



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

GLAUCE LENE RUFINO CHAVES

**AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO
DE ESGOTO EM ÁREA TURÍSTICA NO LITORAL DO CEARÁ: ESTUDO DE
CASO ETE DE FLECHEIRAS**

Campina Grande - PB

2023

GLAUCE LENE RUFINO CHAVES

**AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO
DE ESGOTO EM ÁREA TURÍSTICA NO LITORAL DO CEARÁ: ESTUDO DE
CASO ETE DE FLECHEIRAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração:

Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

Orientadores:

Profª. Dra. Mônica de Amorim Coura

Prof. PhD. Rui de Oliveira

Campina Grande - PB

2023

C512a

Chaves, Glauce Lene Rufino.

Avaliação da sustentabilidade de uma estação de tratamento de esgoto em área turística no litoral do Ceará: estudo de caso ETE de Flecheiras / Glauce Lene Rufino Chaves. – Campina Grande, 2023.

114 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2023.

"Orientação: Profa. Dra. Mônica de Amorim Coura, Prof. Dr. Rui de Oliveira".

Referências.

1. Tratamento de Esgoto – Impactos Ambientais. 2. Recursos Hídricos. 3. Saneamento Ambiental. 4. Gestão Sustentável. 5. Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) – Avaliação do Ciclo de Vida. I. Coura, Mônica de Amorim. II. Oliveira, Rui de. III. Título.

CDU 628.32(043)

GLAUCE LENE RUFINO CHAVES

**AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO
DE ESGOTO EM ÁREA TURÍSTICA NO LITORAL DO CEARÁ: ESTUDO DE
CASO ETE DE FLECHEIRAS**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE
CAMPINA GRANDE, COMO REQUISITO À OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE
EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.

Aprovada em: 21/11/2023

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Mônica de Amorim Coura
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)
Orientadora

Prof. PhD. Rui de Oliveira
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)
Orientador

Profa. Dra. Ruth Silveira do Nascimento
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)
Examinadora Externa

Prof. Dr. Juscelino Alves Henriques
Instituto Federal de Pernambuco (IFPE)
Examinador Externo

Campina Grande - PB

2023



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO ENGENHARIA CIVIL AMBIENTAL
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. **ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**
2. **ALUNO(A): GLAUCE LENE RUFINO CHAVES / COMISSÃO EXAMINADORA: DR.^a MÔNICA DE AMORIM COURA - PPGECA/UFCG (PRESIDENTE) - ORIENTADORA, DR. RUI DE OLIVEIRA – UEPB – COORIENTADOR, DR. JUSCELINO ALVES HENRIQUES – IFPE/PE – EXAMINADOR EXTERNO, DR.^a RUTH SILVEIRA DO NASCIMENTO – UEPB – EXAMINADORA EXTERNA (PORTARIA 44/2023). / TITULO DA DISSERTAÇÃO: “DESEMPENHO DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO EM ÁREA TURÍSTICA NO LITORAL DO CEARÁ: ESTUDO DE CASO ETE DE FLECHEIRAS” / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL / HORA DE INICIO: 09:30 HORAS / DE FORMA PRESENCIAL, NO LABORATÓRIO DE HIDRÁULICA I, BLOCO CR, CAMPUS SEDE DA UFCG, EM CAMPINA GRANDE.**
3. **EM SESSÃO REALIZADA DE FORMA PRESENCIAL, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O(A) CANDIDATO(A) FOI ARGUIDO(A) ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA DISSERTAÇÃO, SENDO-LHE ATRIBUÍDA O CONCEITO “EM EXIGÊNCIA”, SENDO QUE A POSSIBILIDADE DE APROVAÇÃO ESTÁ CONDICIONADA À AVALIAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO TRABALHO FINAL, SEGUINDO PROCEDIMENTOS PREVISTOS NA RESOLUÇÃO DO PROGRAMA. O PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA, OUVIDOS OS DEMAIS MEMBROS, DEVERÁ FICAR RESPONSÁVEL POR ATESTAR QUE AS CORREÇÕES SOLICITADAS NA LISTA DE EXIGÊNCIAS FORAM ATENDIDAS NA VERSÃO FINAL DO TRABALHO. A COMISSÃO EXAMINADORA CUMPRINDO OS PRAZOS REGIMENTAIS, ESTABELECE UM PRAZO MÁXIMO DE 30 DIAS PARA QUE SEJAM FEITAS AS ALTERAÇÕES EXIGIDAS. APÓS O DEPÓSITO FINAL DO DOCUMENTO DE DISSERTAÇÃO, DEVIDAMENTE REVISADO E MEDIANTE ATESTADO DO ORIENTADOR, O CONCEITO “EM EXIGÊNCIA” PASSARÁ IMEDIATAMENTE PARA O DE “APROVADO”. NA FORMA REGULAMENTAR, FOI LAVRADA A PRESENTE ATA, QUE É ASSINADA POR MIM, FLÁVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO, ALUNA E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.**
4. **CAMPINA GRANDE, 21 DE NOVEMBRO DE 2023.**
- 5.



Documento assinado eletronicamente por **Glauce Lene Rufino Chaves, Usuário Externo**, em 22/11/2023, às 08:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **MONICA DE AMORIM COURA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 22/11/2023, às 12:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Juscelino Alves Henriques, Usuário Externo**, em 22/11/2023, às 14:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **RUTH SILVEIRA DO NASCIMENTO, Usuário Externo**, em 23/11/2023, às 10:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **FLAVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO (A)**, em 23/11/2023, às 11:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rui de Oliveira, Usuário Externo**, em 24/11/2023, às 15:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **3930198** e o código CRC **98A618CE**.

Dedico aos meus pais, ao meu marido e a todos aqueles que seguiram, estão seguindo ou irão seguir, os por vezes difíceis, porém gratificantes e enriquecedores caminhos da ciência.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por sustentar-me nesta jornada, permitindo-me vivenciar a experiência do mestrado e concedendo-me resiliência para concluir este trabalho.

À minha família, em especial aos meus pais, quero expressar minha gratidão. Eles proporcionaram todo o suporte que estava ao alcance deles, sobretudo, minha mãe, que foi a ouvinte das minhas alegrias e tristezas. Seu amor e apoio foram fundamentais.

Meu marido merece uma gratidão especial, pois seu companheirismo, cuidado, apoio e incentivo foram constantes ao longo desta jornada. Ele se tornou meu porto seguro e terapeuta em tempo integral. Amo sua vida, meu amor.

Aos meus orientadores, Profa. Dra. Mônica Amorim Coura e Prof. Dr. Rui de Oliveira, devo uma enorme dívida de gratidão. Por todo o direcionamento, paciência, conhecimentos transmitidos e suporte para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos meus colegas de mestrado, quero agradecer por todos os momentos de amizade que compartilhamos. Em especial, gostaria de mencionar Lidiane Marinho Teixeira, minha amiga que levarei para vida, gratidão por toda a partilha que tivemos nesse percurso.

À Profa. Dra. Giselaine Maria Gomes de Medeiros, minha sincera gratidão por sua disponibilidade e assistência em me ensinar sobre Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

À banca avaliadora, Profa. Dra. Ruth Silveira do Nascimento e Prof. Dr. Juscelino Alves Henriques, pela gentil aceitação do convite e pelas valiosas contribuições que proporcionaram o aprimoramento desta pesquisa.

À Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE), expresse minha gratidão por prontamente fornecerem os dados fundamentais para a realização do trabalho.

Ao CNPq, agradeço pelo apoio financeiro.

Por fim, quero expressar minha gratidão a todos que, ofereceram seu apoio e contribuíram para o meu desenvolvimento acadêmico e pessoal.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”
(Arthur Schopenhauer)

RESUMO

A descarga de poluentes nos corpos d'água constitui uma questão ambiental importante, tendo em vista que pode resultar em diversos impactos negativos e comprometer o desenvolvimento sustentável da sociedade. Os sistemas de tratamento de esgoto executam um papel fundamental na mitigação dos impactos negativos provocados pela urbanização, industrialização e aumento da população sobre o meio ambiente. No entanto, as Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), embora busquem mitigar esses impactos, geram subprodutos que influenciam a sustentabilidade. Este estudo analisou uma ETE que combina reator UASB, seguido de filtro submerso aerado, decantador lamelar, etapa de desinfecção e tratamento avançado, localizada no distrito turístico de Flecheiras, município do Trairi, litoral do Ceará. O objetivo deste estudo foi avaliar a sustentabilidade da ETE. A metodologia compreendeu a análise da eficiência operacional da ETE com base nos indicadores de qualidade físico-químicos e microbiológicos; a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), para avaliar os potenciais impactos ambientais, sociais e econômicos em diferentes cenários propostos, utilizando o banco de dados Ecoinvent[®] no *software* OpenLCA; e propostas de melhorias destinadas a contribuir para a formulação de um plano de gestão sustentável para a ETE. Os resultados apontaram que a configuração do sistema é eficaz para regiões turísticas de clima quente, atendendo aos padrões de lançamento, em que pese as características médias do efluente tratado 6 mg/l de SST, 78 mg/l de DQO e pH 7,7. A ACV, mostrou na dimensão ambiental as mudanças climáticas, como a categoria de impacto mais relevante. Na dimensão social, os impactos gerados interferem na saúde humana e na qualidade dos ecossistemas. Na dimensão econômica, os custos externos decorrentes dos impactos ambientais mostraram-se significativos em termos monetários. Essas informações permitem que os gestores tomem decisões orientadas para a sustentabilidade do sistema.

Palavras-chave: Tratamento de esgoto; Gestão sustentável; Avaliação do ciclo de vida; Impactos ambientais.

ABSTRACT

The discharge of pollutants into water bodies constitutes a significant environmental issue, given that it can result in various negative impacts and compromise the sustainable development of society. Sewage treatment systems play a crucial role in mitigating the negative impacts caused by urbanization, industrialization, and population growth on the environment. However, wastewater treatment plants (WWTP), while aiming to mitigate these impacts, generate by-products that influence sustainability. This study examined an WWTP that combines a UASB reactor, followed by an aerated submerged filter, lamellar settler, disinfection stage, and advanced treatment, located in the tourist district of Flecheiras, Trairi municipality, on the coast of Ceará, Brazil. The objective of this study was to assess the sustainability of the WWTP. The methodology comprised an analysis of the operational efficiency of the WWTP based on physicochemical and microbiological quality indicators. Additionally, Life Cycle Assessment (LCA) was conducted to evaluate potential environmental, social, and economic impacts under different proposed scenarios, using the Ecoinvent[®] database in the OpenLCA software. Proposed improvements were also suggested to contribute to the formulation of a sustainable management plan for the WWTP. The results indicated that the system configuration is effective for tourist regions with a hot climate, meeting discharge standards, despite the average characteristics of the treated effluent (6 mg/l of TSS, 78 mg/l of COD, and pH 7.7). The LCA revealed that, in the environmental dimension, climate change is the most relevant impact category. In the social dimension, the generated impacts interfere with human health and the quality of ecosystems. In the economic dimension, external costs resulting from environmental impacts proved to be significant in monetary terms. This information enables managers to make decisions oriented towards the sustainability of the system.

Keywords: Sewage treatment; sustainable management; life cycle assessment; environmental impacts.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Visão geral do quadro de Avaliação do Ciclo de Vida.....	30
Figura 2 - Relação entre os indicadores de Midpoint e Endpoint.....	36
Figura 3 - Fluxograma de atividades da pesquisa.....	37
Figura 4 - Localização da área de estudo.	40
Figura 5 - Estação de tratamento de esgoto de Flecheiras/CE.	41
Figura 6 - Fluxograma do sistema de tratamento.	42
Figura 7 - Área da Estação de Tratamento de Esgoto.....	43
Figura 8 - Fluxograma da fronteira do sistema.....	46
Figura 9 - Box Plot da concentração de DQO no esgoto antes e após o tratamento.	59
Figura 10 - Dispersão da concentração de DBO no esgoto tratado.....	60
Figura 11 - Box Plot da variável pH no esgoto antes e após o tratamento.	61
Figura 12 - Comportamento do sulfeto total no esgoto antes e após o tratamento.	62
Figura 13 - Comportamento do SST no esgoto antes e após o tratamento.....	64
Figura 14 - Comportamento do SSed no esgoto antes e após o tratamento.	65
Figura 15 - Box Plot das variáveis coliformes totais e E. coli do esgoto bruto.....	66
Figura 16 - Box Plot das variáveis coliformes totais e E. coli do esgoto tratado.....	67
Figura 17 - Potenciais impactos ambientais da ETE Flecheiras no cenário atual.	71
Figura 18 - Análise dos impactos ambientais nos cenários 2 e 3 alusivos aos anos futuros.	74
Figura 19 - Potenciais impactos ambientais do efluente tratado nos cenários propostos..	75
Figura 20 - Disposição das categorias de impactos nas áreas de proteção.....	76
Figura 21 - Pontuação dos impactos do esgoto nos cenários propostos.....	78
Figura 22 - Custos externos referentes ao afluente bruto.	83
Figura 23 - Custos externos referentes ao efluente tratado.	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Unidades de tratamento, tempo de implantação e dimensões.	44
Tabela 2 - Parâmetros estatísticos descritivos das variáveis do afluente bruto.	57
Tabela 3 - Parâmetros estatísticos descritivos das variáveis do efluente tratado.....	58
Tabela 4 - Concentrações típicas de sólidos no esgoto bruto.	64
Tabela 5 - Inventário para a Avaliação do Ciclo de Vida da ETE.	69
Tabela 6 - Potenciais impactos ambientais do esgoto no cenário 1.....	70
Tabela 7 - Potenciais impactos nos cenários 2 e 3 alusivos aos anos futuros.....	73
Tabela 8 - Preços ambientais estimados por impacto ambiental.	81
Tabela 9 - Carga total estimada de lodo retirada do sistema (UASB+FSA).	89
Tabela 10 - Estimativa da produção de biogás pelo programa ProBio.....	91

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Revisão dos artigos da aplicação de ACV no tratamento de esgotos.....	33
Quadro 2 - Parâmetros utilizados no dimensionamento da ETE.....	38
Quadro 3 - Indicadores analisados e seus respectivos métodos analíticos.....	39
Quadro 4 - ICV do sistema de tratamento estudado.....	48
Quadro 5 - Condições e padrões para reúso de efluente.	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACV - Avaliação do Ciclo de Vida

AICV - Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida

CAGECE - Companhia de Água e Esgoto do Ceará

COEMA - Conselho Estadual do Meio Ambiente

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

ETE - Estação de Tratamento de Esgoto

GEE - Gases de Efeito Estufa

GWP - Potencial de Aquecimento Global

ICV - Inventário do Ciclo de Vida

IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*

IPECE - Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará

ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

OMS - Organização Mundial da Saúde

ONU - Organização das Nações Unidas

OpenLCA - *Open Source Life Cycle Assessment*

TDH - Tempo de Detenção Hidráulica

UASB - *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*

UF - Unidade Funcional

UNESCO - Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura

Sumário

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA	17
1.1.1 Objetivo Geral	17
1.1.2 Objetivos Específicos.....	17
2. REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1 Tratamento de esgoto e Sustentabilidade	18
2.2 Dimensões e indicadores da sustentabilidade em ETEs	20
2.2.1 Dimensão Ambiental	20
2.2.2 Dimensão Econômica	25
2.2.3 Dimensão Social	26
2.3 Saneamento ambiental em áreas turísticas	28
2.4 Avaliação do Ciclo de Vida	29
2.4.1 ACV aplicada ao tratamento de esgotos.....	33
2.4.2 Método ReCiPe	35
3. MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1 Apropriação do objeto de estudo	37
3.2 Descrição da área de estudo	39
3.2.1 Estação de tratamento de esgoto de Flecheiras	41
3.3 Análise estatística dos dados	44
3.4 Avaliação do ciclo de vida na ETE Flecheiras	45
3.4.1 Definição de objetivo e escopo.....	45
3.4.2 Inventário do ciclo de vida	46
3.4.3 Avaliação de impacto do ciclo de vida.....	48
3.5 Propostas de melhorias para plano de gestão sustentável	52
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1 Dados de qualidade do objeto de estudo	57
4.1.1 Estatística descritiva das variáveis de qualidade da ETE Flecheiras.....	57
4.2 Avaliação do ciclo de vida do sistema de tratamento da ETE Flecheiras	69
4.2.1 Inventário do ciclo de vida da ETE Flecheiras.....	69
4.2.2 ACV da dimensão ambiental da ETE Flecheiras.....	70
4.2.3 ACV na dimensão social da ETE Flecheiras.....	75
4.2.4 ACV na dimensão econômica da ETE Flecheiras.....	79

4.3 Propostas de melhorias para gestão sustentável da ETE Flecheiras	84
4.3.1 Potencial de recuperação de recursos na ETE Flecheiras.....	86
5. CONCLUSÕES	92
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e a melhoria nos padrões de vida têm contribuído significativamente para o aumento da produção de esgoto. Quando combinados com a falta de saneamento básico, as descargas desses poluentes nos corpos hídricos impactam adversamente o desenvolvimento sustentável da sociedade moderna (Kamble *et al.*, 2019; Turková; Korytárová, 2019; Faragò *et al.*, 2021; Kollmann *et al.*, 2023). Essa problemática destaca a importância das discussões sobre saneamento básico, que engloba questões de saúde pública, proteção ambiental, preservação dos recursos hídricos e promoção de um desenvolvimento socioeconômico sustentável, conforme a Lei nº 14.026 de 2020.

No Brasil, o saneamento evoluiu para um direito fundamental, em consonância com as disposições da Lei Federal de Saneamento Básico, Lei nº 11.445/2007 (atualizada pela Lei nº 14.026/2020). Entretanto, foi somente em 2010 que ocorreu o marco significativo no âmbito internacional. Esse marco foi estabelecido durante a Assembleia Geral das Nações Unidas (ONU), por meio da Resolução nº 64/292, na qual o direito humano à água potável e ao esgotamento sanitário foi oficialmente reconhecido.

Contudo, a falta de saneamento continua a contribuir para prevalência de doenças em escala global. Estima-se que metade da população mundial não tem acesso suficiente a esses serviços. De acordo com o mais recente relatório da Organização Mundial de Saúde (OMS, 2023), a expansão dessas infraestruturas poderia ter evitado pelo menos 1,4 milhão de mortes e 74 milhões de anos de vida ajustados por incapacidade em 2019.

Dessa forma, a fragilidade das políticas públicas e a insuficiência dos serviços de saneamento causa a má qualidade dos recursos hídricos, resultando em efeitos adversos que enfraquecem os centros produtivos e afetam diretamente a qualidade de vida das pessoas (Cartaxo *et al.*, 2020). Além disso, a gestão inadequada desses recursos também contribui para a falta de sustentabilidade ambiental.

