C:N ratio wwt_sl_u_if_low_CN_EF	0.015	kgN ₂ O-N/kgN
	Fator de emissão de N ₂ O		

Fonte: Autora (2024)

4.4.2 Cálculos relacionados aos dados de Saídas da Ferramenta ECAM

A seguir, serão apresentadas as fórmulas e os cálculos utilizados em cada passo da geração dos dados de saídas pela ferramenta ECAM, que foram utilizados para avaliar as emissões de GEE associadas ao processo planta de digestão anaeróbia.

É possível que o usuário que esteja realizando os cálculos do *ECAM* consiga verificar as fórmulas, constantes e fontes dos cálculos feitos pelo software. Na mesma janela onde estão sendo adicionadas as informações do projeto editável existe uma aba “mostrar saídas”, com essas abas é possível visualizar os dados de saída oferecida pelo *software* (Figura 34).

Quando aberta essa aba de saída, é possível visualizar que abaixo do nome de cada variável, há um código único que representa essa variável no algoritmo da ferramenta. Para verificar as informações por trás dessa variável, basta clicar nesse código, que estará destacado em azul.

Figura 34 – Dados de Saída ECAM

	Valor	Σ suma (1 sub-etapas)	Unidad
Electricidad (Indirecta) wwf_KPI_GHG_elec	2,611	2,611	kgCO ₂ eq
Motores del combustible	268.7	268.7	kgCO ₂ eq
Del proceso de tratamiento wwf_KPI_GHG_tre	0	0	kgCO ₂ eq
Biogás wwf_KPI_GHG_biog	2.83	2.83	kgCO ₂ eq
Combustible empleado en el digestor wwf_KPI_GHG_dig_fuel	0	0	kgCO ₂ eq
Del manejo de lodos wwf_KPI_GHG_slu	537,598	537,598	kgCO ₂ eq
Agua descargada wwf_KPI_GHG_disc	0	0	kgCO ₂ eq
Emisiones totales GEI en etapa de tratamiento de aguas residuales wwf_KPI_GHG	540,480	540,480	kgCO ₂ eq

Fonte: Autora (2024)

Ao clicar no código de uma variável, é realizado um direcionamento para a seção "Informações detalhadas", onde o conteúdo varia conforme o tipo de variável. Para entradas do usuário, são exibidas descrições e os resultados relacionados. As estimativas incluem a fórmula usada para calcular a entrada com base em outras variáveis fornecidas pelo usuário.

Para saídas, são mostradas as fórmulas, as entradas utilizadas, os resultados obtidos, referências e outras saídas que dependem desses resultados. Este sistema facilitou a compreensão das inter-relações entre entradas e saídas, permitindo que fossem realizados ao longo desse trabalho a verificação dos cálculos e a identificação de possíveis erros. A seguir é possível visualizar a aba que foi utilizada durante o processamento de dados nesse trabalho na Figura 35.

Figura 35 – Aba Seções Detalhadas



Fonte: Autora (2024)

A seguir, as equações de saída serão apresentadas, assim como suas fórmulas correspondentes que foram utilizadas para a realização do presente trabalho, para fins mais didáticos, serão separadas por subtópicos.

4.4.2.1 Cálculos das Emissões relacionadas a Emissões Geradas do consumo indireto da Energia Elétrica

Com base nos dados de entrada, o ECAM calculou as emissões de GEE da eletricidade (indireta). Essas emissões foram calculadas multiplicando o consumo de energia da rede da Planta de Biogás em 2023 no valor total de 66,233 KWh , pelo fator de emissão para eletricidade da rede no valor de 0,3785KgCO₂e_q-KWh definido como um fator geral, esse fator foi adicionado a partir do valor de fator de emissão de 2021 da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC), pois é indicado pelo software que seja adotado valores indicados pelo método de despacho na margem da UNFCCC (SILVA et al.,2022) .

Apesar de ser uma aba editável onde poderia ser adotado um valor nacionalizado, como o Sistema de Registro Nacional de Emissões (SIRENE), decidiu-se, neste estudo, seguir o indicado na metodologia do software, a fim de visualizar melhor as diferenças.

Quadro 3- Detalhes dos cálculos Realizados pelo ECAM Emissão Elétrica

Categoria	Detalhes
Dados da Planta de Biogás	
Consumo de energia da rede da Planta (2023)	66,233 KWh
Fator de emissão para eletricidade da rede UNFCCC (2021)	0,3785KgCO ₂ eq-KWh
Cálculos realizados Pelo Software	
Código da Equação utilizado no <i>ECAM</i>	wwt_KPI_GHG_elec
Equação de Emissões eletricidade [kgco ₂ eq]	$wsd_{nrgcons} * wsd_{convkwh}$
Componentes da Fórmula no <i>ECAM</i>	
<i>wwt_nrg_cons</i>	Consumo de energia da rede (kWh)
<i>wwt_conv_kwh</i>	Fator de conversão de kWh para kgCO ₂ eq
Fontes que o <i>ECAM</i> utiliza para cálculos	Baseado em EIB (2020) e UNFCCC (2022)

Fonte: Adaptado SILVA et al.,2022

4.4.2.2 Cálculos das Emissões relacionados ao processo de Codigestão

Como mencionado anteriormente, a ferramenta *ECAM* não está configurada para realizar cálculos em plantas de codigestão diretamente. Portanto, para proceder com a análise do processo de codigestão, as informações pertinentes foram inseridas manualmente na aba dedicada à produção de biogás por digestão anaeróbia. Este processo de cálculo é dividido em três etapas principais:

Primeiro converteu-se a produção de biogás da planta em mols com a produção de biogás da planta em 2023, para posterior utilização no cálculo de perda de CH₄.

Após o cálculo da perda de biogás, o valor é convertido em CO₂ equivalente (CO₂eq).

Quadro 4- Detalhes cálculos Realizados pelo ECAM Emissões: Codigestão

Categoria	Detalhes	Valores atribuídos no ECAM
Dados da Planta de Biogás		
Biogás Gerado na Planta (2023)		371.1667 Nm ³
Perda de Biogás que ocorre durante o processo na planta		5.27%
Cálculos realizados Pelo Software		
Código da Equação utilizado no ECAM		wwt_KPI_GHG_biog
Equação da produção de Biogás em (mol)		$\frac{P \times wwt_{biogpro}}{R \times T}$
Equação cálculo do Biogás Vazado (kg)		$wwt_moles_biogas_produced \times \frac{wwt_biog_lkd}{100} \times \frac{wwt_ch4_biog}{100} \times 0.016$
Equação para cálculo do biogás Perdido (kgCO ₂ eq)		$CH4perdido \times ct_{CH4eq}$
Componentes da Fórmula no ECAM		
wwt_moles_biogas_produced [moles]	Moles de biogás produzidos, calculados considerando condições normais de pressão e temperatura.	-
P [J/m ³]	Pressão normal	1,013 x 10 ⁵
wwt_biog_pro [m ³]	Biogás produzido	3,711,668
R [kJ/(kmol·K)]	Constante universal dos gases	8.3145
T [K]	Temperatura normal	273.15
wwt_biog_lkd [% de volume]	% de Biogás perdido durante o processo	5,27%
wwt_ch4_biog [% de volume]	Percentual de metano no biogás	62,78%
-	Conversão de mols de CH ₄ para kgCH ₄	0.016
$wwt_KPI_GHG_biog_leaked$ [kgCO ₂ eq]	Biogás Perdido	-
ct_ch4_eq [kgCO ₂ eq/kgCH ₄]	Potencial de Aquecimento Global (GWP) de CH ₄ para CO ₂ eq	34
Fontes que o ECAM utiliza para cálculos		IPCC (2006)

Fonte: Adaptado SILVA et al.,2022

4.4.2.3 Cálculos das Emissões relacionadas a Destinação do digestato e da disposição no aterro sanitário

Na ferramenta ECAM, é possível escolher o tipo de destinação final do lodo, como compostagem, incineração, aplicação no solo ou aterro sanitário, e calcular as emissões de GEE também correspondentes ao armazenamento, estocagem e

transporte. Para esse estudo, foram calculadas as emissões para a destinação final do aterro sanitário.

Para o lodo de aterros sanitários podem ser gerados significativas emissões: emissões fugitivas de metano em condições anaeróbicas e emissões de óxido nitroso relacionadas ao aumento de nitrogênio disponível no solo (aumentando assim as taxas de nitrificação e desnitrificação).

Os cálculos realizados pela ferramenta *ECAM* foram estruturados seguindo o modelo *BEAM* (*The Biosolids Emissions Assessment Model*), para que fosse possível ser calculado com base nas características do lodo (SILVA et al.,2022).