Chueiri e Fortunato (2021), destacam que, para além do impacto na qualidade da água, o despejo de efluentes não tratados também compromete o equilíbrio ambiental e representa uma ameaça aos organismos aquáticos. Regularmente, a qualidade das águas costeiras tem sofrido um intenso processo de degradação pelo lançamento de efluentes, que escoam para as praias sem qualquer tratamento prévio, seja em lançamentos diretos ou pelas redes de drenagem pluviais poluídas.

Nessa conjuntura, a coleta e o tratamento adequado dos efluentes são imprescindíveis para incentivar a saúde e manutenção de recursos naturais (SNIS, 2021),

assim como, de acordo com Gallego-Schmid e Tarpani (2019) esforços significativos na construção e operação das estações de tratamento de esgoto (ETEs) em países subdesenvolvidos são essenciais para alcançar até 2030 o objetivo de desenvolvimento sustentável 6 “Água potável e saneamento” da ONU.

Diante desse cenário, é importante ressaltar que, apesar dos inúmeros benefícios reconhecidos, as ETEs geram impactos que, independentemente de serem positivos ou negativos, influenciam a sustentabilidade em níveis locais e globais. Esses impactos, exibidos durante a construção, operação ou desativação, merecem uma consideração adequada para alinhar-se aos objetivos socioeconômicos da sociedade. Assim, é fundamental analisar melhorias nas ETEs na perspectiva do ciclo de vida para maximizar os benefícios ambientais e minimizar os impactos indesejados.

Nesse contexto, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) emerge como uma ferramenta de gestão ambiental, abordando aspectos ambientais de forma abrangente e permitindo uma avaliação holística dos impactos potenciais associados a um sistema de tratamento de esgoto, colaborando com os responsáveis pela tomada de decisão para avaliar devidamente os benefícios e impactos nos âmbitos ambiental, social e econômico.

Deste modo, este estudo está centrado na temática do esgotamento sanitário, e aborda o desempenho em sustentabilidade sobre o tratamento de efluentes, com o objetivo de contribuir para a gestão sustentável da estação de efluentes localizada em Flecheiras/CE.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.1.1. Objetivo Geral

Avaliar a sustentabilidade da estação de tratamento de esgoto do distrito turístico de Flecheiras, município do Trairi, litoral do Ceará.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o desempenho operacional da ETE com base em indicadores de qualidade físico-químicos e microbiológicos;
- Analisar os impactos ambientais, econômicos e sociais da ETE;
- Propor melhorias para a elaboração de plano de gestão sustentável da ETE.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Tratamento de esgoto e Sustentabilidade

O processo de tratamento de esgoto desempenha um papel importante no âmbito do saneamento básico, destacando-se a redução dos resíduos como a principal contribuição para a gestão sustentável (Silva, 2023). Todavia, é importante reconhecer que esse processo de tratamento requer insumos para operar e geram resíduos durante seu funcionamento, o que pode resultar em impactos ambientais significativos e prejudicar as comunidades. Dessa forma, o descarte adequado e sustentável dos efluentes domésticos, agrícolas e industriais tem sido uma das principais dificuldades enfrentadas pela sociedade (Lizot *et al.*, 2021; Mu *et al.*, 2023).

De acordo com Silva (2023), a sustentabilidade consiste em assegurar que os recursos naturais estejam sempre disponíveis para suprir as necessidades das gerações presentes e futuras. Assim, as ETEs estão sendo estudadas globalmente com o objetivo de identificar abordagens mais sustentáveis para gerenciá-las (Mannina *et al.*, 2019).

No entanto, projetar o arranjo ideal para sistemas de tratamento de esgoto tornou-se uma tarefa complexa, principalmente devido à ampla gama de tecnologias acessíveis e a presença de características específicas em cada situação (Goffi *et al.*, 2018). A pesquisa de Singh e Kansal (2018) destacou que a escolha da infraestrutura adequada, entre sistemas centralizados e descentralizados, depende dos objetivos almejados. Se o objetivo principal é reduzir a poluição, os sistemas centralizados oferecem maior eficiência energética. Todavia, se a infraestrutura busca promover a reciclagem e a reutilização local, os sistemas descentralizados se mostram mais eficientes do ponto de vista energético.

Dessa forma, para analisar os aspectos sustentáveis de uma ETE, é fundamental identificar oportunidades de melhoria e priorizar ações. Conforme apontado por Garrido-Baserba *et al.*, (2014) as ETEs devem atingir no mínimo três objetivos centrais: proteção ambiental, obter aceitação social e promover desenvolvimento econômico. Isso se traduz na necessidade de tratar uma quantidade considerável de esgoto de maneira eficaz, minimizando os custos associados ao processo e reduzindo os impactos ambientais, resultando em um tratamento que seja tanto ambientalmente eficiente quanto acessível economicamente, enquanto também seja aceito socialmente. Além de ser seguro para os trabalhadores e a comunidade (Amaral; Aisse; Possetti, 2019; Mannina *et al.*, 2019).

Para Metcalf e Eddy (2016), a sustentabilidade em sistemas de tratamento de esgoto abrange uma série de aspectos relevantes, como o equilíbrio energético global, as emissões de gases de efeito estufa decorrentes do processo de tratamento, o uso de produtos químicos e sua pegada de carbono associada, bem como o destino dos constituintes presentes no efluente e os subprodutos gerados durante o processo. Além disso, os autores Campos e Nolasco (2021) ressaltam que o conceito de uma ETE sustentável engloba a prática de recuperar e reutilizar seus subprodutos, conferindo-lhes um valor de mercado significativo.

Em várias regiões do mundo, há um reconhecimento consolidado da necessidade de transitar de uma perspectiva convencional, centrada na funcionalidade, para uma abordagem holística voltada para a circularidade. O objetivo principal da gestão circular é ampliar a contribuição sustentável das ETEs para a sociedade (Shanmugam *et al.*, 2022).

Estudos anteriores apontam que as ETEs têm um papel basilar na promoção da economia circular. Isso ocorre devido à capacidade dessas estações de gerar diversos subprodutos de alto valor, incluindo efluentes tratados, energia, fertilizantes, nutrientes e lodo (Meena *et al.*, 2019; Ashraf; Ramamurthy; Rene, 2021; Shanmugam *et al.*, 2022). Devido a esses notáveis benefícios, a economia circular tem se tornado uma prioridade para as concessionárias responsáveis pelo tratamento de águas residuais, visto que, pode ser considerada uma abordagem adequada para alcançar a neutralidade em termos de recursos, energia e emissões de CO₂ (Fragò *et al.*, 2021).

Assim, o propósito de uma economia circular é prolongar ao máximo a circulação de materiais e produtos, otimizando processos e aumentando a durabilidade (Hernández-Chover *et al.*, 2023). Ao incorporar os princípios propostos pela economia circular, torna-se viável adotar uma abordagem renovada para a valorização dos subprodutos originados em uma ETE, isso implica que o planejamento das ETEs desafia a visão anterior de que os empreendimentos de saneamento eram investimentos de alto custo sem perspectiva de retorno, estabelecendo uma nova base para a concepção e operação dessas instalações (Anderson; Otoo; Nolasco, 2018).

Apesar disso, a adoção de uma economia circular representa um processo extenso e complexo devido à presença de obstáculos técnicos, econômicos, sociais e regulatórios (Mannina *et al.*, 2021). De maneira que, os autores Bressani-Ribeiro *et al.*, (2019), concluíram que existem alguns desafios importantes para a implementação da recuperação de recursos em estações de tratamento de esgoto. Estes desafios incluem a necessidade de avaliar modelos de negócios, ou seja, oferta e a demanda por recursos recuperados; a exploração de fontes alternativas de energia; o enquadramento legal referente ao

licenciamento ambiental e a utilização de recursos provenientes de esgoto; bem como considerações sobre a percepção da sociedade.

Entretanto, o processo de tratamento de águas residuais representa um avanço notável na busca pelos objetivos de desenvolvimento sustentável e na melhoria da saúde da população global. O desafio da gestão sustentável desse processo de tratamento assegurará a disponibilidade de água para uso humano e industrial. Além de aliviar a pressão sobre as fontes naturais de água, a redução do desperdício assegura que os recursos naturais se mantenham disponíveis para atender às necessidades das gerações presentes e futuras, um requisito essencial para a sustentabilidade (Villarín; Merel, 2020).

2.2 Dimensões e indicadores da sustentabilidade em ETEs

Para a avaliação de situações complexas resultantes da interação de múltiplos fatores, numa abordagem multidimensional, a exemplo da análise da sustentabilidade de um sistema, utilizam-se indicadores. Estes, simplificam dados, tornam fatos mais perceptíveis aos gestores e além disso, são capazes de quantificar, mensurar e comunicar informações relevantes tanto para os tomadores de decisão como para o público em geral (Cossio *et al.*, 2020; Freire, 2021; Ling *et al.*, 2021; Rodríguez-Castillo *et al.*, 2023).

Dentre várias outras ferramentas de avaliação, os indicadores de sustentabilidade são considerados confiáveis, claros, simples e flexíveis, incorporando dados qualitativos e quantitativos (Asmelash; Kumar, 2019; Omran *et al.*, 2021). A seguir serão apresentados os principais indicadores relacionados com as três dimensões da sustentabilidade, com base na literatura.

2.2.1 Dimensão Ambiental

- *Eficiência na remoção de poluentes*

O indicador da eficiência requerida na eliminação de poluentes é aquele que demonstra que o sistema gera águas residuais em conformidade com os padrões estabelecidos pela legislação. De acordo com Van Haandel; Santos; Paiva, (2020) a qualidade do efluente é definida pela eficácia na remoção dos componentes indesejados, tais como: sólidos suspensos (SS), matéria orgânica (MO), nitrogênio (N), fósforo (P), coliformes termotolerantes, ovos de helmintos, entre outros.

Dessa forma, a remoção dos sólidos suspensos, é um aspecto crucial para minimizar os impactos ambientais. Quando presentes em grandes quantidades, esses sólidos podem causar aumento na turbidez da água, reduzir a penetração de luz e a capacidade de reoxigenação nos corpos d'água, como também, originar odores desagradáveis e oferecer abrigo para organismos patogênicos, tornando o processo de desinfecção mais desafiador (Jordão; Pessôa, 2014; Krasavtseva *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2023). Além disso, os SS podem servir como transporte de poluentes que contaminam os corpos d'água a jusante.

Os parâmetros demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO) são amplamente utilizados para monitorar a quantidade de matéria orgânica presente nas águas residuais (Lotfi *et al.*, 2019; Asteris *et al.*, 2023). Quanto maior o valor de DBO e DQO mais grave é a poluição (Qi *et al.*, 2021). Desencadeando sérios problemas na qualidade do corpo receptor, tal como, a redução do oxigênio dissolvido, que poderá ocasionar a mortalidade da flora e fauna aquática (Freire, 2021).

Assim como, o nitrogênio e o fósforo que são os principais indicadores da quantidade de nutrientes em águas residuais (Hunt, 2013; Zhou *et al.* 2022a). Quando não são removidos de maneira eficaz, esses poluentes contribuem para o processo de eutrofização da água, levando ao aumento da multiplicação de organismos aquáticos, em especial as algas, que provoca alterações nas espécies e na quantidade de organismos, desestabilizando o equilíbrio dos ecossistemas aquáticos (Tang *et al.*, 2022; Plauborg *et al.*, 2023). De acordo com Seidmohammadi; Asgari; Asadi, (2022) a eutrofização é reconhecida como uma questão global que afeta os ecossistemas marinhos. Além disso, ela pode ocasionar a degradação da qualidade da água destinada ao consumo humano (Mažeikienė; Šarko, 2023; Plauborg *et al.*, 2023).

A presença de organismos potencialmente patogênicos pode ser indicada pelos coliformes termotolerantes presentes em esgotos, tornando sua mensuração relevante (Jordão; Pessôa, 2014). Tal como, os ovos de helmintos, reconhecidos como as estruturas biológicas mais resistentes à inativação, que frequentemente iniciam seu ciclo de desenvolvimento dentro do hospedeiro humano, levando a um conjunto de doenças (Jiménez *et al.*, 2020). Desse modo, garantir a remoção desses organismos é de suma importância para reduzir eventuais ameaças à saúde (Guerra-Rodríguez *et al.*, 2023).

- *Consumo de energia elétrica*

O indicador relacionado ao consumo de energia elétrica desempenha um papel fundamental na avaliação da eficiência do uso de recursos e na busca pela sustentabilidade ambiental nas estações de tratamento de esgoto. Os autores Mannina *et al.*, (2019) discutem que as ETEs são altamente dependentes de energia para seu funcionamento.

Desse modo, sua operação está associada a um consumo elevado de energia, (Żyłka; Karolinczak; Dąbrowski, 2021). Esse elevado consumo resulta, de forma indireta, em danos ambientais, intensifica a crise de energia e provoca um aumento nas emissões de carbono (Ling *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2022). Conforme Yerushalmi *et al.*, (2013) cerca de 80% das emissões de gases de efeito estufa têm sua origem na queima de combustíveis fósseis para a produção de energia elétrica.

Esse fato ressalta a importância ambiental significativa da diminuição do consumo de energia elétrica nos processos de tratamento de efluentes. De acordo com Żyłka; Karolinczak; Dąbrowski, (2021) o consumo de eletricidade representa de 25% a 60% dos custos operacionais totais de cada ETE. A vasta quantidade de publicações provenientes do continente europeu influenciou as discussões sobre consumo de energia, pois, esses estudos frequentemente se concentram no tratamento aeróbio, o que reforça a percepção de que a energia é um dos principais impactos dos sistemas de tratamento de esgoto.

Em vistas disso, os autores Wang *et al.*, (2022) destacam que diversos fatores estão estreitamente associados à elevada necessidade de eletricidade requerida por uma ETE, tais como o tipo de equipamento utilizado, o processo de tratamento empregado, a quantidade de águas residuais tratada, a concentração de poluentes, os parâmetros de operação, e outros. Entretanto, dentre esses fatores, a quantidade e a qualidade das águas residuais assumem um papel central na preservação de energia e na redução do consumo nas estações de tratamento de esgoto já em operação, sob condições estáveis.

- *Emissão de gases do efeito estufa (GEE)*

O indicador emissão de gases do efeito estufa está diretamente relacionado as atividades humanas, que são responsáveis por quase todo o aumento de GEE na atmosfera (IPCC, 2014). A queima de combustíveis fósseis para gerar eletricidade, fornecer aquecimento e abastecer o setor de transporte representa a principal origem das emissões de gases do efeito estufa (Demir; Yapıcıoğlu, 2019).

Nesse contexto, as ETEs são reconhecidas como uma das fontes significativas de emissão de GEE, com a capacidade de liberar CO₂, CH₄ e N₂O, H₂S, que são os principais responsáveis pela pegada de carbono predominante nas ETEs. O aumento contínuo na concentração desses gases contribuiu para as mudanças climáticas e o fenômeno do aquecimento global observados nas últimas décadas (Demir; Yapıcıoğlu, 2019; Nayeb *et al.*, 2019; Huang *et al.*, 2020; Bai *et al.*, 2022).

De modo geral, a produção de GEE nas ETEs é identificada como uma combinação de emissões diretas e indiretas (Yapıcıoğlu; Demir, 2021; Ling *et al.*, 2021). De um lado, as emissões internas ou diretas estão principalmente ligadas aos processos biológicos que ocorrem durante o tratamento. Nele, o CO₂ é gerado a partir da respiração microbiana e da oxidação de contaminantes, enquanto N₂O surge de transformações em substâncias nitrogenadas. Por outro lado, as emissões externas ou indiretas abrangem a liberação de CO₂ proveniente do consumo de eletricidade, bem como das adições químicas, além das emissões de CO₂ e CH₄ decorrentes da digestão anaeróbia (Huang *et al.*, 2020; Yapıcıoğlu; Demir, 2021).

Nesse aspecto, o tipo e a quantidade de emissões de GEE nas ETEs podem variar dependendo do tipo e da quantidade de materiais orgânicos degradáveis presentes nas águas residuais. As principais fontes de emissões de GEE são os processos de tratamento, o consumo de energia nas instalações, o uso de produtos químicos, a gestão do lodo e as atividades periódicas de manutenção e reparo (Demir; Yapıcıoğlu, 2019).

Conforme o estudo de Nayeb *et al.*, (2019) estima-se que se as ETEs não apresentarem melhorias em seu desempenho, a maior emissão de GEE ocorrerá em 2030, à medida que o acesso das pessoas aos sistemas de tratamento de águas residuais for ampliado. Portanto, atualmente, a quantificação e redução de GEE provenientes de ETEs emergem como um desafio de importância global e uma preocupação inescapável em termos de sustentabilidade (Kumar *et al.*, 2021).

- *Reaproveitamento de recursos*

O indicador reaproveitamento de recursos destaca que o tratamento de águas residuais não se limita apenas à preservação da qualidade dos recursos hídricos, sugerindo a recuperação de recursos provenientes de esgotos, e atribuindo um enfoque mais amplo e sustentável na gestão dos recursos naturais (Cunha *et al.*, 2021).

Dado que o estresse hídrico é uma questão global que está se agravando devido à crescente demanda por água e à distribuição desigual das chuvas causada pelas mudanças climáticas, a exploração de fontes alternativas de água, como a recuperação e reutilização de águas residuais, tornou-se uma estratégia valiosa (Guerra-Rodríguez *et al.*, 2023). Nesse sentido, as ETEs equipadas com sistemas que asseguram a utilização do efluente tratado desempenham um papel essencial na gestão da demanda por água e na promoção da sustentabilidade (Faustini *et al.*, 2018; Cunha *et al.*, 2021).

Outro subproduto proveniente do esgoto é o lodo. O processo de tratamento e subsequente descarte do lodo é altamente dispendioso, representando quase a metade do custo total do tratamento (Mitraka *et al.*, 2022). Além disso, as práticas convencionais de descarte do lodo, como a incineração e a disposição em aterro sanitário já não são mais consideradas adequados sob a ótica da legislação ambiental e dos atuais padrões de conformidade (Siddiqui *et al.*, 2023). Assim, conforme indicado por Bressani-Ribeiro *et al.* (2019), a recuperação e utilização do lodo como bio sólido para fins agrícolas ou restauração de áreas degradadas sobressai como uma opção de maior sustentabilidade.

O biogás é mais um subproduto que pode ser recuperado a partir do esgoto. Devido à sua natureza renovável, o biogás pode ser empregado em várias aplicações, como o aquecimento e a geração de eletricidade. Além disso, ao explorar o potencial do biogás, a ETE pode reduzir os seus custos operacionais e as necessidades energéticas (Lopes, 2021; Lima; Appleby; Li, 2023).

Destaca-se que os processos de digestão anaeróbica possuem vantagens que os tornam uma opção viável para a recuperação de recursos no tratamento de esgoto. Eles têm a capacidade de produzir energia limpa, valorizar os resíduos orgânicos e impulsionar a sustentabilidade do tratamento de esgotos em todo o mundo (Mitraka *et al.* 2022; Lima; Appleby; Li, 2023; Siddiqui *et al.* 2023).

Contudo, a efetiva recuperação de recursos muitas vezes requer estímulos adicionais, como situações de escassez hídrica, regulamentações específicas ou adoção de atitudes ambientalmente conscientes em nível doméstico (Bressani-Ribeiro *et al.*, 2019).

2.2.2 Dimensão Econômica

- *Custos de construção, operação e manutenção*

O indicador econômico de uma estação de tratamento de efluentes deve levar em consideração a sustentabilidade financeira do sistema, contemplando os custos associados à construção, operação e manutenção (Abreu; Rodrigues, 2011). Da mesma forma que as indústrias, no que se refere à sua finalidade, as ETEs também consomem uma variedade de recursos, tais como energia, água e combustíveis (Su *et al.*, 2019).

Este fator ganha uma importância significativa em países em desenvolvimento, confrontados com dificuldades como a carência de água e recursos limitados para investimento em saneamento básico (Machado *et al.*, 2021). Os investimentos exigidos para estabelecer a infraestrutura de saneamento frequentemente alcançam valores tão elevados que, em muitos casos, o governo federal assume o financiamento parcial ou total dos recursos necessários para sua implantação (Van Haandel; Santos; Paiva, 2020).

O custo de implantação, de acordo com Patel *et al.*, (2021), abrange os gastos relacionados à construção e à aquisição de equipamentos. Por outro lado, os custos de operação e manutenção envolvem todas as atividades necessárias para o funcionamento diário da ETE, abrangendo elementos como pessoal nos níveis gerencial, operacional e laboratorial, tarifas de energia e água, veículos, manutenção de equipamentos, produtos químicos, transporte e disposição final de resíduos (Ruiz-Rosa; García-Rodríguez; Mendoza-Jiménez, 2016).

A operação da ETE requer uma grande quantidade de energia elétrica, que varia consideravelmente entre os sistemas de tratamento, sendo mais alto nas tecnologias convencionais, resultando em um impacto ambiental negativo e no aumento dos custos do sistema (Patel *et al.*, 2021). Essas despesas relacionadas à eletricidade podem representar até 60% do total dos custos operacionais da ETE, por exemplo, o tratamento de apenas 1 mL de águas residuais pode consumir até 1.400 quilowatts-hora (kWh). Com o aumento da população e a exigência de padrões de tratamento de efluentes mais rigorosos, é previsto que a demanda por energia nas ETEs continue a crescer (Lima, Appleby; Li, 2023).

Nesse contexto, conforme ressaltado por Souza; Duarte; Tinôco (2021), os indicadores econômicos ligados aos custos de operação e manutenção desempenham um papel fundamental na execução de intervenções seguras nos sistemas. Adicionalmente, é evidente a necessidade de otimizar a eficiência desses custos, por meio da capacitação das

equipes de operação e manutenção, do aumento da automação dos sistemas, da incorporação de energia solar por meio de painéis fotovoltaicos e da utilização do biogás produzido na própria estação para a geração de energia, visando alcançar uma maior sustentabilidade nos gastos.

2.2.3 Dimensão Social

- *Odor e ruído*

O indicador de odor e ruído desempenha uma função importante na proteção social, uma vez que, embora as ETEs impeçam a entrada de matéria orgânica, nutrientes e outros poluentes nos ecossistemas naturais, é comum que essas ETEs estejam localizadas nas proximidades de áreas residenciais. Em muitos casos, a ETE foi estabelecida antes e, gradualmente, incorporada ao desenvolvimento urbano posterior. Por esse motivo, podem surgir situações críticas em termos dos impactos causados pelos odores e ruídos (Fajardo; Salvador; Teixeira, 2017; Ravina *et al.*, 2020; Luckert *et al.*, 2023).

O odor desagradável das ETEs tem sido uma grande preocupação em comunidades densamente povoadas há anos (Fan *et al.*, 2020). O desconforto causado pelo odor, embora não esteja diretamente associado a nenhuma doença específica, prejudica a qualidade de vida ao contribuir para a poluição do ar e potencialmente desencadear sintomas de saúde, como perda de apetite, insônia, náusea, vômito e distúrbios mentais (Dinçer *et al.*, 2020; Piccardo *et al.*, 2022). Em situações críticas, odores desagradáveis podem afetar a satisfação dos funcionários e da comunidade, prejudicar relações interpessoais, desestimular investimentos e diminuir o status econômico (Metcalf; Eddy, 2016). Entre muitos produtos químicos odoríferos emitidos pelas ETEs, os compostos originados do enxofre são frequentemente as principais substâncias que causam incômodo (Byliński *et al.*, 2019; Luckert *et al.*, 2023).

Da mesma forma, o nível de ruído proveniente da ETE afeta a comunidade. As pessoas estão cada vez mais expostas ao ruído excessivo, o que está intimamente relacionado à diminuição da qualidade de vida em suas residências, aos efeitos adversos na saúde, incluindo o potencial para causar estresse psicológico e desconforto, tanto em seres humanos quanto em animais, com risco de consequências irreversíveis (Metcalf; Eddy, 2016; Moravec *et al.*, 2021). Muitas ETEs registram níveis de ruído consideravelmente altos, os quais impactam negativamente, mas têm um efeito mais pronunciado sobre seus

próprios funcionários, que enfrentam exposição constante, tornando a perda auditiva um fator de risco comum (Amor *et al.*, 2022).

Apesar disso, os indicadores sociais são frequentemente negligenciados devido a dificuldades de medição e quantificação. No entanto, existe um esforço para igualmente prevenir ou reduzir os possíveis impactos negativos desse processo (Ahmed; El Gendy; El Hagggar, 2017; Fajardo; Salvador; Teixeira, 2017).

- *Aceitação pública e Educação ambiental*

O indicador da aceitação pública do sistema de tratamento de esgoto e a educação ambiental são aspectos determinantes para a gestão e sustentabilidade social na comunidade envolvida (Chhipi-Shrestha; Hewage; Sadiq, 2017; Nourredine *et al.*, 2023).

Embora as ETEs sejam instalações sociais que protegem a saúde pública contra contaminantes, as pessoas geralmente evitam viver nas proximidades delas. Existe uma aversão psicológica a instalações que lidam com água contaminada, como esgoto. Os riscos para a saúde, os odores desagradáveis, o impacto visual e o ruído gerados pelas ETEs são fatores indesejados (Godoi *et al.*, 2018). Além disso, os residentes próximos a essas instalações também correm o risco de sofrer perdas econômicas devido à desvalorização de suas propriedades (Wang; Gong, 2018).

Desse modo, para que a tecnologia seja implementada com sucesso e de forma sustentável, incluindo operação, monitoramento e manutenção confiáveis, é essencial que os usuários a aceitem, ou seja, a avaliem positivamente (Kollmann *et al.*, 2023). Assim, garantir um nível adequado de aceitação social para instalações públicas que causam desconforto e outras perturbações é fundamental para os projetos de infraestrutura (Huh; Shin; Ryu, 2020; Zapasa *et al.*, 2022).

Outro aspecto importante, conforme destacado por Fajardo, Salvador e Teixeira (2017), é a educação ambiental. A produção de esgoto e de resíduos sólidos nas ETEs está intimamente ligada ao uso de água pela população. Assim, programas de educação ambiental são essenciais, pois podem elevar a consciência da comunidade, levando à redução da produção de esgoto. Além de promover uma compreensão mais ampla da importância do próprio sistema, o que aumenta o envolvimento da população na implementação das ETEs.

Isso ressalta a relevância dos programas sociais como elementos-chave na redução dos impactos ambientais e na busca por maior sustentabilidade. Entretanto, é crucial

observar que a transição dos valores sociais em direção a práticas mais sustentáveis é um processo que costuma ocorrer de maneira gradual e lenta (Bressani-Ribeiro *et al.*, 2019).

2.3 Saneamento ambiental em áreas turísticas

O saneamento ambiental exerce um papel indispensável na fomentação do turismo sustentável, assegurando que as regiões turísticas permaneçam preservadas, seguras, limpas e atraentes tanto para os visitantes quanto para as comunidades locais. A qualidade do ambiente é determinante para aprimorar as atrações turísticas e proporcionar uma experiência altamente satisfatória e significativa. Isso, por sua vez, contribui para um alto grau de satisfação entre os visitantes (Streimikiene *et al.*, 2020; Zhou *et al.*, 2022b).

O turismo favorece a melhoria da qualidade de vida, impulsiona a economia em regiões com infraestruturas menos desenvolvidas, cria empregos, gera renda, promove o intercâmbio cultural e auxilia no equilíbrio do desenvolvimento sustentável (Beni *et al.*, 2012; Sarpong *et al.*, 2020). No entanto, é importante notar que os destinos turísticos frequentemente abrigam ecossistemas sensíveis e têm uma riqueza cultural que exige monitoramento constante e avaliação dos impactos do turismo (Asmelash; Kumar, 2019).

O segmento de turismo de sol e praia é amplamente reconhecido como um dos mais populares no mercado turístico (Zhou *et al.*, 2022b). Entretanto, a descarga de efluentes líquidos não tratados nas praias é uma das principais causas de degradação do ambiente costeiro e marinho, resultando em impactos significativos nos aspectos social, econômico e ambiental. Um dos efeitos mais evidentes desse fenômeno é a deterioração da qualidade da água das praias, comprometendo sua balneabilidade (Castro Neto, 2018).

Assim, a falta de saneamento ambiental adequado além de diminuir a atratividade e a competitividade dos destinos turísticos, pode resultar em doenças entre os visitantes, e afetar o número de chegadas na região, o que gera perda de receitas e o pleno aproveitamento do potencial turístico (Loehr *et al.*, 2021; Dwipayanti *et al.*, 2022). A seguir, alguns estudos apontam os desafios enfrentados por áreas turísticas que carecem da infraestrutura de saneamento.

Oliveira *et al.*, (2016) conduziram um estudo na Ilha de Florianópolis, Brasil, que ilustra o declínio na qualidade ambiental. A região abriga uma grande variedade de ecossistemas marinhos, mas devido à urbanização intensa e ao turismo exploratório, as praias estudadas sofreram mudanças significativas. Os resultados mostraram que das 25 praias estudadas, apenas três foram classificadas como classe 1, ou seja, consideradas

naturais, altamente atraentes e com elevados valores paisagísticos. O elevado grau de potencial poluição sanitária levou à diminuição da atratividade cênica das paisagens.

Chueiri e Fortunato (2021), realizaram um estudo que investigou duas praias localizadas na Ilha Grande, pertencente ao município de Angra dos Reis (RJ). A pesquisa partiu da premissa de que o intenso fluxo de turistas, combinado à falta de adequados serviços de tratamento de esgoto, resulta em poluição e impactos negativos ao ambiente marinho, prejudicando o desenvolvimento e a manutenção do turismo como atividade econômica. Os resultados do estudo revelaram que o turismo aparece como sinônimo de tensão e, ao mesmo tempo, de lazer e oportunidade de empregos para a Ilha Grande, logo, fica evidenciado a ausência de um plano de gestão costeira nas duas praias.

Pasciucco, Pecorini e Iannelli (2023) desenvolveram um estudo utilizando a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para analisar três estações de tratamento de efluentes urbanas de tamanho médio, localizadas em uma área turística no centro da Itália. O estudo confirmou que as estações de tratamento de águas residuais localizadas em áreas turísticas geralmente enfrentam desafios devido ao aumento sazonal do fluxo de efluentes e das cargas de poluição associadas. Os impactos ambientais durante a alta temporada foram superiores aos gerados durante a baixa temporada. Os resultados também revelaram que as ETEs maiores apresentaram menor variação sazonal e maior flexibilidade. Isso sugere que a centralização das ETEs em zonas turísticas pode ser uma opção para melhorar o desempenho do tratamento em termos de impactos ambientais.

2.4 Avaliação do Ciclo de Vida

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta de gestão ambiental que tem como objetivo quantificar os aspectos e potenciais impactos ambientais relacionados aos diferentes estágios de um sistema, produto ou serviço. Essa avaliação envolve a coleta e quantificação de informações sobre as entradas, como energia e materiais utilizados, e as saídas, como resíduos e emissões liberados no meio ambiente, desde a obtenção das matérias-primas, passando pela produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem e até a disposição final (Corominas *et al.*, 2013; ABNT, 2014a; Su *et al.*, 2019).

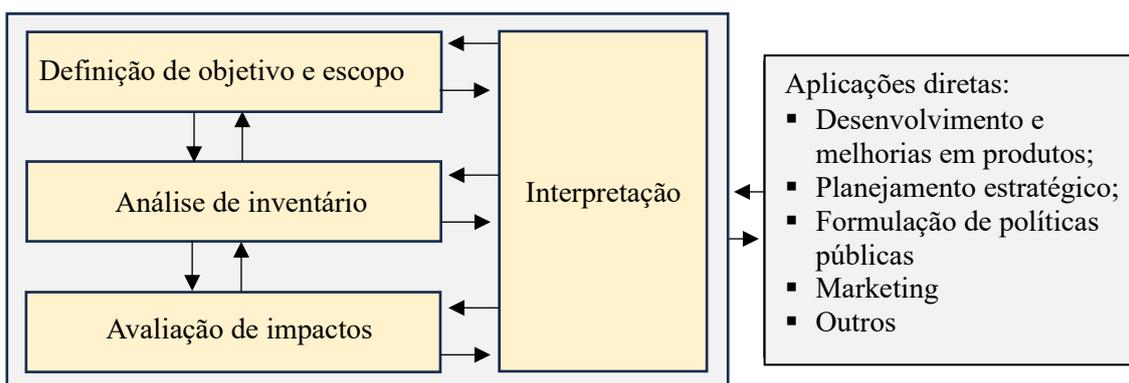
Como uma ferramenta de gestão, a ACV permite aos tomadores de decisão considerar aspectos técnicos e desempenho ambiental ao escolher entre diferentes alternativas. Ela também auxilia na identificação de oportunidades de melhoria ao longo do ciclo de vida (Corominas *et al.*, 2020; Ling *et al.*, 2021). Por outro lado, a ACV também

pode ser eficaz na avaliação dos potenciais impactos ambientais das estruturas de saneamento. Diversos pesquisadores consideram a ACV como a melhor prática para avaliar a sustentabilidade ambiental de conjuntos complexos de processos, como os encontrados em estações de tratamento de esgoto (Pintilie *et al.*, 2016; Corominas *et al.*, 2020; Mehmeti; Canaj, 2022).

A Avaliação do Ciclo de Vida pode ser dividida em dois tipos principais: atribucional e consequential. A ACV atribucional foca na descrição dos fluxos ambientais ao longo do ciclo de vida de um produto, buscando atribuir os impactos ambientais diretos causados por ele. Utiliza dados médios e não considera os efeitos indiretos ou interações com outros sistemas. Já a ACV consequential descreve como os fluxos ambientais podem mudar em resposta a decisões, analisando os impactos diretos e indiretos, e considerando as interações entre diferentes sistemas (Rehl; Lansche; Müller, 2012; Heimersson; Svanstrom; Ekvall, 2019; Corominas *et al.*, 2020). A maioria dos estudos de ACV em ETES adota uma abordagem atribucional, sendo esta também a escolha deste estudo.

As normas ISO 14040 e 14044 (2014) estabelecem uma metodologia geral, mas, não têm como objetivo detalhar a aplicação em cada campo específico em que o método é usado. A criação de um quadro metodológico geral foi um resultado importante da padronização da ISO, o qual estabelece que um estudo ACV é composto por quatro fases, como demonstrado na Figura 1.

Figura 1 - Visão geral do quadro de Avaliação do Ciclo de Vida



Fonte: ABNT (2014a)

A primeira fase da ACV consiste na definição do objetivo e escopo. Nessa etapa, efetua-se o esboço do estudo com a finalidade de esclarecer o motivo e abrangência da análise. Ao definir o objetivo, é necessário mencionar a aplicação desejada, as razões para

realizar o estudo, o público-alvo e se pretende utilizar os resultados para comparações (ABNT, 2014b). No que diz respeito ao escopo, é importante descrever o sistema de produto, função do sistema, a unidade funcional, a fronteira do sistema o método de alocação, entre outros; o nível de detalhamento depende da abrangência do estudo (ABNT, 2014a; 2014b). É fundamental ressaltar que a ACV é uma ferramenta iterativa, o que significa que permite alterações no planejamento inicial.

A unidade funcional (UF) tem a responsabilidade de quantificar as funções identificadas de um produto ou serviço, com o objetivo primordial de fornecer uma referência para relacionar os dados de entrada e saída, permitindo a comparação e mensuração de diferentes sistemas com base na mesma UF (ABNT, 2014b). No contexto de ACVs de estações de tratamento de águas residuais, a descrição do desempenho do serviço é frequentemente representada pelo tratamento de um volume específico de esgoto, sendo 1m³ de esgoto tratado a UF mais comumente utilizada em trabalhos anteriores (Corominas *et al.*, 2020; Canaj *et al.*, 2021; Çapa *et al.*, 2022).

O principal objetivo ao estabelecer os limites do sistema é selecionar os processos e partes do ciclo de vida relevantes para o propósito do estudo. Idealmente, convém que o sistema seja modelado de maneira que as entradas e saídas na sua fronteira sejam fluxos elementares. Os fatores que determinam as fronteiras do sistema incluem a definição do objetivo e escopo, aplicação pretendida, pressupostos adotados, restrições de dados e custos, critérios de corte e o público-alvo do estudo (ABNT, 2014a).

Na segunda fase da ACV, ocorre a elaboração do Inventário do Ciclo de Vida (ICV), que consiste na coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas relevantes de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida (ABNT, 2014a). Nessa etapa, são realizadas atividades como a coleta e validação dos dados, correlação dos dados aos processos elementares e à unidade funcional, agregação dos dados e, quando necessário, o refinamento da fronteira do sistema e a alocação (ABNT, 2014b). Geralmente, a coleta dos dados é a fase mais longa de uma ACV.