Primeiramente, determinou-se a quantidade de lodo seco enviada ao aterro ($wwt_{mass_slu_land}$). Em seguida, determina-se o percentual de sólidos voláteis totais (TVS) no lodo para avaliar a fração orgânica. A fração é então convertida para carbono orgânico utilizando o fator de conversão de sólidos voláteis totais para carbono orgânico (SILVA et al., 2022).

Para calcular as emissões de metano, realiza-se a conversão de carbono em CH_4 e determina-se a fração de CH_4 no gás do aterro. Aplica-se o fator de correção para aterros anaeróbicos gerenciados e converte-se metano para equivalente de CO_2 para facilitar a comparação. Além disso, as emissões de N_2O são determinadas com base no conteúdo de nitrogênio no lodo e os fatores de conversão específicos. (SILVA et al.,2022).

Por fim, somam-se as emissões de CH_4 e N_2O para obter o total de emissões de GEE equivalentes de CO_2 .

Quadro 5 - Detalhes cálculos Realizados pelo ECAM: Gerenciamento de Lodo

Categoria	Detalhes	Valores atribuídos no ECAM
Dados da Planta de Biogás		
Digestato encaminhado para aterro (2023)	23.848.610 kg	
Cálculos realizados Pelo Software		
Código da Equação utilizado no ECAM	wwt_KPI_GHG_slulandfilling	
Equação utilizada para o valor de metano $CH_4[kgCH_4]$	$wwt_{mass_slu_land} \times \frac{wwt_{slu_lf_TVS}}{100} \times ct_{VS_toOC} \times wwt_{slu_lf_uncertainty} \cdot ct_{C_toCH_4_{1612}} \times \frac{wwt_{slu_lf_CH_4_in_gas}}{100} \times \frac{wwt_{slu_lf_DOCf}}{100} \times \frac{wwt_{slu_lf_decomp3yr}}{100} \times wwt_slu_lf_MCF \times ct_ch4_eq$	

Categoria	Detalhes	Valores atribuídos no ECAM
Equação utilizada para Soma Total de Emissões	$wwt_KPI_GHG_slu_landfilling[kgCO2eq] = CH4 + N2O$	
Componentes da Fórmula no ECAM		
$wwt_mass_slu_land [kg]$:	Quantidade de lodo enviada para o aterro (peso seco).	23.848.610
$wwt_slu_lf_TVS [%]$:	Percentual de sólidos voláteis totais no lodo. Isso determina a fração do lodo que é orgânica e pode decompor-se para produzir metano.	51%
$ct_VS_to_OC [kg OC/kg VS]$	Fator de conversão de sólidos voláteis (VS) para carbono orgânico (OC).	0,56
$wwt_slu_lf_uncertainty$	Fator de incerteza do modelo	0,9
$ct_C_to_CH4_16_12 [kg CH4 /kg OC]$	Fator de conversão de carbono orgânico para metano.	1,33
$wwt_slu_lf_CH4_in_gas [%]$	Percentual de metano no gás do aterro.	50%
$wwt_slu_lf_DOCf$	Fração do carbono orgânico que está disponível para decomposição	0,8
$wwt_slu_lf_decomp_3yr [%]$	Percentual de decomposição dos 3 primeiros anos	69,9
$ct_ch4_eq [kg CO2eq /kg CH4]$	Fator de correção de metano para aterros anaeróbicos gerenciados,	34
Fontes que o ECAM utiliza para cálculos	CCME (2008)	

Fonte: Adaptado SILVA et al.,2022

4.5 ANÁLISE DOS GASES DO EFEITO ESTUFA REALIZADOS DE FORMA MANUAL

As emissões foram calculadas manualmente utilizando uma planilha do *Microsoft Excel*, utilizando os valores de GWP do AR6 do IPCC. Esse passo serviu para permitir a comparação e avaliação da ferramenta *ECAM*, além de calcular valores adicionais que não seriam possíveis de obter na ferramenta.

A seguir, serão apresentados os cálculos relacionados a cada parte do processo. Para esses cálculos, foram adotadas as metodologias recomendadas pelo IPCC, conforme descritas no "*2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*".

4.5.1 Emissões relacionadas ao consumo de Energia Elétrica

O cálculo das emissões indiretas geradas pela utilização da Energia Elétrica na planta, foi realizado de forma bem similar a do *ECAM*, e conforme as metodologias e diretrizes do IPCC (2019).

Essas emissões foram calculadas multiplicando o consumo de energia da rede da Planta de Biogás em 2023, no valor total de 66.233 KWh pelo fator de emissão para eletricidade da rede definido como um fator geral (Eq. 1).

Ao contrário do valor utilizado anteriormente na ferramenta *ECAM*, utilizou-se como base o valor calculado de forma nacionalizada pelo Sistema de Registro Nacional de Emissões (SIRENE), no valor de 0,0385 kgCO₂/ano.

$$\text{Consumo de energia da rede (kWh)} \times \text{Fator de conversão} \left(\frac{\text{kgCO}_2\text{eq}}{\text{kWh}} \right) \quad 1$$

4.5.2 Emissões relacionadas ao processo de Codigestão

A planilha de biogás em anexo no Apêndice fornece uma visão detalhada sobre a produção mensal de biogás e metano, e como esses valores se relacionam com os cálculos que serão citados a seguir.

Para o cálculo do volume do metano (m³/mês), multiplicou-se o volume total de biogás (Nm³) pela porcentagem de CH₄ (%) para obter o volume de metano em metros cúbicos por mês.

$$\text{Volume de Metano} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{mês}} \right) = \text{Volume de Biogás (Nm}^3\text{)} * \left(\frac{\text{CH}_4(\%)}{100} \right) \quad 2$$

Foi utilizada a densidade do metano, que é de 0,716 kg/m³, para converter o volume de metano em massa. Esta densidade refere-se as condições referenciais dadas por uma temperatura de 0 °C e pressão de 1 atm.

Para a quantidade de Metano(kg/mês) monitorada antes do motogerador: Calculou-se a quantidade de metano em quilogramas por mês, multiplicando o volume de metano (m³/mês) pela sua densidade.

$$\text{Volume de Metano} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{mês}} \right) * \text{Densidade de Metano} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \quad 3$$

Posteriormente, avaliou-se o potencial teórico de produção de metano com base no *Biochemical Methane Potential (BMP)* ou em tradução em português, Potencial Bioquímico de Metano (PBM). Esta quantidade teórica foi utilizada para comparações e para verificar a eficiência do processo de digestão anaeróbia, a seguir detalha-se a respeito dos cálculos realizados.

Para isso, compilou-se os dados referentes à composição total dos substratos processados na planta de codigestão durante o ano de 2023. A análise incluiu a determinação dos Sólidos Totais (ST) e a relação Sólidos Voláteis/Sólidos Totais (SV/ST) para cada substrato.

Os valores de ST foram obtidos através de análises diretas na planta, enquanto os valores de SV/ST para substratos específicos, como gorduras e resíduos industriais, foram adotados da literatura. Para os demais substratos, os valores foram obtidos por meio de estudos específicos realizados na planta.

Os valores de BMP(LNCH₄/kgSV) para cada substrato, foram retirados de literaturas consolidadas, conforme especificado no quadro Quadro 7.

Para o cálculo do CH₄(Nm³/ano), calculou-se por meio da equação descrita abaixo.

$$\frac{\text{Massa anual dos substratos (kg)} \times \text{ST}(\%) \times \frac{\text{SV}}{\text{ST}}(\%) \times \text{BPM} \left(\frac{\text{LNCH}_4}{\text{kgSV}} \right)}{1000} \quad 4$$

Posteriormente para passar esse valor para kg por ano multiplicou-se o valor obtido pela densidade do metano no valor de 0.715624 kg/Nm³.

Por fim, comparou-se a quantidade real de metano monitorada (kg/mês) com o potencial teórico. Calculando a diferença percentual entre esses valores para avaliar o desempenho real do sistema em relação ao seu potencial teórico e também poder estimar as perdas de metano no processo e respectivas emissões, conforme a equação abaixo.

$$\left(\frac{\text{Quantidade de Metano Real} - \text{Quantidade de Metano Teórica}}{\text{Quantidade de Metano Teórica}} \right) \times 100 \quad 5$$

4.5.3 Emissões relacionadas ao processo de Transporte do Digestato para o aterro e Disposição.

Para estimar as emissões de GEE do digestato destinado a aterros sanitários, seguiu-se os mesmos passos da ferramenta *ECAM* uma planilha manual. Iniciou-se determinando a quantidade total de lodo seco enviado ao aterro, em seguida, utilizou-se o valor de 0.56 (kgBOD/kg) para a conversão desse valor em carbono orgânico.

Com base nesse carbono, estimou-se as emissões de metano, considerando a fração não capturada no sistema de gás do aterro.