A terceira fase da ACV é a Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV). Seu objetivo é compreender e avaliar a magnitude e a importância dos potenciais impactos ambientais, com base nos resultados da fase anterior, o ICV (ABNT, 2014a). Durante esse processo, são considerados elementos obrigatórios e opcionais. Nos elementos obrigatórios, é feita a seleção das categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização. Além disso, ocorre a classificação de dados, associando os elementos inventariados às categorias de impactos, e a caracterização de dados, quantificando o

impacto de cada emissão ou recurso utilizando fatores de impacto. Já os elementos opcionais servem para normalizar, agrupar e ponderar os resultados dos indicadores, bem como realizar uma análise de qualidade dos dados.

A normalização tem como objetivo compreender a magnitude dos resultados dos indicadores de impacto, buscando um valor de referência que facilite a comunicação dos resultados. O agrupamento, por sua vez, envolve a agregação de categorias de impacto em uma única base, como escalas regionais, locais ou globais. A ponderação consiste na conversão dos resultados dos indicadores em fatores numéricos, e a análise da qualidade dos dados melhora a compreensão da confiabilidade da coleta de resultados dos indicadores (ABNT, 2014b).

A AICV é uma abordagem relativa que se baseia em uma UF, o que significa que todas as entradas e saídas no ICV e o perfil da AICV estão relacionados a essa UF (ABNT, 2014a). Os modelos de caracterização, também conhecidos como métodos da AICV, possuem características específicas e podem ser abordados de duas maneiras: *midpoint* (ponto médio) e *endpoint* (ponto final).

Na abordagem *midpoint*, todos os fluxos descritos no ICV são agregados em categorias de impacto que possuem uma relação comum na cadeia de causa e efeito dos mecanismos ambientais. Essas categorias representam indicadores de impacto potencial. Por outro lado, a abordagem *endpoint* consiste em caracterizar as consequências das categorias de *midpoint* em áreas de proteção no final do percurso ambiental, conectando os resultados do inventário com os respectivos impactos nas áreas de proteção (Alves, 2018).

Os métodos de AICV estão incorporados nos *softwares* utilizados para estudos de ACV, por exemplo, Simapro[®], Gabi *software*, Open Source Life Cycle Assessment - openLCA e outros. No entanto, não há uma metodologia ou orientações consistentes para a seleção dos métodos mais adequados para AICV. Dentre os métodos mais utilizados para AICV, podem ser mencionados o CML, Eco-Indicator 99, EDIP, Impact 2002+, LIME, LUCAS, ReCiPe, TRACI, USEtox entre outros.

A quarta fase da ACV é a análise e interpretação de todos os resultados. Nessa etapa, realiza-se a análise dos resultados obtidos nas fases de inventário e de avaliação de impactos ambientais, levando em consideração o objetivo e o escopo previamente definidos. O objetivo é obter conclusões e estabelecer recomendações, além de apresentar quaisquer limitações encontradas ao longo do processo. Essa análise também pode incluir a avaliação de sensibilidade e/ou consistência dos dados, investigando as escolhas

metodológicas feitas na primeira fase. Dessa forma, permite que os tomadores de decisão analisem os resultados da maneira informada.

2.4.1 ACV aplicada ao tratamento de esgotos

A aplicação da ACV em sistemas de tratamento de esgotos teve seu início na década de 1990, com o objetivo de avaliar os aspectos ambientais das estações de tratamento. Essa ferramenta revelou-se extremamente valiosa na identificação dos impactos ambientais relacionados ao projeto e à operação dessas estações. A partir desse momento, houve um interesse crescente por parte de pesquisadores e profissionais da área em utilizar a ACV, o que tornou necessária uma revisão dos estudos realizados até o momento (Corominas *et al.*, 2013; Nguyen *et al.*, 2020; Lopes, 2021).

Diversas aplicações e artigos de revisão sobre ACV em ETEs foram publicados na literatura. Para isso, realizou-se um levantamento da literatura em plataformas de pesquisa como, *Web of Science*, *Science Direct* e Google Acadêmico, usando as palavras-chave em inglês: *Life Cycle Assessment (LCA)* e *Wastewater Treatment* publicados nos últimos anos. Principais objetivos, método e resultados alcançados são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Revisão dos artigos da aplicação de ACV no tratamento de esgotos.

Fonte	Objetivo	Método	Resultados
Niero <i>et al.</i> (2014)	Comparar o desempenho ambiental de quatro tipos de ETE com diferentes cenários.	ReCiPe e USEtox	Para os impactos de aquecimento global e depleção abiótica, o reaproveitamento do fósforo na agricultura aparece como uma alternativa mais sustentável em comparação com a incineração do lodo.
Risch <i>et al.</i> (2015)	Quantificar a contribuição da rede coletora de esgoto em relação ao impacto total do sistema urbano de esgoto.	ReCiPe	A construção da rede coletora tem um impacto ambiental negativo maior do que a construção e operação da ETE em 12 das 18 categorias.
Pintilie <i>et al.</i> (2016)	Aplicar a ACV para identificar e quantificar os principais impactos ambientais resultantes do tratamento de águas residuais urbanas e as oportunidades de recuperação de água.	ReCiPe e CML 2001	Mostrou que o tratamento terciário contribui significativamente para os impactos ambientais negativos, observando que a categoria com maior valor é a demanda cumulativa de energia.

Lutterbeck; Pharino; Kanchanapiya (2017)	Investigar o desempenho de um sistema de tratamento de esgoto localizado em uma propriedade rural.	ReCiPe	Em relação à Saúde Humana e Ecossistema, a fase de operação demonstrou um potencial de impacto maior, enquanto para a categoria de Recursos, a fase de construção apresentou um maior potencial de impacto.
Buonocore <i>et al.</i> (2018)	Comparar o desempenho ambiental de diferentes cenários para a disposição de águas residuais e lodo em de uma ETE.	ReCiPe	As categorias mais impactadas em todos os cenários são: potencial de eutrofização de água doce e potencial de toxicidade Humana.
Arzate <i>et al.</i> (2019)	Análise comparativa da ozonização e do processo foto-Fenton como tratamentos terciários de águas residuais.	ReCiPe e USEtox	A ozonização tem um melhor desempenho ambiental geral em comparação com o processo foto-Fenton porque o impacto ambiental do ozônio necessário é menor do que o dos reagentes envolvidos no processo foto-Fenton solar.
Singh <i>et al.</i> (2020)	Estudar a avaliação do ciclo de vida (ACV) e o impacto de uma estação de biogás baseada em lodo de esgoto municipal.	ReCiPe	A construção da ETE foi insignificante em relação aos impactos de todo o ciclo de vida. A estação de biogás apresentou emissões negativas de GEE em comparação com as centrais elétricas baseadas no carvão.
Foglia <i>et al.</i> (2021)	Investigar os impactos ambientais e econômicos de uma ETAR convencional e comparar cenários para a reutilização da água recuperada na agricultura.	ReCiPe	Os resultados indicaram que o uso de água recuperada oferece mais benefícios ambientais do que o descarte de água tratada.
Boldrin; Formiga; Pacca (2022)	Analisar o desempenho ambiental de um sistema integrado de abastecimento de água e esgoto que emprega um sistema de lagoas.	ReCiPe	A captação de água é a que mais contribui para os potenciais impactos ambientais. Há uma exceção nas categorias de mudanças climáticas e formação de oxidantes fotoquímicos, que são mais afetadas pela ETE.
Vassalle <i>et al.</i> (2023)	Avaliar os impactos ambientais de reatores UASB de fluxo ascendente acoplados a lagoas de algas de alta taxa.	ReCiPe	As lagoas de algas mostraram ser a alternativa mais ecológica, em metade das categorias de impacto avaliadas, e, no geral, essa combinação com o reator UASB se mostrou viável para uso em pequenas comunidades no Brasil.

No Quadro 1, observa-se a tendência dos artigos em comparar cenários e sistemas de tratamento de esgoto, por meio da aplicação da ferramenta de ACV utilizando o método ReCiPe, evidenciando a ampla adoção desse método em estudos de ACV.

Além disso, tornou-se possível analisar o emprego da ACV em diferentes sistemas de tratamento de esgotos, observando a predominância de artigos originados de países europeus, os quais são precursores na aplicação da ACV para tratamento de esgoto.

Assim como, observou-se, uma escassez notável de estudos sobre sistemas anaeróbios, como o reator UASB, possivelmente devido à sua baixa prevalência na Europa e em países desenvolvidos. No entanto, de acordo com Lopes (2021), nos últimos anos,

houve um aumento significativo no uso de reatores UASB em conjunto com pós-tratamento em sistemas de tratamento de esgotos sanitários no Brasil. Isso ressalta a importância de desenvolver estudos de ACV relacionados a esse tipo de tratamento.

2.4.2 Método ReCiPe

O método ReCiPe é uma evolução dos métodos Eco-indicador 99 e CML 2002, integrando e harmonizando as abordagens *midpoint* e *endpoint* em uma estrutura comum e consistente. Seu objetivo inicial foi alinhar as abordagens orientadas ao problema do CML 2002 e orientadas a dados do Eco-indicador 99 em uma única metodologia (Goedkoop *et al.*, 2009; Rashedi; Khanam, 2020; Akyüz, 2021).

O ReCiPe inclui 18 indicadores de *midpoint* e três indicadores de *endpoint*. Cada abordagem incorpora fatores relacionados a três perspectivas culturais: (I) Individualista, que se concentra no curto prazo e no otimismo em relação à capacidade da tecnologia de evitar problemas futuros; (H) Hierarquista, considerado padrão, baseia-se num consenso comumente encontrado em modelos científicos; e (E) Igualitária, perspectiva mais preventiva, adota uma abordagem de longo prazo (Huijbregts *et al.*, 2017).

Os modelos de *midpoint* proporcionam um nível maior de certeza, ao passo que os modelos de *endpoint* normalizam e agregam os impactos de várias categorias simplificando para torná-los mais compreensíveis para os tomadores de decisão, pois resumem as informações em uma única pontuação. No entanto, ao realizar uma ACV para um sistema específico, uma pontuação única não é necessária. Nesse caso, o método de indicadores do ponto médio pode ser mais preciso e transparente (Byrne *et al.*, 2017).

De acordo com Corominas *et al.*, (2020), a metodologia de avaliação de impacto ReCiPe, na abordagem *midpoint*, é recomendada para avaliar os impactos do inventário do ciclo de vida em estudos de tratamento de efluentes sanitários. Os autores destacam que esse é o método mais amplamente utilizado nessa área específica.

A Figura 2 ilustra a relação das categorias de impacto referente aos indicadores intermediários que incluem, por exemplo: mudanças climáticas, redução da camada de ozônio, acidificação, eutrofização, toxicidade humana, formação de oxidante fotoquímico, ecotoxicidade, radiação ionizante, ocupação de solo e esgotamento de recursos. Em termos dos indicadores finais que caracterizam os indicadores intermediários em áreas de proteção, como: saúde humana, qualidade dos ecossistemas e recursos naturais.

Figura 2 - Relação entres os indicadores de *Midpoint* e *Endpoint*.

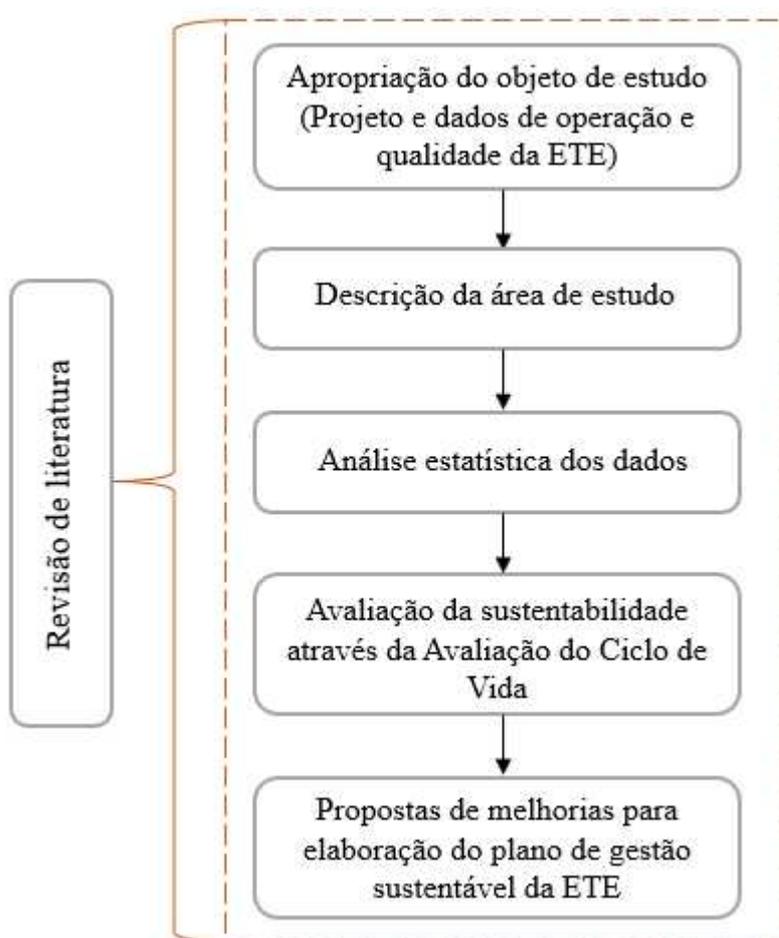


Fonte: Goedkoop *et al.*, (2009)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento da pesquisa foi realizada a revisão da literatura em um processo contínuo, abrangendo periódicos acadêmicos e científicos, dissertações, teses, além de livros nacionais e internacionais. Posteriormente, procedeu-se a apropriação do objeto de estudo, descrição da área, definição dos objetivos e dos métodos utilizados. O fluxograma com as etapas metodológicas está apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Fluxograma de atividades da pesquisa.



3.1 Apropriação do objeto de estudo

Inicialmente, para adquirir o conhecimento sobre o objeto de estudo, foram requisitadas as informações relacionadas ao projeto, operação e qualidade do esgoto bruto e tratado da ETE por meio da Ouvidoria do Estado do Ceará, as quais foram

disponibilizadas pela Companhia de Água e Esgoto do Ceará - Cagece. E uma visita *in loco* foi realizada para coletar informações junto aos responsáveis e operadores.

O projeto do sistema de esgotamento sanitário da área em estudo foi concebido com o objetivo de iniciar a operação em 2009, com uma previsão de duração de 20 anos, culminando, assim, em seu encerramento em 2029. Contudo, a conclusão da obra ocorreu em outubro de 2019, e a estação de tratamento de esgoto entrou em pleno funcionamento em fevereiro de 2020. Em vistas disso, foi necessário estimar as vazões para os anos subsequentes de operação da ETE, abrangendo o período de 2030 a 2040.

Para calcular as vazões utilizou-se os parâmetros e considerações de projeto descritas no Quadro 2, e a projeção da população foi efetuada pelo método de estimativa geométrico, conforme previsto no projeto da ETE.

Quadro 2 - Parâmetros utilizados no dimensionamento da ETE.

Parâmetros de projeto	
Alcance do plano	20 anos
Consumo de água per capita (q)	150 L/hab./dia
Número de habitantes estimados por imóveis	5 habitantes
Coefficiente de demanda diária máxima (k_1)	1,2
Coefficiente de demanda horária máxima (k_2)	1,5
Coefficiente de menor consumo (k_3)	0,5
Coefficiente de retorno (C)	0,8
Taxa de Infiltração (T_i)	0,0002 l/s.m
Extensão da rede coletora de esgoto	12.567,00 m

Fonte: Cagece, 2022.

Quanto aos dados de qualidade do esgoto bruto os parâmetros fornecidos foram: Coliformes totais; Escherichia coli; Demanda Química de Oxigênio (DQO); Materiais Flutuantes; pH; Sólidos Sedimentáveis (SSed); Sulfeto; Temperatura e Sólidos Suspensos Totais (SST). Na saída do tratamento, os parâmetros foram: Coliformes totais; Escherichia coli; Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO); Demanda Química de Oxigênio; Oxigênio dissolvido; pH; Sulfeto, Temperatura, Sólidos Sedimentáveis e Sólidos Suspensos Totais.

As coletas foram realizadas por técnicos em saneamento ambiental uma vez por mês, armazenadas em recipientes adequados, devidamente fechados e transportados para o laboratório regional de análises físico-químicas da Cagece, localizado no município de

Itapipoca/CE. A periodicidade das coletas foi mensal entre 08:00h e 15:00h e aconteceram de Jan/2021 à Jan/2022, contemplou-se uma amostragem dupla, na chegada da ETE e no final do tratamento, para um período de 13 meses.

O Quadro 3 apresenta os indicadores e a metodologia aplicada pela companhia para as análises em laboratório dos esgotos bruto e tratado, padronizados na Resolução estadual COEMA nº 02/2017.

Quadro 3 - Indicadores analisados e seus respectivos métodos analíticos.

Parâmetros	Métodos
Coliformes totais	9223, SMEWW 23RD ED., 2017
Escherichia coli	9223, SMEWW 23RD ED., 2017
DBO	5210 B, SMEWW 23RD ED., 2017
DQO	410.4, USEPA, 1993 / 5220 B, SMEWW 23RD ED., 2017
Oxigênio dissolvido	4500-O C, SMEWW 23RDED., 2017
Temperatura	2550 B, SMEWW 23RDED., 2017
pH	4500-H+ B, SMEWW 23RDED., 2017
Sulfeto	4500 S2- F, SMEWW 23RDED., 2017
Sólidos sedimentáveis	2540 F.3A, SMEWW 23RDED., 2017
Sólidos suspensos totais	2540 D, SMEWW 23RD ED., 2017

Fonte: Cagece, 2022.

3.2 Descrição da área de estudo

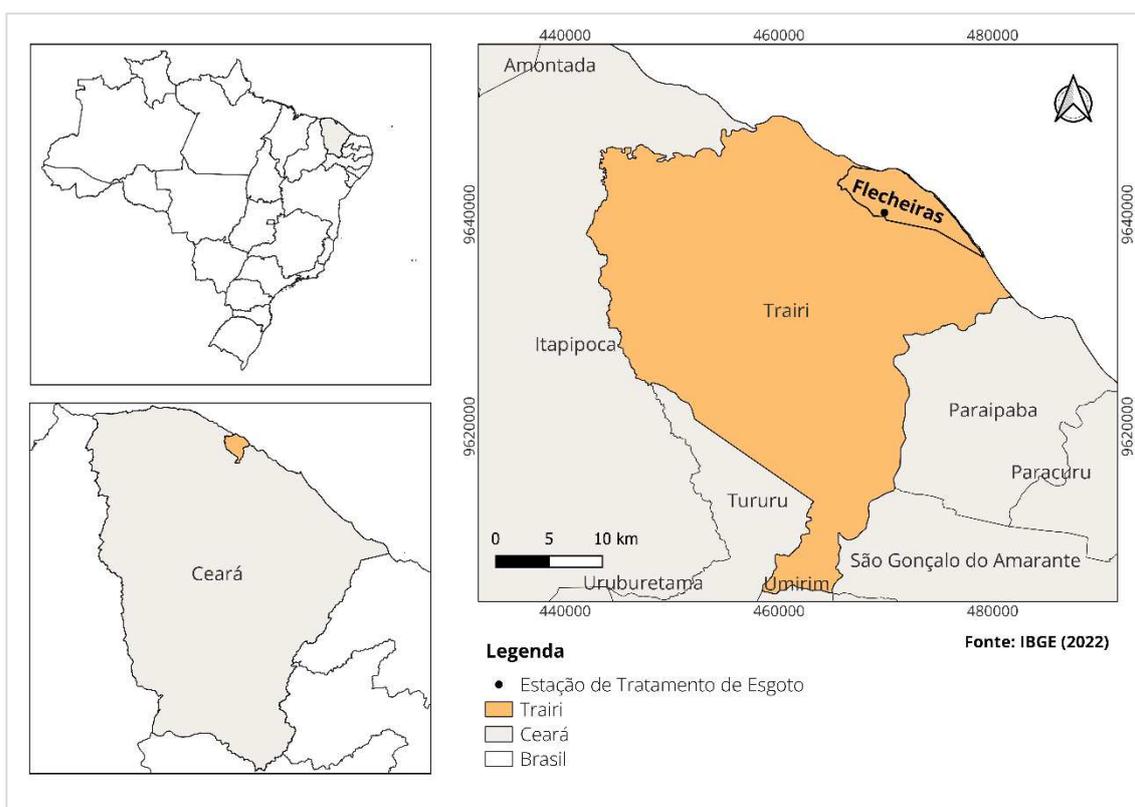
A área de estudo deste trabalho é uma estação de tratamento de esgoto que está localizada em Flecheiras, um dos distritos pertencentes ao município de Trairi, situado no litoral do Ceará.

Conforme dados do Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará - IPECE (2017), Trairi foi estabelecido como município em novembro de 1863, por meio da Lei 1068, e está situado no norte do estado do Ceará, com coordenadas geográficas de 3° 16' 40" ao Sul e 39° 16' 08" ao Oeste. O município faz fronteira com as seguintes localidades: Itapipoca, Tururu, Umirim, São Luís do Curu, São Gonçalo do Amarante e Paraipaba, como demonstrado na Figura 4. O clima predominante da região é o tropical quente semiárido brando. Trairi está inserido na Bacia Hidrográfica do Litoral, tendo limites a oeste com a bacia do rio Acaraú, a leste com a bacia do rio Curu e ao norte com o oceano Atlântico. Em

termos de infraestrutura de saneamento, a cidade registra uma cobertura de água de 91,62% e de esgoto de 23,75%, contando com um total de 592 ligações ativas de esgotamento sanitário.

Tanto Trairi quanto seu distrito Flecheiras têm a prestação dos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário delegada à Companhia de Água e Esgoto do Ceará - Cagece. É relevante notar que Flecheiras não dispõe de um aterro sanitário; a coleta de resíduos sólidos é conduzida por meio de lixeiras e é gerenciada pela Prefeitura Municipal de Trairi. Quanto aos serviços de drenagem urbana, estes estão disponíveis apenas na região central de Flecheiras.

Figura 4 - Localização da área de estudo.



Flecheiras passou por uma mudança significativa, saindo de sua origem como uma vila de pescadores para se tornar amplamente conhecida como um dos destinos de praia mais populares entre os turistas, sendo denominada como um importante polo turístico no estado do Ceará. A tendência de crescimento para Flecheiras está diretamente relacionada às dinâmicas que influenciam o desenvolvimento das atividades turísticas, comerciais e industriais na região.

Rocha (2017), descreve Flecheiras como uma composição de paisagens deslumbrantes, que incluem dunas imponentes e vastos coqueirais que se estendem diante de um oceano de tonalidade azul infinita. Situa-se em uma enseada com formato de meia lua, dando a impressão de que ali a terra abraça o mar. Sua geografia abrange praias de areias douradas, lagoas costeiras, extensas áreas de dunas móveis, densos coqueirais, recifes à beira-mar, pequenos manguezais e planícies.

3.2.1 Estação de tratamento de esgoto de Flecheiras

A estação de tratamento de esgoto de Flecheiras, Figura 5, opera com vazão média de 928,80 m³/d, tendo ampliações previstas para funcionamento de até 20 anos.

Figura 5 - Estação de tratamento de esgoto de Flecheiras/CE.



Fonte: Cosampa, 2019.

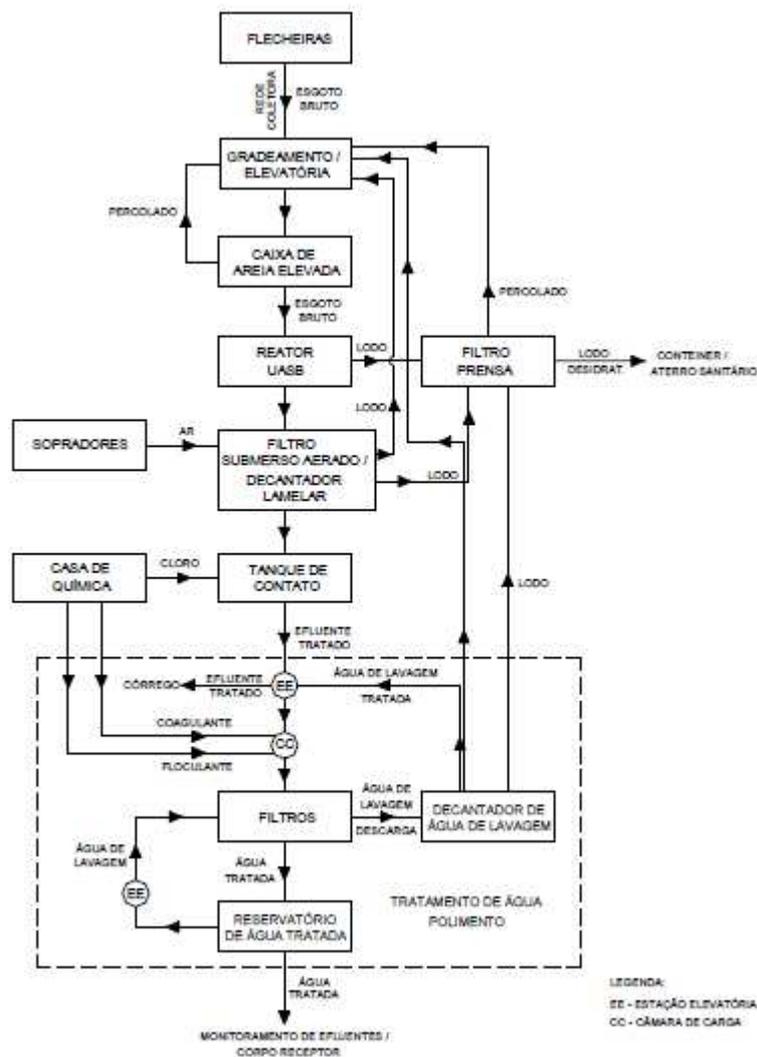
O sistema de tratamento foi concebido levando em consideração a topografia do terreno, as características do esgoto e a possibilidade de reutilização dos efluentes. Com base na topografia, o projeto inclui duas sub-bacias, cada uma com uma estação elevatória de esgoto. Os esgotos recebidos na sub-bacia 2, são direcionados para a sub-bacia 1 e sua estação elevatória EEE-1 conduz o esgoto a ETE.

A ETE é constituída de grade, caixa de areia, reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB) seguidos de filtros submersos aerado (FSA) e decantadores lamelares (DL), com etapa de desinfecção com hipoclorito de cálcio (Ca

(ClO)₂) em tanques de contato (TC). Além disso, é composta por tanque de adensamento de lodo (TAL) e filtro prensa (FP), este, ainda não foi posto em operação.

Na etapa de polimento têm-se: estação elevatória (EE), câmara de carga (CC), filtros de fluxo ascendente (FA) e filtros de fluxo descendente (FD), decantadores de água de lavagem (DAL) e reservatórios de água tratada (RAT). Por fim, as unidades auxiliares são: casa de bombas e sopradores, casa do gerador, laboratório, casa de química e casa do filtro prensa. A Figura 6 apresenta a disposição das unidades de tratamento e o fluxograma de funcionamento.

Figura 6 - Fluxograma do sistema de tratamento.



Fonte: Cagece, 2022.

Ao chegarem à ETE os esgotos passam pelo tratamento preliminar, associado a um medidor Parshall. Em seguida os esgotos seguem para os 3 módulos de reatores UASB,

nos quais ocorre o processo anaeróbico de tratamento. Logo após este processo, os esgotos são tratados em filtros biológicos submersos aerados que são interligados a decantadores lamelares, nível secundário. Depois os esgotos são clorados em tanque de contato, atingindo o fim do nível terciário de tratamento. A seguir, os efluentes tratados têm a opção de serem descarregados em um córrego, sem denominação, que corre dentro da ETE, ou seguir para o tratamento avançado que ocorre por processos físico-químicos.

No tratamento avançado, inicialmente, uma estação elevatória recalca o efluente tratado do tanque de contato para alimentar a câmara de carga, nesse ponto, os efluentes recebem coagulante e floculante, essa etapa é usada para agregar partículas muito pequenas e formar flocos. Essas águas fluem para as unidades de filtração rápida (dupla filtração), com meio poroso granular, capaz de reter e remover as impurezas ainda presentes no efluente tratado. As águas de lavagem dos filtros são encaminhadas para um decantador de água de lavagem. O sobrenadante do decantador retorna à unidade de gradeamento e o lodo segue para o tanque adensador de lodo, pois, o filtro prensa ainda não está em funcionamento. Os efluentes filtrados são armazenados no reservatório de água tratada e são utilizadas para a lavagem dos filtros, como também, alimentam um aquário que fica dentro da área da ETE, Figura 7, além de poder ser reutilizado como água de irrigação. Os excessos do RAT são lançados no córrego. Esse processo não foi considerado neste estudo.

Figura 7 - Área da Estação de Tratamento de Esgoto.



Fonte: Cagece, 2022.

O sistema de amostragem de coleta está instalado em quatro locais diferentes: na caixa de areia, no reator UASB, no filtro submerso aerado e no tanque de contato.

No que diz respeito ao descarte do lodo proveniente do reator UASB, a frequência de descarte é determinada com base em uma idade de lodo de 30 dias. O descarte é conduzido através dos registros localizados no exterior do reator e direcionado para o TAL. Além disso, a eliminação da espuma que se acumula na parte superior do reator é realizada pelo menos duas vezes por semana, utilizando uma válvula apropriada. Quanto ao lodo originado no decantador lamelar, utiliza-se uma idade de lodo de 10 dias, e ele é subsequentemente reintroduzido na estação elevatória de esgoto por recirculação.

O projeto da ETE inclui uma expansão do sistema, que envolverá a implementação de uma unidade adicional de cada um dos seguintes componentes: reator UASB, filtro submerso aerado, decantador lamelar e tanque de contato. A Tabela 1 apresenta as unidades de tratamento com dimensões e tempo de implantação de cada uma.

Tabela 1 - Unidades de tratamento, tempo de implantação e dimensões.

Unidade de Tratamento	Tempo de implantação		Dimensões
	10 anos	20 anos	
UASB	3	(+) 1	D = 4,50 m; H = 5,50 m
FSA	3	(+) 1	D = 4,50 m; H = 4,00 m
DL	3	(+) 1	C = 2,67 m; L = 1,50 m (18 placas)
TC	3	(+) 1	D = 3,20 m; H = 1,00 m
TAL	2	-	D = 3,20 m; H = 2,00 m
FP	1	-	40 placas; 500x500 mm e torta de 30 mm

Fonte: Cagece, 2022.

3.3 Análise estatística dos dados

Primeiramente, os dados de qualidade tanto do esgoto bruto quanto do tratado, foram submetidos a estatística descritiva (média, mediana, desvio padrão, mínimo e máximo) focando nos indicadores mais significativos, que incluem: Coliformes totais, Escherichia coli, Demanda Bioquímica de Oxigênio, Demanda Química de Oxigênio, pH, Sulfeto, Sólidos Sedimentáveis e Sólidos Suspensos Totais.

A análise estatística descritiva dos dados foi conduzida com o propósito de avaliar a tendência central e a dispersão dos dados amostrais. Esse procedimento foi realizado por meio de tabelas, quadros e representações gráficas, visando a compreensão de como os indicadores de qualidade variam ao longo do ciclo hidrológico.

O objetivo principal dessa análise foi favorecer discussões embasadas na legislação vigente na área de estudo, que compreende as resoluções federais e estaduais, a saber, CONAMA nº 430/2011 e COEMA nº 02/2017, respectivamente.

A digitalização dos dados, das tabelas, dos gráficos e os demais procedimentos e análises foi conduzida utilizando o *software* Excel do pacote Microsoft Office versão 2019.

3.4 Avaliação do ciclo de vida na ETE Flecheiras

Nesta pesquisa, a ACV foi aplicada com o objetivo de avaliar a sustentabilidade, desenvolvendo uma análise dos prováveis impactos ambientais, sociais e econômicos mediante a seleção e quantificação de dados de entrada e saída na ETE.

Os procedimentos metodológicos seguiram a Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT NBR 14040 (2014a) - Gestão Ambiental: Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e Estrutura e ABNT NBR ISO 14044 (2014b) - Gestão Ambiental: Avaliação do Ciclo de Vida - Requisitos e Orientações. Composta por quatro fases, a seguir:

3.4.1 Definição de objetivo e escopo

Nessa fase, inicialmente, definiu-se o objetivo, o qual foi avaliar o desempenho em sustentabilidade da ETE de Flecheiras, quantificando os impactos ambientais, sociais e econômicos, atuais e futuros, considerando a fase de operação do sistema.

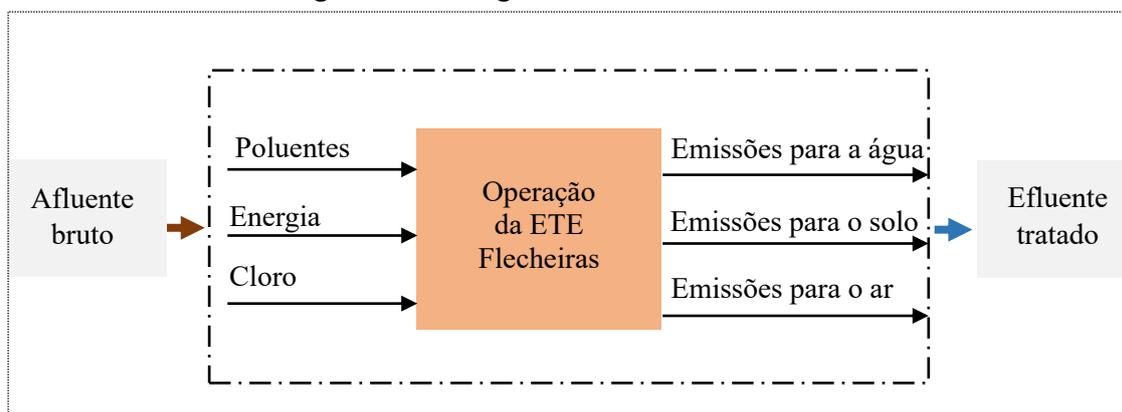
O estudo viabiliza a comparação da ACV em trabalhos semelhantes na área de pesquisa.

Posteriormente, definiu-se o escopo da seguinte forma:

- Sistema estudado – uma ETE composta por três módulos de reatores UASB, cada módulo seguido de filtro submerso aerado, decantador lamelar e tanque de contato para desinfecção (cloração), além de incluir um tratamento avançado.
- Função do sistema – tratar o esgoto bruto para reduzir a carga poluidora e cumprir com os padrões de lançamento requeridos na legislação, de modo a proteger os corpos hídricos receptores do efluente e a balneabilidade das praias.
- Unidade Funcional – definida como o volume de 1 m³ de efluente final tratado. Essa medida está relacionada com os dados de entrada e saída do sistema. Na literatura, essa unidade funcional é recomendada para pesquisas que envolvam dados em escala real, corroborando com os estudos (Hernandez-Padilla *et al.*, 2017; Arashiro *et al.*, 2018; Lopes, 2021; Boldrin; Formiga; Pacca, 2022).

- Fronteira do Sistema – estende-se desde a entrada do esgoto bruto na ETE até a saída do efluente final tratado para o corpo receptor. Os elementos considerados como fluxos de entrada compreendem poluentes, energia e desinfecção com cloro, enquanto os fluxos de saída abrangem as emissões para água, solo e ar (Figura 8).

Figura 8 - Fluxograma da fronteira do sistema.



Neste estudo, a análise da ACV foi conduzida em diferentes cenários:

- O Cenário 1 retrata o sistema atual em 2021, com uma vazão média de 928,80 m³/d e uma população estimada em 5.929 habitantes;
- No Cenário 2, há a projeção futura do sistema para o ano de 2030, prevendo uma vazão média de 1068,77m³/d e uma população estimada em 7.099 habitantes;
- O Cenário 3 representa o encerramento do ciclo de vida da ETE em 2040, prevendo uma vazão média de 1257,98 m³/de uma população estimada em 8.675 habitantes.

A aplicação da ACV nos cenários mencionados, tem como objetivo compreender e avaliar a sustentabilidade da ETE, e, desse modo, fornecer informações para apoiar os gestores nas tomadas de decisão.

3.4.2 Inventário do ciclo de vida

O inventário do ciclo de vida compreendeu a etapa de operação da ETE. Dessa forma, foram empregados dados de vazão, indicadores físico-químicos do esgoto bruto e tratado. Além disso, foram considerados os dados relativos à emissão do metano, consumo de cloro e à utilização de energia. Conforme ilustrado no Quadro 4.

Primeiro, para calcular o inventário do sistema dos parâmetros de qualidade, foram utilizados os valores medianos de entrada e saída da ETE Flecheiras. Esses valores foram calculados com base em relatórios mensais do laboratório central responsável pela análise e controle da ETE. Em seguida, as concentrações medianas de DQO do esgoto bruto e tratado e DBO do esgoto tratado foram multiplicadas pelo volume de esgoto tratado para obter a massa aplicada, em quilogramas (kg), para cada cenário analisado.