Além disso, converteu-se as emissões de metano para $\text{CO}_{2\text{eq}}$ e calculou-se as emissões de N_2O a partir do conteúdo de nitrogênio do lodo também convertidos $\text{CO}_{2\text{eq}}$. As emissões totais de CH_4 e N_2O foram somadas para obter o total de emissões de GEE.

Para as emissões relacionadas a destinação foram calculadas considerando o tempo de degradação no aterro sanitário, segundo o modelo CCME, assim como nos cálculos realizados pelo *ECAM*.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 DADOS LEVANTADOS NA PLANTA DE CODIGESTÃO ANAERÓBIA

No Quadro 6 a seguir é possível visualizar os principais dados coletados da planta de Biodigestão.

Quadro 6 – Dados Compilados Planta de Biogás.

Parâmetros (2023)	Resultados
Biogás Gerado na Planta de Biogás (Nm ³)	3.711.667,94
Média Ponderada CH ₄ (%)	62,78%
Consumo de Energia elétrica (kWh/ano)	66.233
Produção de energia elétrica (kWh/ano)	9.365.320
Quantidade de digestato enviada ao Aterro Sanitário (kg)	23.848.610
Número de viagens anuais	730
Distância média por viagem (km)	104
Consumo Específico do Caminhão (m ³ /km)	0,0026
Tipo de Combustível	Diesel

Fonte: Adaptado SANEPAR (2024)

5.2 CÁLCULOS RELACIONADOS A CODIGESTÃO

Como mencionado anteriormente, o valor de biogás gerado na planta é medido na entrada dos motogeradores, não havendo medidores em outros pontos anteriores aos geradores para verificar a perda de biogás durante o processo. Esse valor é importante pois tanto para os valores utilizados para cálculos fora do *software* e principalmente o *ECAM* utiliza esses valores para calcular as emissões realizadas na digestão anaeróbia.

Para o cálculo da perda, como descrito na seção 4.5.2, foi calculado o Potencial Bioquímico de Metano (PBM), que é o potencial teórico a partir da composição de cada substrato presente na codigestão na planta. Essa comparação permitiu calcular a diferença e, assim, estimar a perda de biogás durante o processo.

Com base nesses cálculos, estimou-se uma perda de biogás de 5,27%, valor que se aproxima dos encontrados na literatura. Por exemplo, a PROBIOGÁS referencia uma perda em torno de 5%. O valor de 5,27% foi utilizado tanto na planilha manual quanto nos cálculos realizados no ECAM.

A seguir, apresenta-se no Quadro 7, os valores referentes aos cálculos realizados para a produção teórica.

Quadro 7 – BPM Substratos Planta de Codigestão

Composição da mistura				Características do Substrato				Geração de Metano teórica	
Substrato	MF anual (kg)	MF anual (ton)	Proporção mistura (%)	ST (%)	SV/ST (%)	Fonte	BPM (LNCH ₄ /kgSV)	Fonte	CH ₄ (kg/ano)
Lodo da ETE	294.578	294.578	94,471%	2,50%	68,0%	Esse Estudo (2024)	220	RINTALA, 1996	788.41
Resíduos Orgânicos (Frutas e Verduras)	9.101	9.101	2,919%	13,33%	88,8%	-	500	EDWIGES, 2017	385.345
Gordura	1.552	1.552	0,498%	8,88%	99,0%	GROSSER, 2018	700	GROSSER, 2018, PRÓBIOGÁS, 2015	68.318
Peixe GDC	4.610	4.611	1,479%	25,60%	94,8%	Esse Estudo (2024)	540	BÜCKER et al, 2020	432.456
Peixe BFP	1.606	1.606	0,515%	13,56%	83,2%	Esse Estudo (2024)	540		70.002
Peixe Total	6.216	6.217	1,994%	22,49%	-	Esse Estudo (2024)	540		-
Indústria Alimentícia Total	355	355	0,114%	18,98%	70,0%	MITO et al., 2018; PALHARES, 2013;	450	PROBIOGÁS, 2015	15.189
Outros	14.990	15	0,005%	18,83%	70,0%	Esse Estudo (2024)	400	-	565
Total Teórico (CH₄)	-	-	-	-	-	-	-	-	1.760.297,61

Fonte: Autora (2024)

5.2.1 Emissões Geradas – Codigestão

Os cálculos mensais das emissões geradas para a atmosfera, realizados manualmente, podem ser visualizados na Tabela 6 à seguir.

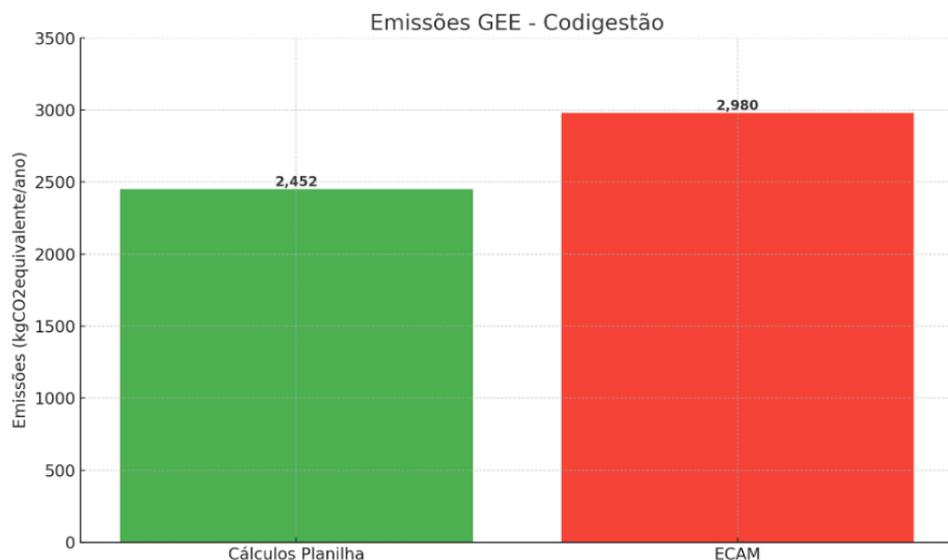
Tabela 7 – Valores das Emissões de GEE mensais da Planta de Codigestão

Parâmetros (2023)	Emissões (kgCO ₂ equivalente)
Janeiro	220.720
Fevereiro	223.457
Março	241.612
Abril	200.915
Mai	235.989
Junho	220.553
Julho	237.262
Agosto	207.840
Setembro	183.885
Outubro	136.943
Novembro	144.223
Dezembro	198.383
Total	2.451.781

Fonte: Autora (2024)

O total das emissões relacionadas a codigestão, calculadas manualmente foi de 2.451.781 kgCO₂eq. No entanto, ao utilizar a ferramenta ECAM para este cálculo, o valor obtido foi de 2.979.710 kgCO₂eq.

Figura 36 – Resultados Emissões Geradas – Codigestão Anaeróbia

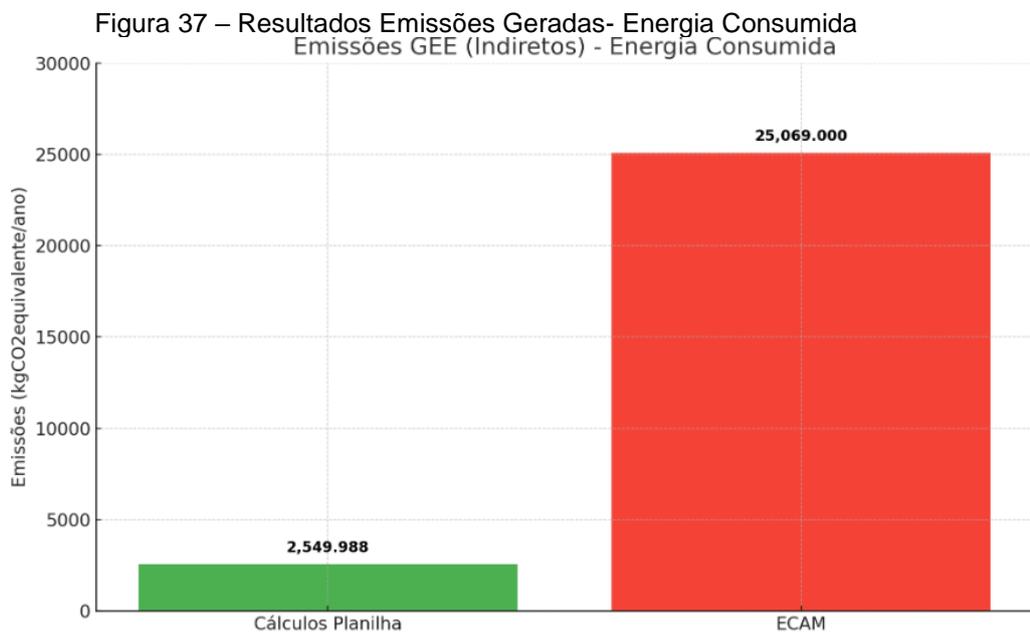


Fonte: Autora (2024)

5.3 EMISSÕES GERADAS DO CONSUMO INDIRETO DE ENERGIA DE REDE

Para as emissões relacionadas ao consumo de energia, o cálculo manual utilizando a planilha e o valor do fator de emissão nacionalizado para a energia elétrica do Brasil, publicados pelo SIRENE, resultou em um valor de 2.550 kgCO_{2eq}/ano. Já o cálculo, pela ferramenta ECAM, aplicando a metodologia da UNFCCC (2022), apresentou um valor de 25.069 kgCO_{2eq}/ano.

Os valores e as diferenças podem ser observados na Figura 37 abaixo.



Fonte: Autora (2024)

As diferenças entre os dois valores decorrem do fator de emissões de energia elétrica consumida da rede utilizado em cada cálculo. Para os cálculos realizados fora da ferramenta, optou-se por adotar o valor nacionalizado disponível nos dados do SIRENE (0.0385 kgCO₂/kWh).

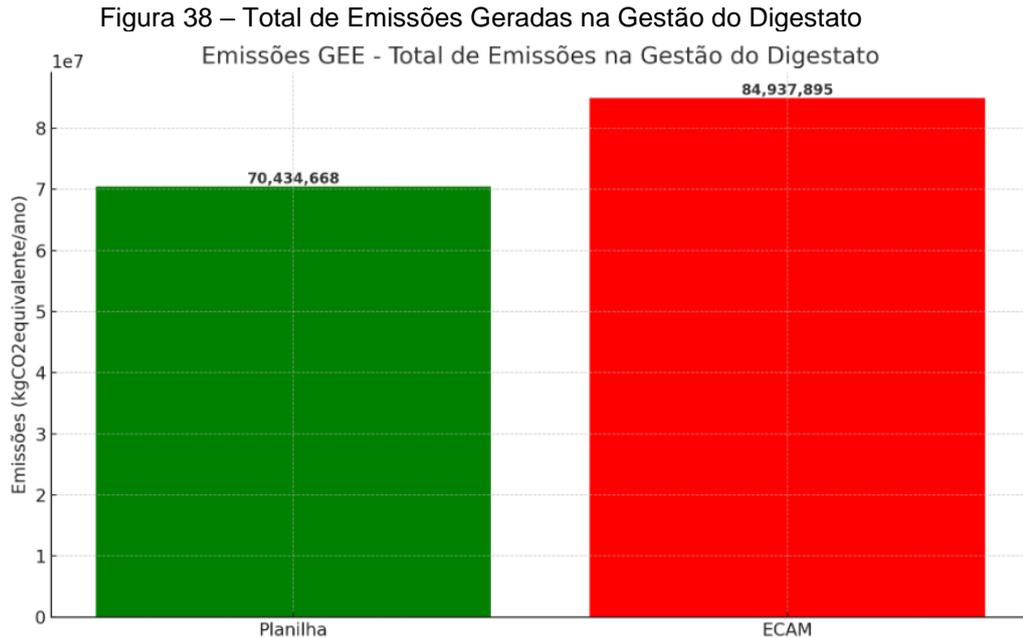
Na ferramenta *ECAM*, como mencionado na seção 4.4.2.1, existe a possibilidade de customização disponível para os cálculos realizados nesta seção. Entretanto, no manual do software, é indicado que se utilize a metodologia de despacho na margem da UNFCCC (0.3785 kgCO₂/kWh).

Esta metodologia é utilizada para o cálculo e é baseada na Lista de Padrões Harmonizados de Contabilidade de GEE/Abordagens e Diretrizes desenvolvidas pela UNFCCC (UNFCCC apud SILVA et al., 2022). Ela é empregada para calcular as emissões de referência do setor elétrico ao comparar projetos de geração antigos com a construção de novos projetos de geração de energia em um país. É uma

metodologia adaptada para definir os valores do fator de emissão da rede de energia elétrica, especificamente para o ECAM (SILVA et al., 2022).

5.4 EMISSÕES RELACIONADAS A GESTÃO DO DIGESTATO

A seguir, serão apresentados os resultados das emissões geradas pela gestão do digestato, divididos conforme suas respectivas fontes de geração.



Fonte: Autora (2024)

Segundo os cálculos realizados pelo *software ECAM*, o processo totaliza emissões de 84.937.895 kg CO_{2eq}/ano, sendo a maior parte atribuída ao transporte do digestato, que gera 537.549 kg CO_{2eq}/ano.

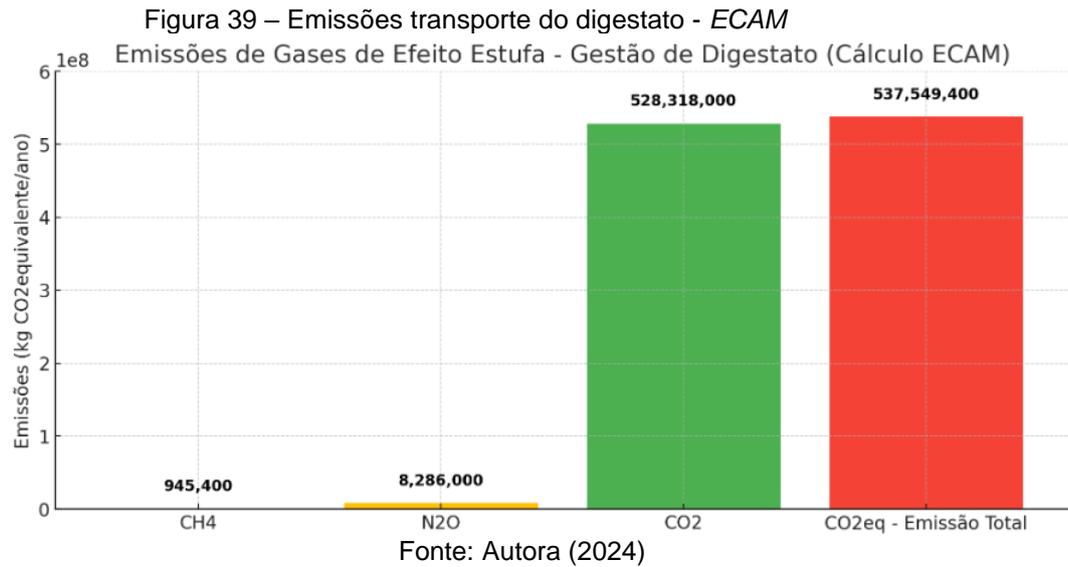
Ao quantificar esses valores manualmente em uma planilha, o total de emissões de gases de efeito estufa foi de 70.434.668 kgCO_{2eq}/ano. Novamente, o transporte do digestato se destacou como o maior emissor, com 536.684 kg CO_{2eq}/ano.

É importante destacar que as diferenças nos valores, assim como já mencionado nas análises de emissões para energia consumida, se devem à limitação do *software ECAM*, que não permite a alteração dos valores de além dos fornecidos até o AR5. Já na planilha manual, as análises foram realizadas com os valores oferecidos pelo AR6.

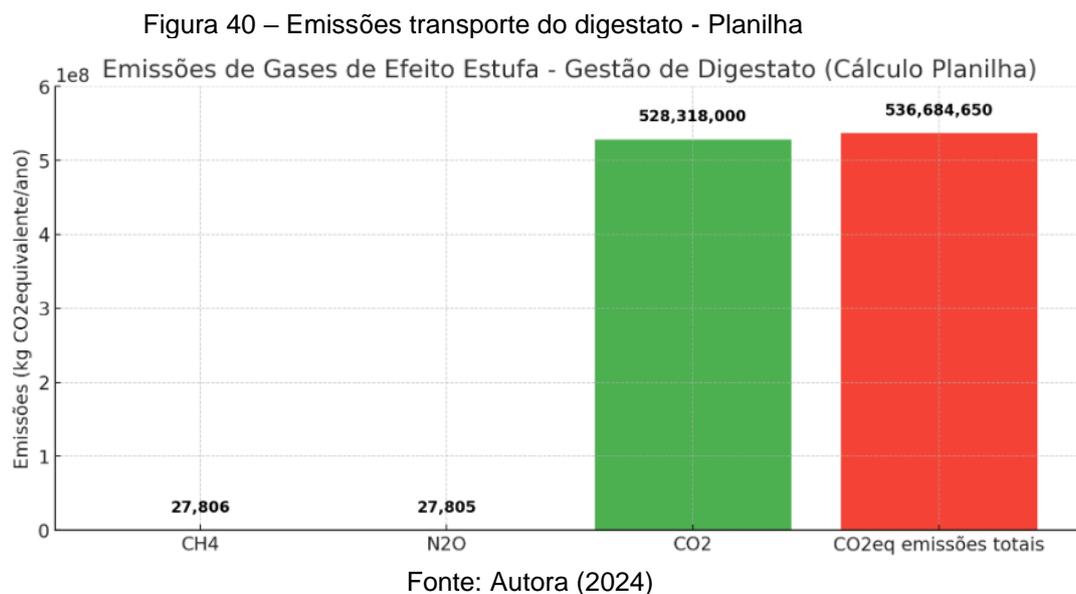
5.4.1 Emissões Relacionadas ao Transporte do Digestato]

A seguir, são apresentados os valores de Emissões para a Gestão do Digestato, especificamente no transporte para o Aterro.