Em seguida, foi calculado o inventário do consumo de cloro. Conforme informações do operador da ETE, eles utilizam para desinfecção do efluente, hipoclorito de cálcio, cujo teor de cloro ativo é de 65%. Para o tratamento, diariamente são adicionados 18 kg do produto, o que equivale a 6 kg por bomba dosadora, valores do ano de 2021. Essa quantidade foi determinada com base nas análises de cloro residual livre no efluente final, revelando que dosagens inferiores resultavam na ausência de cloro residual no efluente tratado. Para determinar o consumo de cloro por unidade funcional de 1m^3 , a quantidade do produto químico utilizada foi estimada pelo volume do período. Já os dados do teor de cloro residual foram obtidos das análises laboratoriais e relacionados com a unidade funcional do sistema.

Posteriormente, foi calculado o inventário das emissões de metano, utilizando a equação fornecida pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2019). Realizou-se a conversão da DQO, sendo atribuído um valor padrão de 0,25 kg de CH_4/kg de DQO. Adicionalmente, foi necessário aplicar um fator de correção para o metano, variando entre 0,8 e 1,0, para sistemas de tratamento de águas residuais do tipo reator anaeróbico (UASB). Optou-se, neste estudo, por utilizar um valor de correção de 0,8, conforme indicado como padrão no relatório IPCC.

Para calcular o inventário do consumo de energia da bomba dosadora de substância química, foi considerado a potência do acionador e o tempo de funcionamento de 24 horas por dia.

Após calcular o inventário da ETE foi preciso identificar os fluxos disponíveis na base de dados que estão associados às entradas e saídas. Para realizar esse procedimento, optou-se pelo banco de dados Ecoinvent® 3.7. Em seguida, esses dados consolidados, foram inseridos no *software* OpenLCA versão 1.11, uma ferramenta gratuita e de código aberto da GreenDelta em Berlim, Alemanha.

O Quadro 4 detalha as variáveis estudadas e requeridas para quantificar os fluxos de entrada e saída, ao longo do ciclo de vida da ETE, nos cenários analisados.

Quadro 4 - ICV do sistema de tratamento estudado.

Fluxos	Fluxos no OpenLCA (Ecoinvent 3.7)	Unidade	Fonte
DBO ₅	BOD ₅ , <i>Biochemical oxygen demand</i>	kg	Análises laboratoriais
DQO	COD, <i>Chemical oxygen demand</i>	kg	
Cloro residual	<i>Chlorine</i>	kg	
Cloro	<i>Chlorine</i>	kg	Estimado
Metano	<i>Methane, non-fossil</i>	kg	
Energia	<i>Energy, potential (in hydropower reservoir), converted</i>	kWh	Projeto ETE

3.4.3 Avaliação de impacto do ciclo de vida

A Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) traduz as emissões e extrações de recursos em um conjunto limitado de pontuações de impacto ambiental (Hauschild; Huijbregts, 2015). Esse processo é realizado através do uso de fatores de caracterização, que indicam o impacto ambiental por unidade de estressor, como por exemplo, por quilograma de recurso utilizado ou emissão liberada (Huijbregts *et al.* 2017).

Nessa fase, inicialmente, foram selecionadas as categorias de impacto e a metodologia de avaliação de impacto disponibilizadas no programa OpenLCA. Em seguida, diversas iterações do processo de modelagem foram executadas. No presente estudo, todos os fluxos criados e inseridos no OpenLCA foram modelados de acordo com o método de avaliação de impacto ReCiPe.

Dessa forma, dentre as categorias de impacto disponíveis no método ReCiPe, foram avaliadas: mudanças climáticas (GWP); ecotoxicidade de água doce (FETP); ecotoxicidade marinha (METP); ecotoxicidade terrestre (TETP); toxicidade humana (HTP) e formação de oxidante fotoquímico (POFTP) nas abordagens *midpoint* e *endpoint*, e descritas, resumidamente, a seguir:

- *Mudanças climáticas*

No método ReCiPe, a avaliação de impacto nessa categoria é baseada na quantificação das emissões de GEEs e sua contribuição para o forçamento radiativo, que é

uma medida da capacidade de um gás do efeito estufa reter o calor na atmosfera. Essas emissões são convertidas em um indicador comum, como as equivalentes de dióxido de carbono (CO₂eq), para facilitar a comparação entre diferentes gases.

O Potencial de Aquecimento Global (GWP) é amplamente utilizado como um fator para avaliar o impacto de *midpoint* na mudança climática. De acordo com Rosenbaum *et al.* (2018), o potencial de aquecimento global é calculado para cada GEE, utilizando o cálculo do fator de caracterização, dado pela Equação 1.

$$GWP_i = \frac{\int_0^T a_i \cdot C_i(t) dt}{\int_0^T a_{CO_2} \cdot C_{CO_2}(t) dt} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

T = período de tempo (por exemplo, 20 ou 100 anos);

a_i = força radiativa instantânea por unidade de massa do gás;

$C_i(t)$ = concentração do gás i restante em um tempo t após a emissão;

a_{CO_2} e C_{CO_2} = força radiativa e concentração do CO₂ em um tempo t .

O GWP quantifica a quantidade de forçamento radiativo adicional ao longo do tempo, normalmente medido em 20 ou 100 anos, e são fornecidos diretamente pelo relatório do IPCC (IPCC, 2014). Dessa forma, o potencial de aquecimento global reflete os efeitos conjuntos das diferentes durações em que esses gases permanecem na atmosfera e sua eficácia relativa em causar forçamento radiativo.

▪ *Ecotoxicidade*

No método ReCiPe essa categoria é usada para avaliar os efeitos potenciais de substâncias químicas nos ecossistemas aquáticos e terrestres. Isso ajuda a promover ações mais sustentáveis e reduzir o impacto negativo das atividades humanas sobre a vida selvagem e os ecossistemas.

O potencial de toxicidade (TP), representado em kg equivalentes de 1,4-diclorobenzeno (1,4DCB-eq), é empregado como um fator de caracterização no ponto médio em avaliações de toxicidade humana, ecotoxicidade de água doce, ecotoxicidade marinha e ecotoxicidade terrestre. Conforme Huijbregts *et al.*, (2017) o fator de

caracterização de *midpoint* ecotoxicológico específico do compartimento consiste em dois componentes: fator de destino (FF) e fator de efeito (EF), dado pela Equação 2:

$$ETP_{x,i,j,c} = \sum g \frac{FF_{x,i,j,g,c} \times EF_{x,j,c}}{FF_{DCB,ref,j,g,c} \times EF_{DCB,j,c}} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

$ETP_{x,i,j,c}$ = potencial de toxicidade ecológica para o compartimento receptor j (água doce, marinha ou terrestre) de produtos químicos x emitidos para o compartimento i , transportado para o compartimento receptor j , relacionado à perspectiva cultural c (kg 1,4DCB- eq para água doce para ecotoxicidade de água doce, para água do mar (e oceano) para ecotoxicidade marinha e para solo industrial para ecotoxicidade terrestre /kg).

$FF_{x,i,j,g,c}$ = fator de destino, definido como a mudança marginal na massa de estado estacionário da substância x em um compartimento ambiental j na escala g devido a uma emissão marginal no compartimento i para a perspectiva cultural c (anos).

$EF_{x,j,c}$ = fator de efeito (m^3/kg para ecotoxicidade marinha e de água doce, m^2/kg para ecotoxicidade terrestre), representando a mudança na fração potencialmente desaparecida de espécies devido a uma mudança na concentração ambiental da substância x no compartimento receptor j para perspectiva cultural c .

- *Toxicidade humana*

No método ReCiPe, essa categoria é utilizada para identificar quais substâncias químicas e atividades têm maior potencial de causar danos à saúde humana. Isso auxilia na identificação de áreas onde melhorias podem ser feitas para promover a saúde, segurança e bem-estar das pessoas, adotando medidas de controle de riscos.

O fator de caracterização de *midpoint* toxicológico humano envolve três componentes principais: a fração de ingestão (iF), um fator combinado de efeito e dano (EF) e o fator de caracterização para 1,4-diclorobenzeno. Este fator de caracterização de ponto médio é adaptado às condições do compartimento em que a substância foi liberada, considerando a rota de exposição (oral ou inalatória) e levando em consideração fatores como localização geográfica (continental, moderada, trópica, ártica) e se a substância possui efeitos carcinogênicos ou não carcinogênicos. Todos esses potenciais de toxicidade

são combinados em um único fator geral de caracterização da exposição da população humana à substância x em um determinado compartimento i , conforme descrito na Equação 3, de acordo com Huijbregts *et al.*, (2017).

$$HTP_{i,x,c/nc,c} = \sum_r \sum_g \frac{iF_{x,i,r,g,c} \times EF_{x,r,c/nc,c}}{iF_{DCB,ua,r,g,c} \times EF_{DCB,r,c/nc,c}} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

$HTP_{i,x,c/nc,c}$ = representa o fator de caracterização humana no nível do ponto médio para efeitos cancerígenos ou não cancerígenos de substâncias x para compartimento de emissão i para perspectiva cultural c (kg 1,4DCB para ar urbano eq./kg);

$iF_{x,i,r,g,c}$ = é a fração de ingestão da população humana da substância x na escala geográfica g via rota de ingestão r emitida para o compartimento i para a perspectiva cultural “ c ”.

$EF_{x,r,c/nc,c}$ = é o fator de efeito carcinogênico ou não carcinogênico da substância x para a via de ingestão r relacionada à perspectiva cultural c , refletindo a mudança na incidência de doenças ao longo da vida devido a uma mudança na ingestão da substância e na ingestão rota de interesse.

A exposição química em seres humanos pode ocorrer devido a emissões no meio ambiente que afetam toda a população. Além disso, também pode resultar da presença de diversos ingredientes químicos em produtos liberados durante sua fabricação, uso ou descarte, afetando assim trabalhadores ou consumidores.

- *Formação de oxidante fotoquímico*

No método ReCiPe, para avaliar a influência de substâncias individuais na formação de ozônio, foi introduzido o conceito de potenciais fotoquímicos de criação de ozônio (POCPs), estes, representam reatividades relativas, calculadas para a formação de ozônio em um volume de ar, com o etileno sendo utilizado como substância de referência (Huijbregts *et al.*, 2017).

Para determinar o fator de caracterização *midpoint*, o potencial de formação de ozônio é expresso em termos de compostos orgânicos voláteis não metânicos (NMVOC)

equivalentes por quilograma (NMVOC-eq./kg). Quando se deseja utilizar esses fatores de caracterização para hidrocarbonetos individuais, as abordagens propostas por Van Zelm *et al.*, (2016) e Huijbregts *et al.*, (2017) sugerem a aplicação dos potenciais de criação fotoquímica de ozônio (POCPs) como fatores de ajuste, conforme Equação 4.

$$POFP_x = \frac{POCP_x}{POCP_{NMVOC}} POFP_{NMVOC} \quad \text{Eq. 4}$$

Onde:

$POFP_x$ = formação potencial de criação fotoquímica de ozônio;

$POCP_x$ = indicador de formação de oxidante fotoquímico, expresso em kg de equivalentes de etileno;

$POFP_{NMVOC}$ = POCP médio para compostos orgânicos voláteis não metânicos, expresso em kg de equivalentes de etileno;

$POCP_{NMVOC}$ = formação potencial de criação fotoquímica de ozônio para compostos orgânicos voláteis não metânicos.

3.5 Propostas de melhorias para plano de gestão sustentável

Para desenvolver propostas de melhorias e aprimorar a gestão sustentável da ETE Flecheiras, que já opera com recursos avançados de tratamento, inicialmente, realizou-se uma revisão da literatura para identificar as práticas de aprimoramento adotadas por outras ETES, visando promover uma maior sustentabilidade. Nesse contexto, foram identificados elementos como: o cumprimento dos padrões legais com redução dos custos de manutenção e operação, diminuição do consumo de energia, minimização da geração de resíduos sólidos e a recuperação de recursos provenientes do esgoto (Bressani-Ribeiro *et al.*, 2019; Faragò *et al.*, 2021; Nair K.; Manu; Azhoni, 2021; Silva, 2023).

Entre esses processos, destaca-se na ETE Flecheiras a recuperação de recursos, incluindo o aproveitamento do biogás para geração de energia e a utilização do lodo na redução dos resíduos gerados pela estação, alinhando-se assim aos princípios da economia circular. Para demonstrar o potencial de maior sustentabilidade operacional da ETE Flecheiras, foram realizadas estimativas para a produção de lodo e biogás.

A estimativa da produção de lodo proveniente do reator UASB e do filtro submerso aerado, com base nos dados do projeto da ETE, foi calculada empregando os seguintes procedimentos e equações:

- Calcular as cargas de DQO e DBO afluente aplicadas à ETE.

$$CDQO_{apl} = DQO_{afluente} \times Q_{med} \quad \text{Eq. 5a}$$

Em que:

$CDQO_{apl}$ = Carga de DQO aplicada ao sistema (kgDQO/d)

$DQO_{afluente}$ = Concentração de DQO (kg/m³)

Q_{med} = Vazão média de projeto (m³/d).

$$CDBO_{apl} = DBO_{afluente} \times Q_{med} \quad \text{Eq. 5b}$$

Em que:

$CDBO_{apl}$ = Carga de DBO aplicada ao sistema (kgDBO/d)

$DBO_{afluente}$ = Concentração de DBO (kg/m³)

Q_{med} = Vazão média de projeto (m³/d).

Nota: Os registros das análises dos indicadores de qualidade da ETE não contemplam a medição da DBO na entrada da ETE. Dessa forma, esse valor foi estimado como sendo igual a 50% do valor da DQO afluente.

Produção de lodo no reator UASB

- Calcular a produção de lodo no reator UASB.

$$P_{lodoUASB} = CDQO_{apl} \times Y_{UASB} \quad \text{Eq. 6}$$

Em que:

$P_{lodoUASB}$ = Produção de lodo no reator UASB (kgSST/d)

$CDQO_{apl}$ = Carga de DQO aplicada ao sistema (kgDQO/d)

Y_{UASB} = Coeficiente de produção de sólidos UASB (kgSST/kgDQO_{apl})

Nota: O coeficiente de produção de sólidos no UASB (Y_{UASB}) foi considerado 0,15 kgSST/kgDQO_{apl} dados do projeto da ETE.

- Calcular a produção volumétrica de lodo, no reator UASB.

$$V_{lodoUASB} = \frac{P_{lodoUASB}}{\gamma_{lodo} \times C_{lodo}} \quad \text{Eq. 7}$$

Em que:

$V_{lodoUASB}$ = Volume de lodo no reator UASB (m³)

$P_{lodoUASB}$ = Produção de lodo no reator UASB (kgSST/d)

γ_{lodo} = Densidade do lodo (kgSST/m³)

C_{lodo} = Concentração do lodo (%)

Produção de lodo no Filtro Submerso Aerado

- Calcular a carga de lodo aplicada ao FSA.

$$CDBO_{aplFSA} = \frac{(100 - E_{DBOUASB})}{100} \times CDBO_{apl} \quad \text{Eq. 8}$$

Em que:

$CDBO_{aplFSA}$ = Carga afluyente de DBO aplicada ao FSA (kgDBO/d)

E_{DBO} = Eficiência de remoção de DBO (%)

$CDBO_{apl}$ = Carga de DBO aplicada (kgDBO/d)

- Calcular a produção de lodo no FSA

$$P_{lodoFSA} = CDBO_{aplFSA} \times Y_{FSA} \quad \text{Eq. 9}$$

Em que:

$P_{lodoFSA}$ = Produção de lodo no FSA (kgSST/d)

$CDBO_{aplFSA}$ = Carga afluyente de DBO aplicada ao FSA (kgDBO/d)

Y_{FSA} = Coeficiente de produção de sólidos no FSA (kgSST/kgDBO_{apl})

Nota: O coeficiente de produção de sólidos no FSA (Y_{FSA}) foi considerado 0,75 kgSST/kgDBO_{apl} dados do projeto da ETE.

- Calcular a produção de lodo volátil no FSA

$$P_{lvFSA} = P_{lodoFSA} \times T_{SV} \quad \text{Eq. 10}$$

Em que:

P_{lvFSA} = Produção de lodo volátil (kgSSV/d)

$P_{lodoFSA}$ = Produção de lodo no FSA (kgSST/d)

T_{SV} = Teor de sólidos voláteis UASB (%)

Lodo removido do sistema

- Calcular a carga de SSV lançada pelo filtro e removida no UASB

$$CSSV_{UASB} = P_{lvFSA} \times R_{SSVUASB} \quad \text{Eq. 11}$$

Em que:

$CSSV_{UASB}$ = Carga de SSV removida no UASB (kgSSV/d)

P_{lvFSA} = Produção de lodo volátil (kgSSV/d)

$R_{SSVUASB}$ = Remoção de SSV no reator UASB (%)

- Calcular a carga de SSV retirada do UASB (carga aplicada – carga removida)

$$C_{retiradaUASB} = P_{lvFSA} - CSSV_{UASB} \quad \text{Eq. 12}$$

Em que:

$C_{retiradaUASB}$ = Carga retirada do UASB (kgSSV/d)

P_{lvFSA} = Produção de lodo volátil no FSA (kgSSV/d)

$CSSV_{UASB}$ = Carga de SSV removida no UASB (kgSSV/d)

- Calcular a produção de sólidos fixos.

$$P_{SF} = P_{lodoFSA} - P_{lvFSA} \quad \text{Eq. 13}$$

Em que:

P_{SF} = Produção de sólidos fixos (kgSSF/d)

$P_{lodoFSA}$ = Produção de lodo no FSA (kgSST/d)

P_{lvFSA} = Produção de lodo volátil no FSA (kgSSV/d)

Por último, foi calculada a carga total de lodo retirada do sistema, utilizando a equação 14, a qual representa a soma da carga de sólidos suspensos voláteis do UASB com a produção de sólidos fixos do FSA.

$$C_{Totalretirada} = C_{retiradaUASB} + P_{SF} \quad \text{Eq. 14}$$

Em que:

$C_{Totalretirada}$ = Carga total de lodo retirada do sistema (kgSST/d)

$C_{retiradaUASB}$ = Carga retirada do UASB (kgSSV/d)

P_{SF} = Produção de sólidos fixos (kgSSF/d)

Posteriormente, o *software* ProBio 1.0, resultado de uma colaboração técnica e científica entre a Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar) e a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), foi utilizado para avaliar o potencial energético disponível no biogás. Este programa foi desenvolvido especificamente para calcular a produção estimada de biogás em reatores UASB, usados no tratamento de esgotos.