Como é possível visualizar na Figura 39, para o cálculo realizado no Software *ECAM* a emissão calculada foi de 537.549/ano kg CO_{2eq}/ano, sendo a maior parcela de emissão relacionada ao CO₂, seguido pelo valor do N₂O de 8.286 kg CO_{2eq}/ano



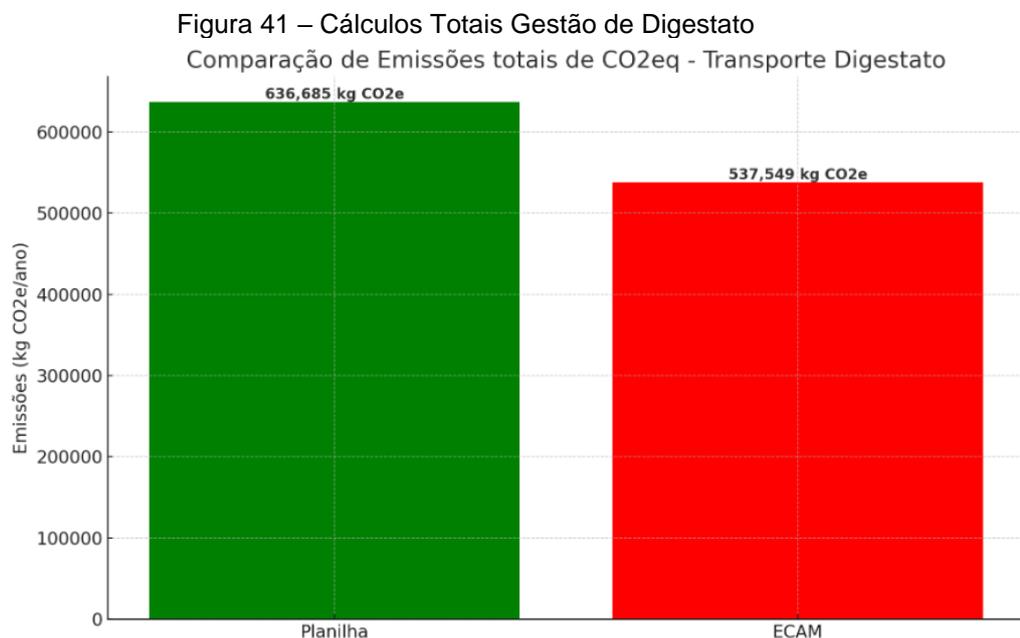
Para os cálculos realizados a partir da planilha de cálculo de forma manual o valor encontrado foi de 536.684,650 kg CO_{2eq}/ano, sendo que a maior emissão também é do CH₄, com o mesmo valor, é possível visualizar os resultados através da Figura 40.



Ambos os cálculos foram realizados de maneira similar. A diferença entre os valores obtidos deve-se ao fato de que o cálculo manual utilizando a planilha empregou os valores do GWP dos gases CH₄ e N₂O conforme o AR6.

Para o ECAM, foram utilizados os valores do GWP do AR5, pois atualmente, como mencionado anteriormente não existe a opção dentro do *ECAM* para configurar os cálculos para o AR6.

O AR6 oferece dados e metodologias mais recentes em comparação com o AR5, resultando em estimativas mais precisas e atualizadas dos impactos dos gases de efeito estufa. Na Figura 41. é possível visualizar ambos os resultados.



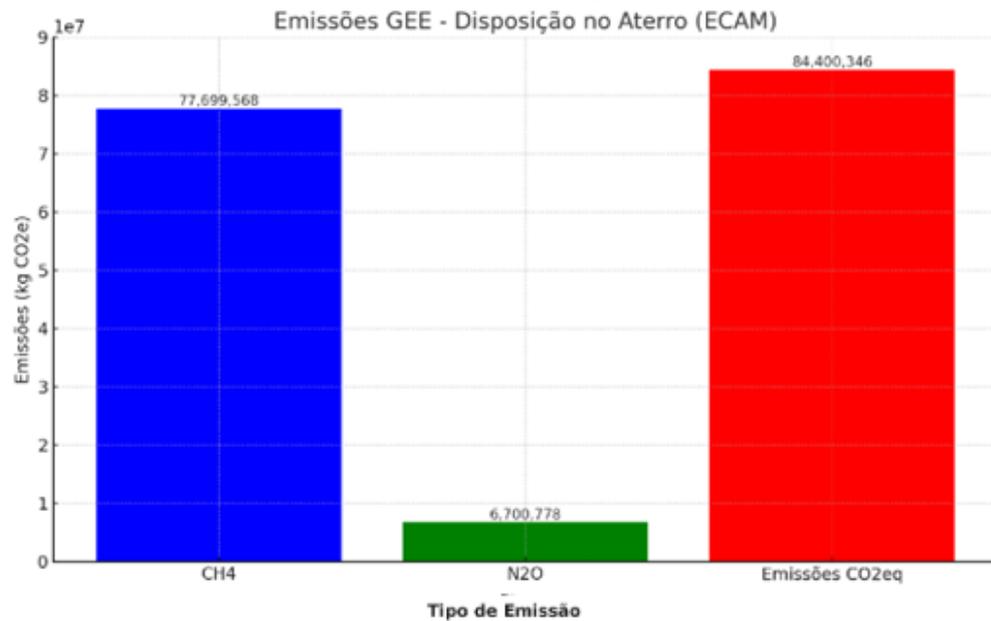
Fonte: Autora (2024)

5.4.2 Emissões Geradas – Disposição no Aterro

Também foram calculadas as emissões para a disposição no aterro sanitário localizado no município de Palmeiras.

Conforme apresentado na Figura 42, o cálculo realizado no software ECAM indica que a emissão total seria de 84.400 kg de CO₂eq/ano, com a maior contribuição proveniente do CH₄, seguida pelas emissões de N₂O, que somam 6.701 kg CO₂eq/ano. Na figura Figura 42 é possível visualizar as emissões totais relacionados na disposição do digestato no aterro.

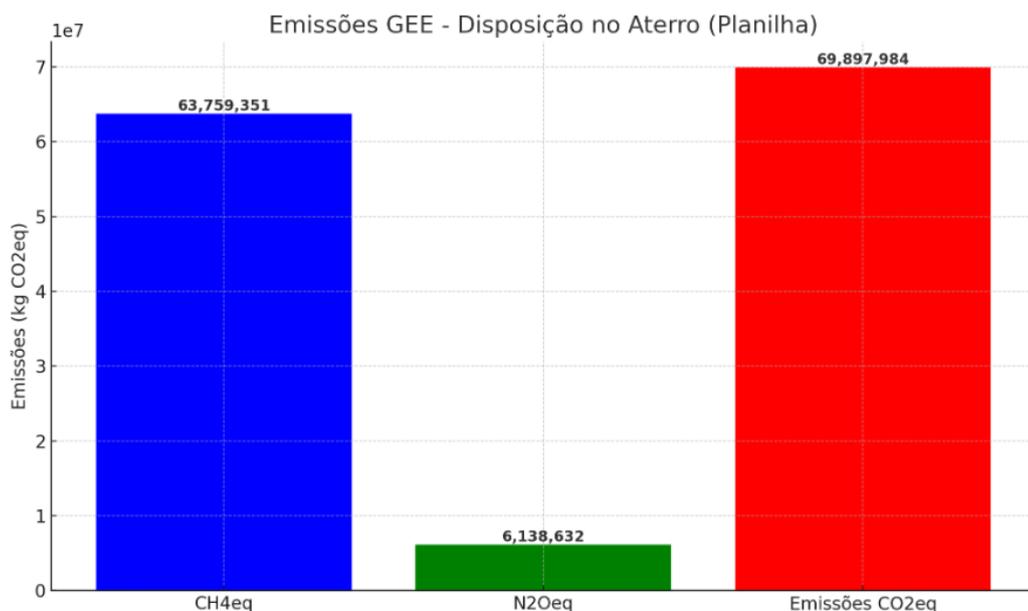
Figura 42 – Emissões totais da disposição do digestato no aterro- ECAM



Fonte: Autora (2024)

Já pela planilha, as emissões de CH₄ somam 2.285,281 kg CO₂eq/ano, enquanto as emissões de N₂O são de 22.486 kg CO₂eq/ano. A soma das emissões resulta em um total de 69.897,984 kg CO₂eq/ano. Esses resultados indicam que a maior parte das emissões totais provém de CH₄, seguido por uma contribuição menor de N₂O.

Figura 43 – Emissões totais da disposição do digestato no aterro- Planilha



Fonte: Autora (2024)

A diferença entre o valor calculado pela planilha e o obtido pela ferramenta ECAM deve-se aos diferentes valores de GWP, utilizados para os gases C₄H e N₂O, conforme versões distintas do Relatório de Avaliação.

A ferramenta ECAM utiliza os valores do AR5, com GWP de 34 para C₄H e 298 para N₂O. Em contrapartida, a planilha utiliza os valores do AR6, com GWP de 27,9 para C₄H e 273 para N₂O.

5.5 EMISSÕES TOTAIS GERADAS - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

No Quadro 8 abaixo são apresentados os valores obtidos pelos dois métodos empregados neste estudo, ferramenta ECAM (IPCC AR5) e Planilha Excel (IPCC, SIRENE, AR6).

Quadro 8 – Emissões Totais Geradas Na Usina

Emissões Geradas (Escopo da Usina)	ECAM (kgCO₂eq/ano)	Planilha (kgCO₂eq/ano)
Eletricidade – Indireta	25.069	2.550
Codigestão	2.979.710	2.451.781
Transporte de Lodo	537.550	536.685
Total	3.542.329	2.991.016
Emissões Geradas (Fora do Escopo da Usina)	84.937.896	70.434.668
Total Transporte de lodo +Decomposição no Aterro	85,475,446	70,971,353

Fonte: Autora (2024)

A comparação entre os valores de emissões geradas pelo ECAM e pela planilha revelam diferenças consideráveis em duas categorias, especificamente no consumo de eletricidade (Emissões indireta) e na codigestão.

Como mencionado anteriormente, o ECAM não possui uma aba para atualização dos valores do GWP para o AR6, o que limita esses valores a versões antigas. A planilha, que utiliza valores atualizados do AR6, apresenta uma abordagem mais precisa para a avaliação das emissões.

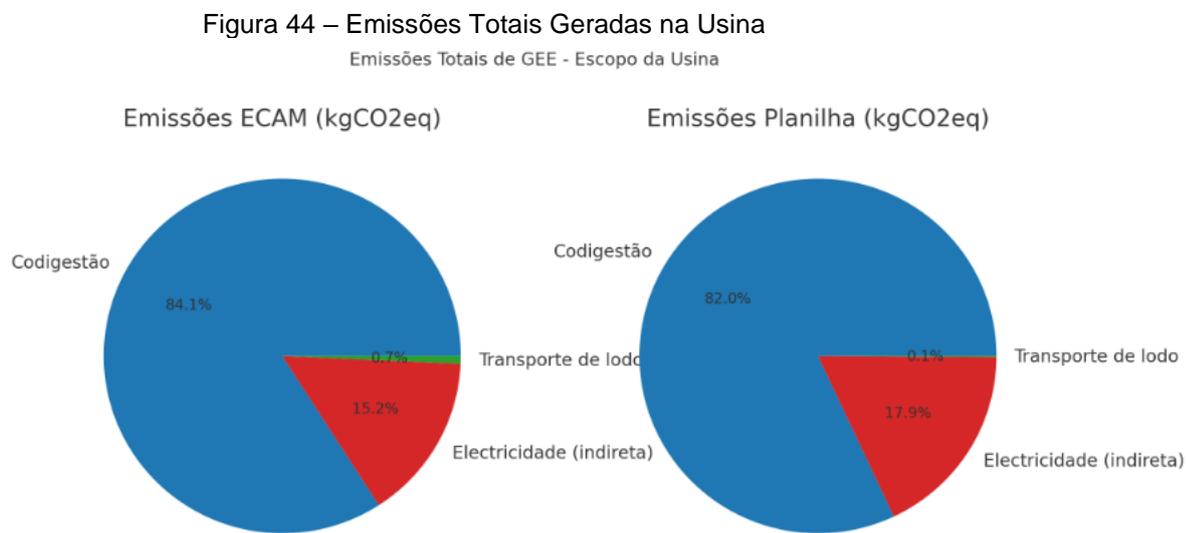
Além da diferença mencionada acima, houve uma variação de 17,7% nos valores devido ao software atualmente não ser projetado para calcular emissões de usinas que utilizam a codigestão de maneira geral e de vários substratos.

Isso torna o cálculo dentro do ECAM um pouco diferente do que na planilha manual. Por não possuir abas para customização dos valores de cada substrato e suas individualidades, o software acaba limitando-se a cálculos dentro do seu escopo. Com relação aos resultados a respeito da decomposição do lodo no aterro sanitário,

destaca-se que estes estão fora do escopo da usina, pois a empresa responsável pela usina não seria responsável de forma direta por ela.

A inclusão desses valores no presente estudo está associada à importância que esses cálculos podem ter para avaliações mais globais. Por exemplo, pode-se utilizar esses dados para solicitar fundos para modificar a destinação do lodo a uma entidade internacional ou nacional que considere as emissões como um todo em um projeto.

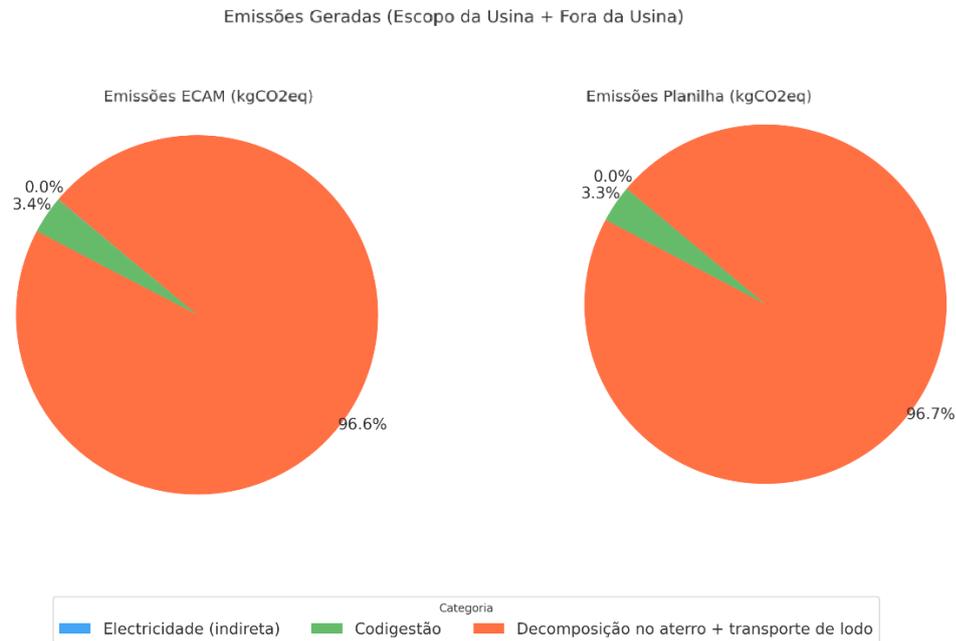
É possível verificar as emissões relacionadas ao escopo da usina de forma geral na Figura 44.



Fonte: Autora (2024)

Comparando com um cenário onde a decomposição no aterro, combinada com o transporte de lodo, é considerada no escopo da planta, essas atividades se destacam como a maior fonte de GEE. Juntas, elas representam 96.6% e 96.7% das emissões totais calculadas pela ferramenta ECAM e pela planilha, respectivamente (Figura 45).

Figura 45 – Emissões Totais Geradas (Escopo + Fora Escopo Usina)



Fonte: Autora (2024)

6 CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo avaliar e quantificar os principais gases de efeito estufa (GEE) em uma usina de digestão anaeróbica, utilizando a co-digestão de lodo de estação de tratamento de esgoto (ETE) com resíduos orgânicos urbanos e industriais, por meio da ferramenta ECAM.

Além disso, foi realizada uma avaliação desta ferramenta para a estimativa de emissões em projetos de codigestão, visando identificar ajustes necessários para cálculos dessa natureza. A partir das visitas realizadas e dos cálculos posteriores no software ECAM, foram obtidas as seguintes conclusões:

Referente ao objetivo 1: A partir de uma análise do escopo da planta de codigestão e analisando os principais focos de emissões pode concluir-se que:

- As principais fontes primárias de emissões de GEE são relacionadas a: As perdas de biogás durante o processo dentro da usina, a energia elétrica de consumo (de forma indireta), e ao transporte de lodo para o aterro sanitário.
- Fora do escopo do projeto da usina, as emissões do digestato no aterro sanitário também são significativas.