Dentro do programa é possível obter uma “Análise rápida” ou uma “Análise detalhada” da produção estimada de biogás. Para este trabalho, optou-se por realizar uma análise detalhada devido ao maior número de parâmetros que o programa é capaz de analisar. Em seguida, os dados reais do ano de 2021, de vazão afluyente (m³/dia) e DQO afluyente (mg/L) foram inseridos no programa. Adicionalmente, é preciso escolher o cenário de estimativa, entre os três disponíveis, foi escolhido o cenário típico, pois, são utilizadas condições intermediárias de estimativas.

Cada cenário resulta em potenciais distintos de recuperação de CH₄, e estão melhor descritos a seguir:

1. *Melhor cenário*: o potencial energético é maior, ocorre em sistemas que operam com esgoto mais concentrado, concentrações mais baixas de SO₄, maior eficiência na remoção de DQO e menores taxas de perda de CH₄.
2. *Pior cenário*: o potencial energético é menor, ocorre em sistemas que operam com esgoto mais diluído, concentrações mais elevadas de sulfato (SO₄), menor eficiência na remoção de DQO e maiores taxas de perda de CH₄.
3. *Típico cenário*: para a situação típica, são utilizados valores intermediários para os parâmetros mencionados anteriormente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos foram divididos em três tópicos principais: o primeiro conjunto de análises mostra a avaliação do desempenho operacional da estação de tratamento de esgoto, utilizando a estatística descritiva; o segundo grupo de avaliações apresenta a análise dos potenciais impactos nas dimensões ambiental, econômica e social, por meio da avaliação do ciclo de vida; por fim, o terceiro conjunto de resultados abordou propostas de melhorias para a formulação de um plano de gestão sustentável para a ETE.

4.1 Dados de qualidade do objeto de estudo

4.1.1 Estatística descritiva das variáveis de qualidade da ETE Flecheiras

Os parâmetros estatísticos descritivos (mínimo, máximo, média, mediana, desvio padrão e tamanho amostral) das variáveis de qualidade estão apresentados nas Tabelas 2 e 3, referentes aos dados de afluente bruto e efluente tratado, respectivamente.

Tabela 2 - Parâmetros estatísticos descritivos das variáveis do afluente bruto.

Variáveis	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio Padrão	n
Coliformes totais (NMP/100 mL)	2,4E+04	2,4E+09	5,3E+08	2,4E+07	1,0E+09	14
Escherichia coli (NMP/100 mL)	5,4E+06	2,0E+09	4,0E+08	1,5E+07	7,8E+08	14
DQO (mg/L)	115	888	383	363	227	14
pH	7,2	7,9	7,6	7,6	0,2	14
Sulfeto (mg/L)	0,5	2,9	1,1	0,7	0,8	13
Sólidos sedimentáveis (mL/L)	0,5	7,0	2,7	2,5	1,7	13
Sólidos suspensos totais (mg/L)	80	220	150	160	49	14

Fonte: Cagece (2021).

Nota: n – Tamanho amostral

Tabela 3 - Parâmetros estatísticos descritivos das variáveis do efluente tratado.

Variáveis	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio Padrão	n
Coliformes totais (NMP/100 mL)	1,0E+02	2,4E+05	1,1E+05	3,6E+04	1,0E+05	16
Escherichia coli (NMP/100 mL)	1,0E+02	2,4E+05	4,4E+04	1,2E+04	6,9E+04	16
DBO (mg/L)	3	36	12	10	9	14
DQO (mg/L)	18	317	78	62	73	16
Oxigênio dissolvido (mg/L)	0,7	8,6	4,0	4,2	1,8	13
pH	7,4	8,0	7,7	7,8	0,2	16
Sulfeto (mg/L)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,0	13
Sólidos sedimentáveis (mL/L)	0,5	1,5	0,6	0,5	0,3	13
Sólidos suspensos totais (mg/L)	2	23	6	3	7	16

Fonte: Cagece (2021).

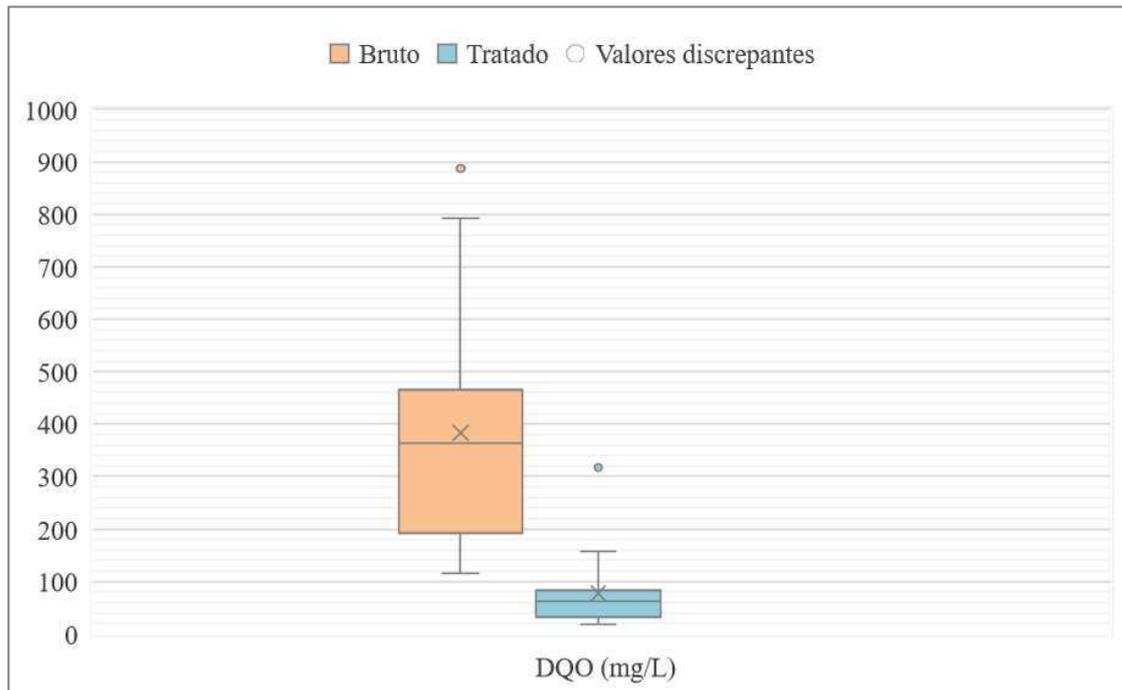
Nota: n – Tamanho amostral

Para a análise das variáveis de qualidade da estação de tratamento de esgoto, foram utilizados os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA n° 430/2011, emitida pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente, que estabelece as condições e padrões para o lançamento de efluentes e que complementa e modifica a Resolução n° 357/2005. Além disso, a Resolução COEMA n° 02/2017, emitida pelo Conselho Estadual do Meio Ambiente do Ceará, que define os padrões e condições para o lançamento de efluentes líquidos originados de fontes poluentes, também foi levada em consideração.

▪ *Matéria orgânica – DQO e DBO*

Na Figura 9, são exibidas as concentrações de DQO tanto para o esgoto bruto quanto para o tratado. Nota-se que o esgoto bruto exibe uma mediana de 363 mg/L, com um valor extremo atingindo 888 mg/L. Em contrapartida, o esgoto tratado apresenta uma mediana de 62 mg/L de DQO, com um valor máximo atingindo 317 mg/L.

Figura 9 - *Box Plot* da concentração de DQO no esgoto antes e após o tratamento.



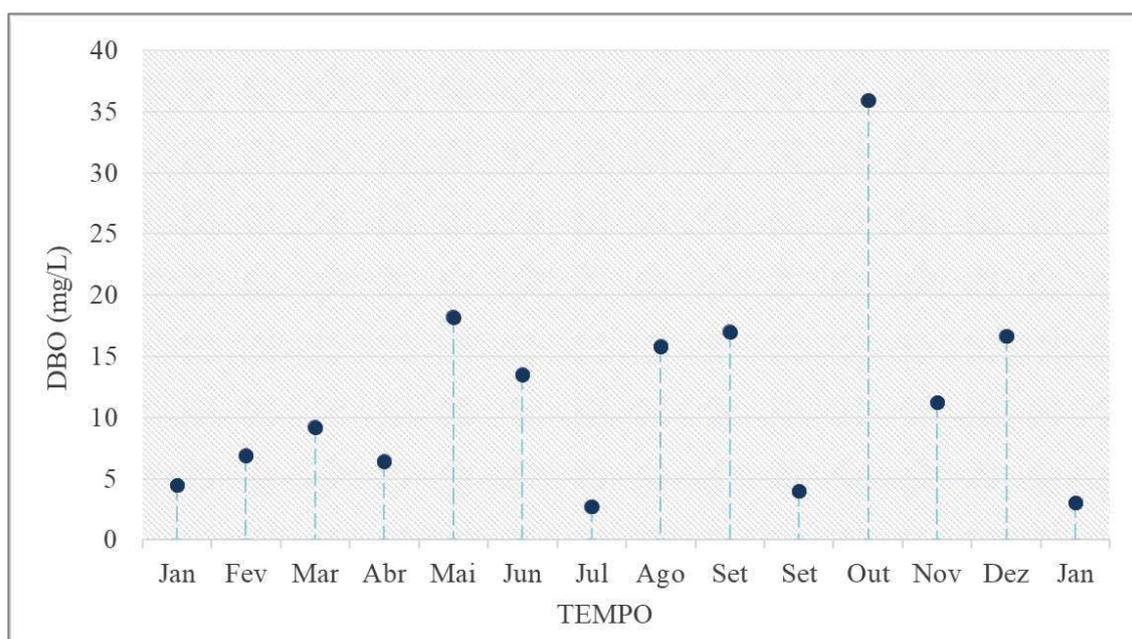
A eficiência do sistema é um parâmetro fundamental em projetos que abordam o tratamento de efluentes. Na ETE Flecheiras, a eficiência esperada em projeto (96,7% para a DQO), atingiu 83% para a DQO, entre janeiro de 2021 e janeiro de 2022. Todavia, esse valor está em consonância com os resultados de outros estudos (Ribeiro; Silva, 2018; Freire *et al.*, 2020) realizados em sistemas de configurações semelhantes.

No estudo realizado por Ribeiro e Silva (2018), uma ETE composta por reator UASB, seguido por filtro submerso aerado (FSA), localizada no município de Uru, São Paulo, Brasil, foi investigada. Os pesquisadores concluíram que esse sistema se mostrou uma alternativa viável para o tratamento de efluentes em pequenas comunidades, apresentando boa eficiência, com valores médios de remoção de DQO em 85%.

No estudo de caso conduzido por Freire *et al.*, (2020) também foi realizada uma análise do desempenho de uma estação de tratamento de esgoto (UASB+FSA) localizada no Estado do Ceará, denominada ETE José Euclides Ferreira Gomes. Essa estação foi projetada para atender uma população de 11.968 habitantes, com uma vazão média de 14,71 l/s. Os pesquisadores consideraram que o sistema apresentou uma eficiência de remoção de matéria orgânica de 89,54% de DQO, o que indica uma elevada eficiência.

A Figura 10 ilustra a dispersão das concentrações de DBO no esgoto tratado, ao longo do período analisado.

Figura 10 - Dispersão da concentração de DBO no esgoto tratado.



De acordo com a Resolução COEMA nº 02/2017, a demanda bioquímica de oxigênio permitida para o lançamento dos efluentes no corpo hídrico é de 120 mg/L, igualmente previsto na Resolução CONAMA 430/2011 a nível federal. Todavia, este limite somente poderá ser ultrapassado no caso do efluente em sistema de tratamento com eficiência de remoção mínima de 60% de DBO, ou mediante estudo de autodepuração do corpo hídrico que comprove atendimento às metas do enquadramento do corpo receptor.

A demanda bioquímica de oxigênio apresenta mediana de 10 mg/L do efluente tratado, os valores de concentração desse indicador variam de 4 a 18 mg/L exibindo um único outlier de 36 mg/L no mês de outubro/2021, isso mostra que a eficiência do tratamento da matéria orgânica é elevada, se enquadrando nos limites estabelecidos nas Resoluções CONAMA 430/11 e COEMA 02/2017.

As menores concentrações para os indicadores de matéria orgânica, no efluente tratado, registradas no ano de 2021 foram nos meses de janeiro (18 mg/L de DQO) e julho (3 mg/L de DBO), valores que correspondem com o esperado para o sistema de tratamento e podem ser atribuídos à ocorrência de chuvas e movimentação de turistas na área, o que resulta em um aumento na vazão e, conseqüentemente, na diluição do efluente.

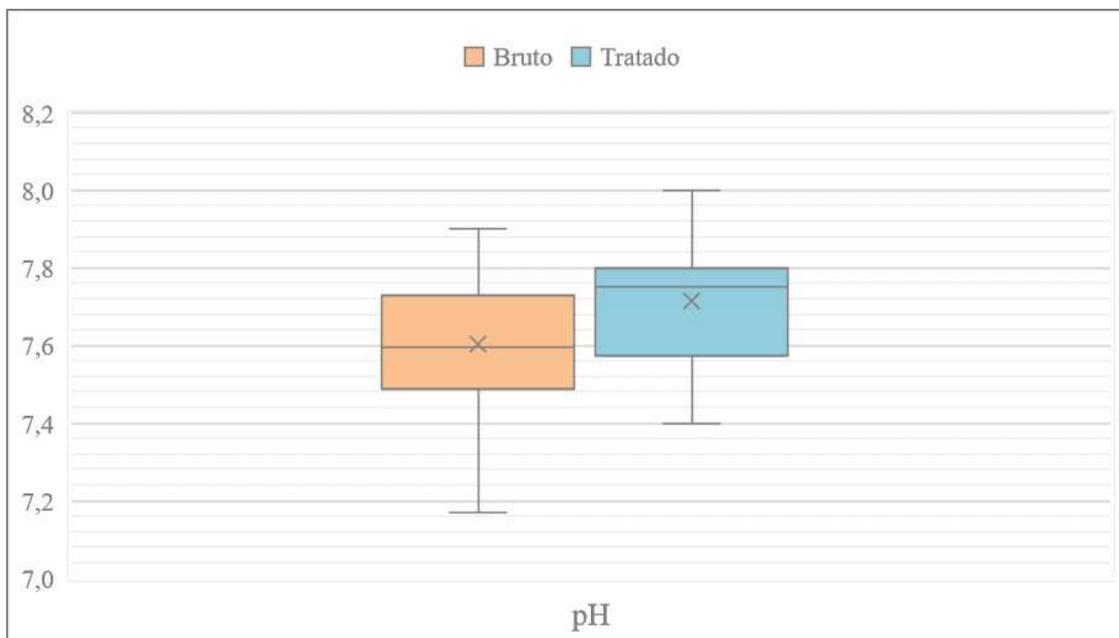
No Brasil, o período de alta temporada é referente aos meses de dezembro, janeiro e julho (Guimarães; Noia; Santo, 2019) dessa forma, consideramos que os demais meses do ano são época de menor movimento de turistas de veraneio. Em ambos os períodos, verifica-se uma pequena variação nas concentrações de matéria orgânica ao longo do ano.

- *pH*

O potencial hidrogeniônico (pH) é um indicador importante no monitoramento e controle das operações em estações de tratamento, especialmente na digestão anaeróbia e nos processos oxidativos (Jordão; Pessôa, 2017). Para a existência de vida aquática nos corpos d'água, requer-se uma faixa de pH de 5 a 9, de acordo com os limites propostos nas resoluções estadual e federal.

A Figura 11 apresenta o comportamento do pH afluente e efluente do esgoto da estação de tratamento de Flecheiras/CE.

Figura 11 - *Box Plot* da variável pH no esgoto antes e após o tratamento.



De acordo com Chernicharo (2016), é recomendado evitar valores de pH abaixo de 6,0 e acima de 8,3, uma vez que esses extremos podem inibir a atividade dos microrganismos, perturbar o equilíbrio ácido-base do processo e, conseqüentemente, comprometer a estabilidade do meio aquático.

Por conta das influências diretas sobre a atividade microbiana, manter um controle adequado do pH torna-se necessário para a estabilidade do processo de digestão anaeróbia. Os microrganismos metanogênicos, são particularmente sensíveis às variações de pH no sistema, influenciando na eficiência da produção de CH₄ (Gameiro *et al.*, 2021).

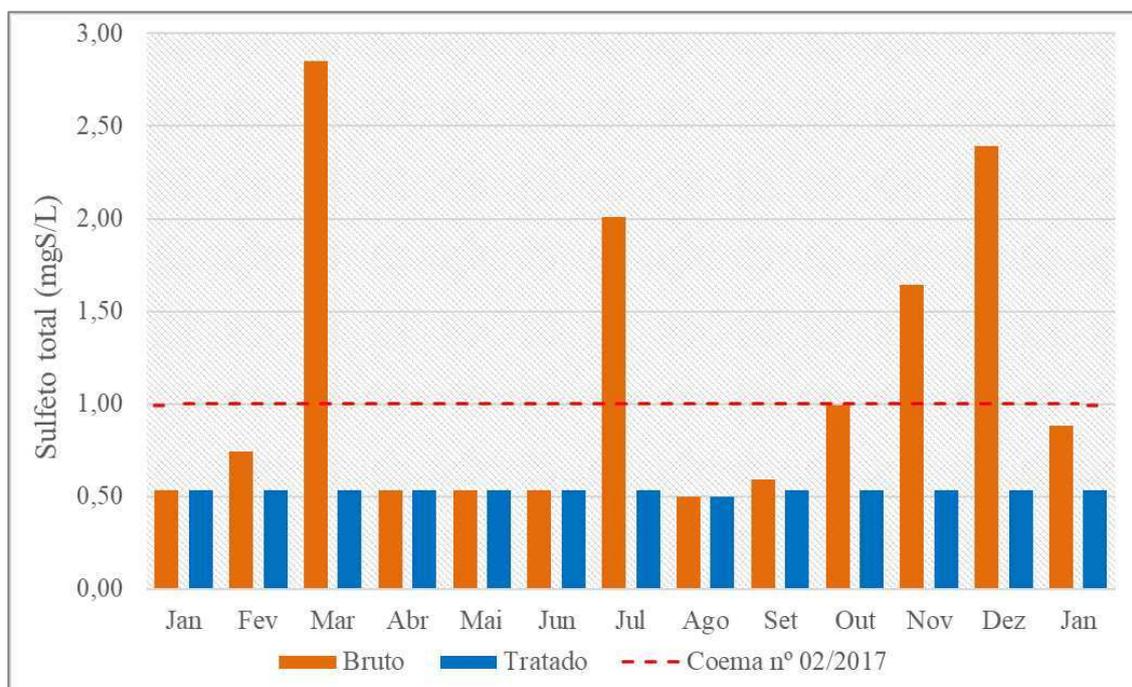
Na ETE Flecheiras o pH variou de 7,5 a 8,0, no efluente tratado, permanecendo dentro dos limites estabelecidos pela COEMA 02/2017. Os valores finais desse indicador são condizentes com os resultados obtidos no estudo de Freire *et al.*, (2020) que avaliou uma estação de tratamento de esgoto no período de novembro/2017 a julho/2018 observando a estatística descritiva do pH que obteve os seguintes valores: mínimo 7,12; máximo 8,09; mediana 7,85 e média de 7,73.