Referente ao objetivo 2: Após a realização de todos os cálculos na ferramenta *ECAM* concluiu-se que:

- As emissões totais geradas pela usina, conforme calculado pelo *ECAM*, somam 3.542.329 kgCO_{2eq}.
- A integração de resíduos orgânicos urbanos e industriais na digestão anaeróbia contribuiu para um aumento significativo na produção de biogás
- Para o cálculo referente às emissões relacionadas a energia elétrica: As emissões indiretas de eletricidade foram calculadas no valor de 25.069 kgCO_{2eq}.
- Para o cálculo referente as emissões relacionadas a codigestão: A codigestão é a maior fonte de emissões, com um total de 2.979.710 kgCO_{2eq}.
- Para os cálculos referente as emissões relacionadas ao transporte de lodo: O transporte de lodo contribui com 537.550 kgCO_{2eq} para as emissões totais, sendo o maior gás do efeito estufa liberado é o CO₂.

Referente ao objetivo 3: Após a comparação com os resultados da planilha realizada de forma manual conclui-se que:

- As emissões indiretas de eletricidade mostram uma discrepância de 89,8%, com o *ECAM* apresentando valores significativamente mais altos (25.069 kgCO_{2eq}) em comparação com a planilha (2.550 kgCO_{2eq}). Esses valores distintos devem-se ao fato que os cálculos realizados na planilha de forma manual utilizou-se o fator de emissão de rede nacionalizado, dado oferecido pela SIRENE (0.0385 kgCO₂/kWh), já para os valores calculados na ferramenta, utilizou-se 0,3785 kgCO₂/kWh (fator de margem de operação da UNFCCC).
- A categoria de codigestão também apresentou uma diferença de 17,7%, com o *ECAM* gerando 2.979.710 kgCO_{2eq} em comparação com 2.451.781 kgCO_{2eq} na planilha. Essa variação é atribuída ao fato de o *ECAM* não ser projetado para calcular emissões de usinas que utilizam a codigestão de múltiplos substratos de maneira personalizada, além da falta de atualização GWP para o AR6 no *ECAM*.

- No transporte de lodo, as diferenças são mínimas, com uma variação de apenas 0,2%, indicando que ambas as metodologias são bastante alinhadas nessa categoria específica (537.550 kgCO_{2eq} pelo ECAM e 536.685 kgCO_{2eq} pela planilha),
- No total, as emissões calculadas pelo ECAM são 15,6% maiores do que as calculadas pela planilha, resultando em 3.542.329 kgCO_{2eq} versus 2.991.016 kgCO_{2eq}, respectivamente. Essa discrepância global destaca a importância da atualização de ferramentas e que com o crescente tecnologias novas na área do saneamento, que essas abas sejam personalizáveis para a quantificação precisa das emissões e que elas estejam alinhadas com a demanda do mercado.

Portanto, a análise realizada por este estudo evidencia a necessidade de atualização e customização dos *softwares* de cálculo de emissões para refletir as realidades e particularidades de cada operação.

As limitações do ECAM resultam em diferenças significativas nas estimativas de emissões, e a utilização de planilhas manuais atualizadas pode fornecer uma avaliação mais precisa e detalhada atualmente para esse tipo de cálculo, devido às limitações presentes no software e à ausência de abas para customização do mesmo para plantas de codigestão.

No entanto, o software ainda se mostra uma ferramenta eficaz, desde que sejam feitas as modificações necessárias. Por fim, nota-se a importância de estudos voltados para essa área, dado que o saneamento cada vez mais necessita de mais novas adaptações a tecnologias ligadas ao seu setor.

7 RECOMENDACOES

Tendo em vista as constatações efetuadas no presente estudo, sugerem-se algumas recomendações para trabalhos futuros:

- Sugere-se a realização de um novo estudo na Planta para calcular as emissões da Estação de Tratamento de Esgoto adjacente, responsável pelo encaminhamento do lodo para a Usina de Biogás, em dois cenários. Primeiramente, considerando a realidade atual: utilizando a usina de co-digestão do lodo primário e secundário; e posteriormente, explorando uma alternativa sem a utilização da usina de co-digestão para o encaminhamento do lodo primário e secundário.

- Para o software ECAM: Sugere-se repensar e criar uma nova sub-aba na área de tratamento do software para permitir a edição e configuração do software para diferentes substratos (codigestão). Seria interessante criar abas editáveis para acomodar as especificidades de diversos tipos de substratos utilizados na codigestão.
- Notou-se que grande parte dos valores diferentes entre os cálculos realizados pela planilha editável e o software, deveram-se a impossibilidade de edição dos valores de Potencial de Aquecimento Global (GWP), implementar a possibilidade de adição de valores mais atualizados do GWP. Essa atualização garantiria que o software utilize os dados mais recentes e precisos.
- Atualização da base de dados do "Fator de Emissão da Rede Elétrica" é necessária para garantir que esses dados sejam os mais nacionalizados possíveis. Apesar dessa aba já ser editável no software, como mencionado no manual, é fundamental que se adicione um valor relacionado ao UNFCCC. Isso frequentemente leva o usuário a inserir esse valor em vez de um mais adequado à sua realidade específica, portanto recomenda-se a alteração dessa instrução no manual.
- Tornar editáveis os padrões ou referências utilizadas para a comparação de eficiência operacional e energética no software. Isso permitiria aos usuários ajustarem e adaptar as métricas de acordo com as especificidades de suas operações, resultando em análises mais precisas e relevantes.

REFERÊNCIAS

APHA, AWWA, WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, 2012. Edição 22. Washington, USA

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 8 jan. 2007. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm. Acesso em: 15 mai.2024

Boulding, K. **The economics of the coming spaceship earth**. In Jarrett, H. (Ed.), *Environmental Quality in a Growing Economy: Essays from the Sixth RFF Forum*. Baltimore: John Hopkins University. 1966 Disponível em: http://arachnid.biosci.utexas.edu/courses/THOC/Readings/Boulding_SpaceShipEarth.pdf

BRINGHENTI, Jacqueline Rogéria et al. **Codisposição de lodos de tratamento de esgotos em aterros sanitários brasileiros: aspectos técnicos e critérios mínimos de aplicação**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 23, p. 891-899, 2018 Tradução. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1413-41522018124980>. Acesso em: 24 mar. 2024.

BÜCKER, F. MARDER, M. PEITER, M. R. LEHN, D. N. ESQUERDO, V. M. PINTO, L. A. A. KONRAD, O. Fish waste: An efficient alternative to biogas and methane production in an anaerobic monodigestion system, **Renewable Energy**, Volume 147, Part 1, 2020, Pages 798-805, ISSN 0960-1481, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.140>

CAÑOTE, S. J. B. **Caracterização da Biodigestão de Lodos UASB e de Lodos Ativados e ACV do Aproveitamento Energético do Biogás Resultante**. Itajubá: 2018.

CHERNICHARO, C. A. L. *Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias: reatores anaeróbios*. **Vol. 5**. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2008.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB. **BIOGÁS PESQUISAS E PROJETOS NO BRASIL**. São Paulo: 2016. Acesso em: 26 mai. 2024.

CSBIOENERGIA. **CSBIOENERGIA**. 2017. Duração: 4 min. Disponível em: <http://csbioenergia.com.br/portfolio/videos/>. Acesso em: 01 abr. 2024.

EDWIGES, T. Biodigestão Anaeróbia de resíduos vegetais provenientes de Central de Abastecimento. 2017. 78 f. **Tese (Doutorado)** - Curso de Engenharia Agrícola, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Campus Cascavel, Cascavel, 2017.

FIGUEIREDO, Natalie Jimenez Verdi de. **Utilização do biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica e iluminação a gás** – estudo de caso. 2007. Trabalho de Graduação (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2007.

GROSSER, A. Determination of methane potential of mixtures composed of sewage sludge, organic fraction of municipal waste and grease trap sludge using biochemical methane potential assays. A comparison of BMP tests and semi-continuous trial results, **Energy**, Volume 143, 2018, Pages 488-499, ISSN 0360-5442, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.010>.

GU, D. et al. **Status of Research on Greenhouse Gas Emissions from Wastewater Collection Systems**. Water (Switzerland) Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 1 jul. 2023. Acesso em 25 mai. 2024

HUTTON, G.; HALLER, L.; BARTRAM, J. Global cost-benefit analysis of water supply and sanitation interventions. **Journal of Water and Health**, v. 5, n. 4, p. 481–501, dez. 2007.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). **Climate Change 2023: Synthesis Report. 2023**. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf. Acesso em: 10 mai. 2024.

IPCC AR6 (Intergovernmental Panel on Climate Change). Summary for Policymakers. In: MASSON-DELMOTTE, V., P. ZHAI, A. PIRANI, S. L. CONNORS, C. PÉAN, S. BERGER, N. CAUD, Y. CHEN, L. GOLDFARB, M. I. GOMIS, M. HUANG, K. LEITZELL, E. LONNOY, J.B.R. MATTHEWS, T. K. MAYCOCK, T. WATERFIELD, O. YELEKÇI, R. YU ND B. ZHOU (Eds). **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2021, 41 pp.

IPCC. 2006 IPCC **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. In: EGGLESTON, H. S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. (Eds.). Japan: IGES, 2006.

IPCC. 2019 **Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. In: CALVO BUENDIA, E.; TANABE, K.; KRANJC, A.;

IPCC, 2019. **Switzerland** BAASANSUREN, J.; FUKUDA, M.; NGARIZE, S.; SAKO, A.; PYROZHENKO, Y.; SHERMANAU, P.; FEDERICI, S. (Eds.).

LOUREIRO, S.M.; ZVEIBIL, V.; e DUBEUX, C.B.S. (2015). Cenários do Setor de Resíduos. In: LA ROVERE, E. L. et al. – **Implicações Econômicas e Sociais de Cenários de Mitigação de Gases de Efeito Estufa no Brasil até 2030**: Projeto IES-Brasil, Forum Brasileiro de Mudanças Climáticas – FBMC. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2016.

OJEA, A. P. C. S. MARENDA, T. HERNANDEZ, O. A. D. AISSE, M. M. Avaliação preliminar do desempenho de biogás de um digestor anaeróbio a partir da co-digestão de lodo de ETE com resíduos orgânicos urbanos e industriais. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**, 32., 2023, Belo Horizonte. Artigo. Belo Horizonte: Abes, 2023. p. 1-10.

PEARCE, D. W.; TURNER, R. K. **Economics of natural resources and environment**. London: Harvester Wheasheaf, 1990.

PEREIRA, A. et al. Economia Circular no Setor da Água e Saneamento em Portugal: Situação Atual e Linhas de Atuação Futura. **APDA Associação Portuguesa de Distribuição e Drenagem de Águas**, p. 62–68, 2022.

RODRIGO DE SOUZA, F. ECONOMIA CIRCULAR NA INDÚSTRIA ELETROELETRÔNICA: O CASO DA EMPRESA ABC CIRCULAR ECONOMY IN THE ELECTRONICS INDUSTRY: THE CASE OF THE ABC COMPANY. **Revista Produção Online**, v. 23, n. 3, p. 1–22, 2023.

ROSENFELDT, S. et al. Avaliação do potencial da ferramenta Energy Performance and Carbon Emissions Assessment and Monitoring Tool para estimativas de emissões de gases de efeito estufa em arranjos típicos de tratamento de esgoto sanitário no Brasil. **Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 3, n. 3, p. 85–93, 2023.

SILVA E DAFNE FERNANDA ALVES et al. SITUAÇÃO DA ECONOMIA CIRCULAR A PARTIR DO NOVO MARCO LEGAL DO SANEAMENTO BÁSICO NO BRASIL. **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada**, v. 29, p. 59–67, 2023.

SILVA, F. C. **Uso Agrônomo de Lodo de Esgoto :Efeitos em Fertilidade de solo e qualidade da Cana de Açúcar**. Piracicaba: 1995 .

SILVA, B. E.; CABRAL, C.; ROSENFELDT, S.; VEIZAGA, A.; KERRES, M.; MOSKOPP, D. **ECAM Methodology Guide**. 2022

PROBIOGÁS: SILVEIRA, B. et al. **Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto**.. Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH – GIZ. Brasília. 2015.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. FY 2019 **Year-End Information Quality Report**. 2019. Disponível em: <https://www.epa.gov/quality/epa-information-quality-guidelines-requests-correction-and-requests-reconsideration>. Acesso em: 26 mai. 2024.

UNFCCC (2015) **Adoption of the Paris Agreement, 21st Conference of the Parties, Paris**: United Nations.

UNFCCC. (2022). List of harmonized GHG accounting standards/approaches and guidelines developed. **Unfccc**.int. Disponível em: <https://unfccc.int/climate-action/sectoral-engagement/ifisharmonization-of-standards-for-ghg-accounting/ifi-twg-list-of-methodologies>.

APÊNDICE A

Tabela 8 – Cálculos Realizados para Emissões do Transporte e disposição do Aterro

Transporte do Digestato		
Quantidade de digestato enviado ao aterro	23,848,610	kg/ano
Número de viagens	730	viagens/ano
Distância média por viagem	104	km
Consumo específico do caminhão	0.0026	m ³ /km
Tipo de combustível	Diesel	
Volume de combustível consumido	197.392	m ³ /ano
Emissões CH ₄	27.806	kg CH ₄ eq
Emissões N ₂ O	27.805	kg N ₂ Oeq
Emissões CO ₂	528,318.000	kg CO ₂ eq
Emissões CH ₄	945.400	kg CO ₂ eq
Emissões N ₂ O	8,286.000	kg CO ₂ eq
Emissões CO ₂	528,318.000	kg CO ₂ eq
Emissões totais CO₂ equivalente (ECAM)	537,549.400	kg CO₂eq
Emissões totais CO₂ equivalente (calculado com planilha)	536,684.650	kg CO₂eq
Disposição no aterro (calculado diferente do ECAM)		
Peso seco	23,848,610.00	kg/ano
SV/ST	0.51	kgBOD/kg dry mass sludge
Emissões CH ₄ - Planilha	2285281.412	kg CH ₄
Emissões N ₂ O - Planilha	22485.83221	kg N ₂ O
Emissões CO ₂ - Planilha	0	kg CO ₂
Emissões CH ₄	77,699,568.000	kg CO ₂ eq
Emissões N ₂ O	6,700,778.000	kg CO ₂ eq
Emissões CO ₂	-	kg CO ₂ eq
Emissões totais CO₂ equivalente (ECAM)	84,400,346.000	kg CO₂eq
Emissões totais CO₂ equivalente (calculado com planilha)	69,897,983.583	kg CO₂eq
Emissões totais com gestão de lodos (ECAM)	84,937,895.400	kg CO₂eq
Emissões totais com gestão de lodos (planilha)	70,434,668.233	kg CO₂eq

Fonte: Autora (2024)

APÊNDICE B

Tabela 9 – Consumo de Energia Elétrica

Consumo de energia elétrica		
Consumo	66,233	kWh/ano
Fator de emissão da rede - (fator de margem de operação da UNFCCC)	0,3785	kgCO ₂ /kWh
Fator de emissão da rede - SIRENE	0.0385	kgCO ₂ /kWh
Emissões de energia elétrica consumida da rede (planilha)	2,549.988	kgCO ₂ /ano
Emissões de energia elétrica consumida da rede (ECAM)	25,069.000	kgCO ₂ /ano

Fonte: Autora (2024)

APÊNDICE C

Tabela 10 – Cálculos Realizados para Emissões da Codigestão

Mês (2023)	Volume Biogás (Nm ³)	CH ₄ (%)	Relação Biogás (Nm ³) / Potência (MWh)	Volume Metano (m ³ /ano) - (Volume biogás (Nm ³) x CH ₄ (%))	Quantidade Metano (kg/ano) (monitoramento antes do motor)	Emissões atmosfera (kg metano)	Emissões atmosfera (kgCO _{2equivalente})
Janeiro	335,887	62.45%	393.73	209,772.47	150,118.22	17,700.97	10,984.94
Fevereiro	336,863	63.04%	417.02	212,373.99	151,979.92	17,752.38	11,634.75
Março	365,847	62.77%	404.97	229,628.19	164,327.44	19,279.84	11,298.56
Abril	298,982	63.87%	395.38	190,949.57	136,648.10	15,756.07	11,031.04
Mai	348,068	64.44%	384.71	224,284.83	160,503.60	18,342.88	10,733.35
Junho	333,293	62.89%	390.92	209,613.61	150,004.53	17,564.26	10,906.62
Julho	353,717	63.75%	385.93	225,494.48	161,369.26	18,640.57	10,767.42
Agosto	309,189	63.89%	373.66	197,531.92	141,358.59	16,294.00	10,425.03
Setembro	290,975	60.06%	395.33	174,764.71	125,065.82	15,334.16	11,029.70
Outubro	200,556	64.90%	419.59	130,150.96	93,139.15	10,569.11	11,706.47
Novembro	223,331	61.38%	412.71	137,069.48	98,090.21	11,769.36	11,514.60
Dezembro	314,960	59.9%	379.92	188,543.99	134,926.61	16,598.10	10,599.81
Total				2,330,178.20	1,667,531.44	195,601.70	132,632.28

Fonte: Autora (2024)