- *Sulfeto*

O principal subproduto da sulfetogênese é o sulfeto, que pode estar dissolvido ou na forma de gás sulfídrico, sendo extremamente tóxico para os microrganismos e para seres humanos (Jordão; Pessoa, 2011). Além disso, altas concentrações de sulfeto de hidrogênio (H₂S), podem resultar em odor forte, bem como apresentar corrosividade, toxicidade e eventuais problemas ocupacionais quando acima do limite permitido pela legislação (Augusto; Calheiros; Carvalho, 2017; Possetti *et al.* 2018; Freitas; Daniel, 2023).

As concentrações de sulfeto total foram monitoradas no esgoto afluente e efluente e são apresentadas na Figura 12.

Figura 12 - Comportamento do sulfeto total no esgoto antes e após o tratamento.



As Resoluções COEMA nº 02/2017 e CONAMA 430/2011 estabelecem o valor máximo permitido (VMP) para que o sulfeto seja lançado em um corpo hídrico de até 1 mgS/L. Como ilustrado na Figura 12, não há variação nos resultados de efluente tratado para o indicador sulfeto analisado, de forma que, o desvio padrão e o coeficiente de variação são nulos.

O controle adequado do sulfeto é essencial para garantir um funcionamento eficiente e ambientalmente responsável dos sistemas de tratamento de esgoto. A ETE Flecheiras apresentou eficiência de remoção média de 30%, e todas as análises do efluente final se enquadram dentro dos limites estabelecidos na legislação.

- *Sólidos suspensos totais e sólidos sedimentáveis*

De acordo com Jordão e Pessôa (2017), embora a presença de sólidos no esgoto constitua apenas uma parte muito pequena, uma vez separados na estação de tratamento, eles podem representar uma quantidade significativa, cuja destinação final pode ser difícil ou complexa, e isso tem potenciais implicações ambientais.

Conforme mencionado por Freire (2021), a presença de sólidos suspensos totais (SST) no esgoto pode criar dificuldades no processo de desinfecção, favorecendo a sobrevivência de patógenos durante essa etapa. Além disso, os SST podem causar alterações na cor e turbidez do corpo receptor, prejudicando a fotossíntese e possibilitando a liberação de metais e outras substâncias tóxicas nos mananciais.

Os sólidos sedimentáveis (SSed) são um indicador relevante tanto para o controle operacional das estações de tratamento de esgoto, quanto para a avaliação da qualidade dos efluentes que são descarregados nos corpos d'água. Eles indicam a capacidade de sedimentação de todo o material sólido contido na massa líquida e estão sujeitos a limites estabelecidos por legislações estaduais e federais (Jordão; Pessôa, 2017).

Na Tabela 4 podem ser observados valores de concentrações de sólidos típicos para diferentes condições de esgoto sanitário.

Tabela 4 - Concentrações típicas de sólidos no esgoto bruto.

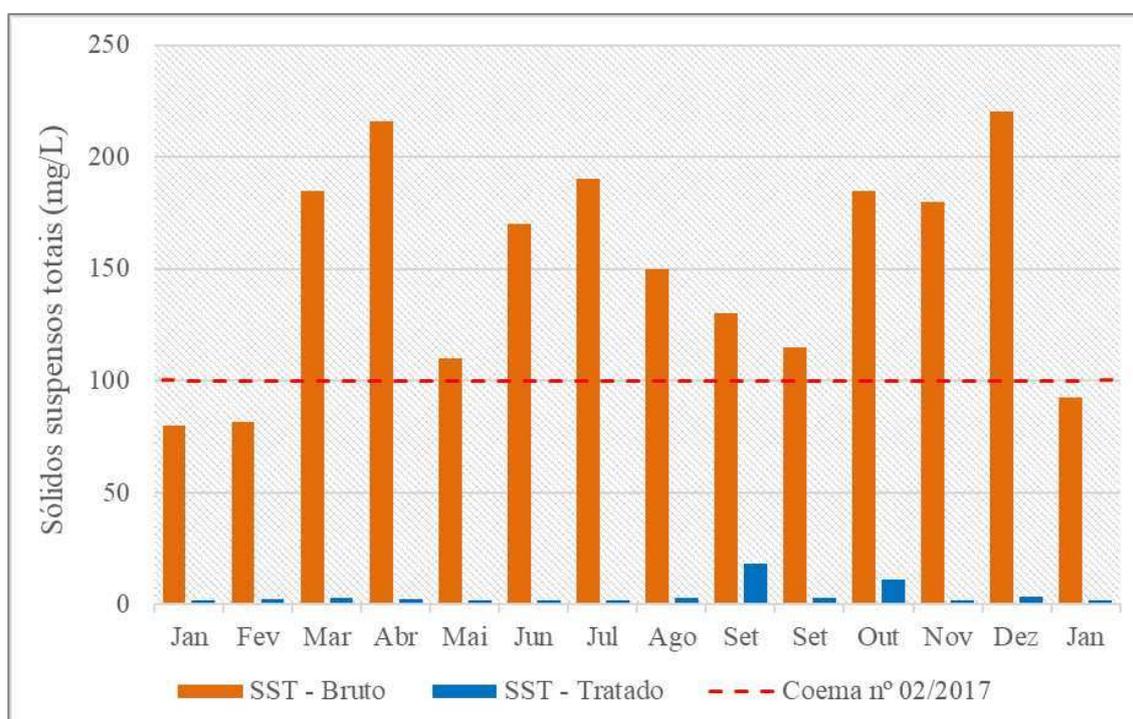
Matéria Sólida	Concentrações		
	Forte	Médio	Fraco
Sólidos Suspensos Totais (mg/L)	360	230	120
Sólidos Sedimentáveis (mL/L)	20	10	5

Fonte: Adaptado de Jordão e Pessôa (2017).

Os resultados das análises laboratoriais das variáveis SST e SSed demonstraram que o esgoto bruto da ETE Flecheiras apresenta concentrações típicas de esgoto fraco segundo a classificação de Jordão e Pessôa (2017) apresentada na Tabela 4.

A Figura 13 ilustra os valores de sólidos suspensos totais no período de janeiro de 2021 a janeiro de 2022; as Resoluções limitam o valor de SST para lançamentos, até 150 mg/L para efluentes de lagoas de estabilização e até 100 mg/L para efluentes de outras tecnologias.

Figura 13 - Comportamento do SST no esgoto antes e após o tratamento.



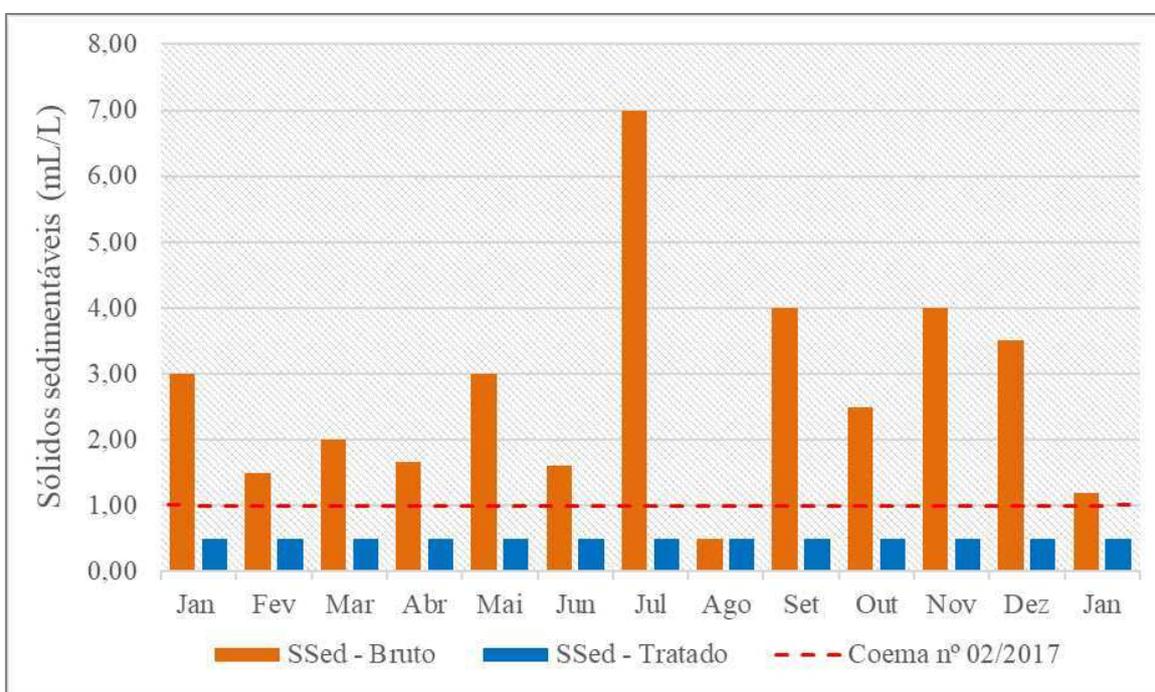
Os valores de SST no período observado variaram entre 80,0 e 220,0 mg/L no esgoto bruto e de 2,0 a 4,0 mg/L no esgoto tratado. Ao analisar a série temporal desta variável (Figura 13), observa-se uma eficiência de remoção de 98%.

Os resultados obtidos corroboram com o estudo realizado por Abou-Elela; Fawzy; El-Gendy (2015), que avaliaram o desempenho de um reator anaeróbio de manta de lodo seguido de um filtro biológico aerado no tratamento de efluentes municipais para reuso. Os resultados demonstraram que o sistema alcançou reduções sustentáveis e satisfatórias nos sólidos suspensos totais, com valores residuais correspondentes de 10,38 mg/L e remoções percentuais médias de 95%.

Como também, Bueno *et al.*, (2020) que analisaram um sistema híbrido com reator UASB, porém com *wetlands* construídos e obtiveram uma eficiência significativa (98,4%) de remoção de sólidos suspensos totais.

Na Figura 14 verifica-se a série temporal do indicador sólidos sedimentáveis. As resoluções CONAMA nº 430/2011 e COEMA nº 02/2017 estabelecem para lançamento em corpos hídricos o valor de 1mL/L para materiais sedimentáveis.

Figura 14 - Comportamento do SSed no esgoto antes e após o tratamento.



Com base na Figura 14, pode-se observar que, em todos os meses analisados, os valores dos sólidos sedimentáveis na estação em estudo foram significativamente inferiores aos requisitos estabelecidos pela legislação estadual. Em outras palavras, ao longo dos

meses, os valores desse indicador foram aproximadamente a metade do limite estipulado pela legislação. Isso indica que houve uma consistente redução nas concentrações do efluente tratado ao longo do período analisado.

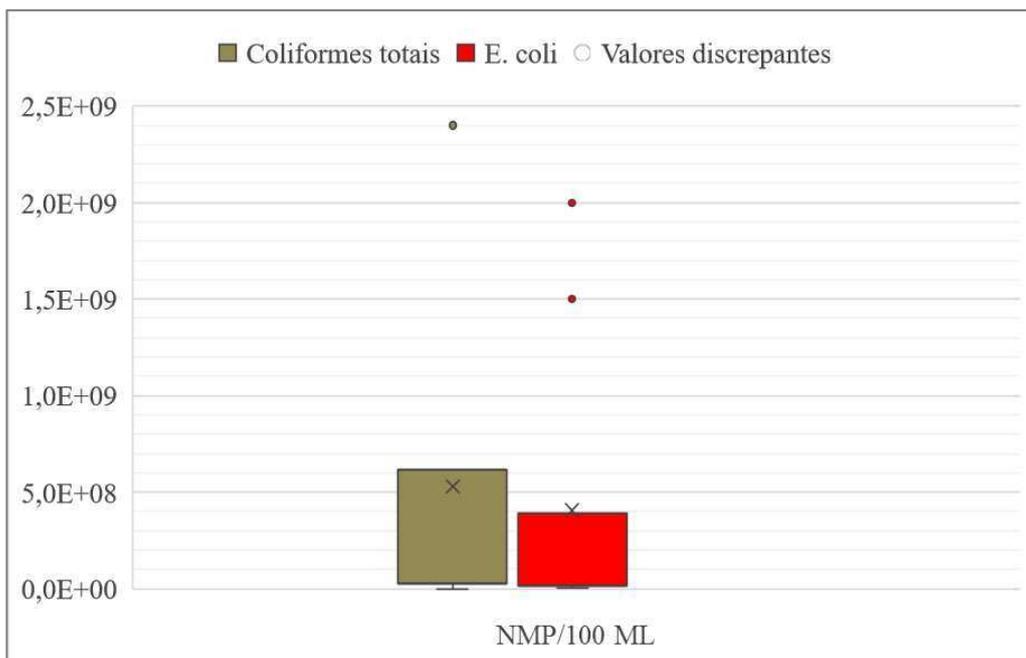
- *Coliformes totais e E.coli*

Para a detecção de microrganismos no esgoto, é comum utilizar a concentração de coliformes. Embora as bactérias do grupo coliforme em si não representem um risco para a saúde humana, elas são frequentemente mais resistentes do que os microrganismos patogênicos. Por esse motivo, os coliformes são considerados um bom indicador de adequação sanitária (Hunt, 2013; Freire, 2021).

Segundo Metcalf e Eddy (2016), o grupo de coliformes totais inclui quatro gêneros na família Enterobacteriaceae: Escherichia, Citrobacter, Enterobacter e Klebisella. De todo o grupo, o gênero Escherichia (E. coli) aparenta ser o melhor representante de contaminação fecal. Ainda de acordo com os autores, os valores típicos de concentração em esgoto bruto desses organismos são: $10^7 - 10^9$ NMP/100mL para coliformes totais, e $10^5 - 10^7$ NMP/100mL para E. coli.

A Figura 15 ilustra a distribuição de ambos os indicadores no afluente da ETE Flecheiras, estando seus valores nas faixas referidas.

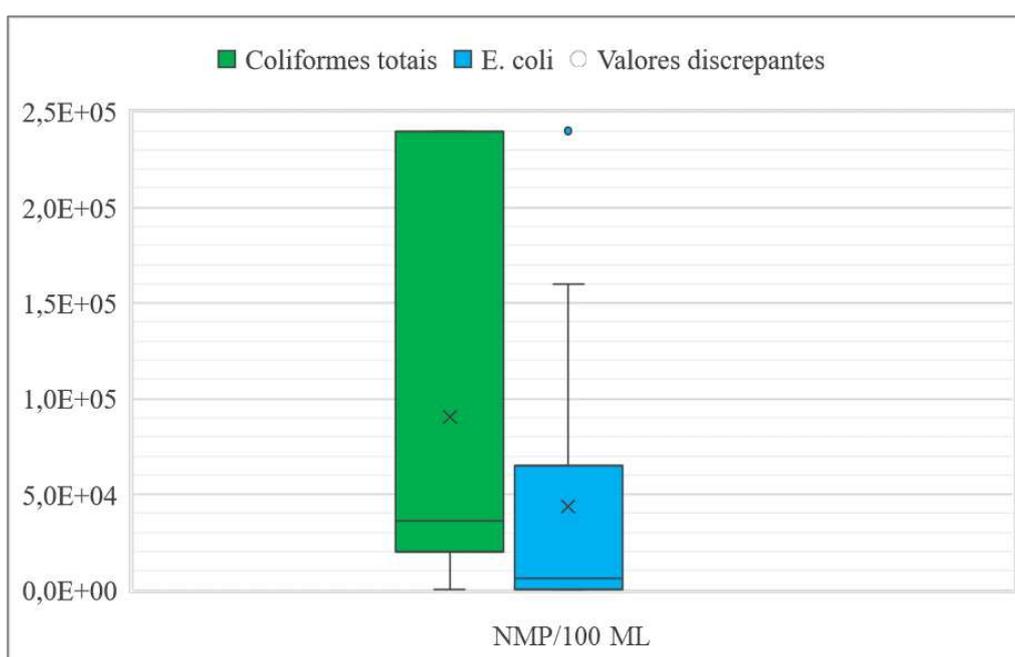
Figura 15 - *Box Plot* das variáveis coliformes totais e E. coli do esgoto bruto.



As legislações estaduais e federais limitam as concentrações de coliformes e *E. coli* para o lançamento de efluentes tratados. Para coliformes termotolerantes o VMP é 5000 NMP/100ml.

É importante observar que coliformes termotolerantes incluem gêneros de bactérias coliformes historicamente relacionados à contaminação por fezes. A Figura 16 ilustra a distribuição de coliformes totais e *E. coli* no efluente tratado, devendo ser destacado que, até mesmo *E. coli*, indicador exclusivamente fecal, apresentou concentrações superiores ao referido VMP em 50% dos dados analisados.

Figura 16 - *Box Plot* das variáveis coliformes totais e *E. coli* do esgoto tratado.



Entretanto, apesar da não conformidade à legislação, as remoções de coliformes totais e *E. coli* na ETE foram estimadas em 99,85 % para os coliformes e 99,92% para *E. coli*.

Em um estudo realizado por Biswas e Chakraborty (2023), num sistema híbrido (UASB+ *Wetlands*) com foco na remoção de matéria orgânica e coliformes fecais, foram alcançadas remoções médias de coliformes fecais e coliformes totais superiores a 99%.

No estudo realizado por Balogun e Ogwueleka (2021), na Nigéria, entre 2013 e 2017, em uma estação de tratamento de águas residuais que empregava o processo de lodo ativado, apresentou uma notável melhoria na eficiência de remoção de coliformes totais e

E. coli. No ano de 2017, foram alcançadas taxas de remoção que atingiram 99,98% para coliformes totais e 99,7% para E. coli.

As concentrações das variáveis no esgoto tratado não alcançaram o desempenho previsto no projeto da estação. Recomenda-se uma revisão do sistema de tratamento, com foco na etapa de desinfecção, monitoramento mais rigoroso, ajustes nas condições operacionais e avaliação da substituição do desinfetante. Além disso, é importante realizar manutenções preventivas para garantir o bom funcionamento da ETE.

Contudo, a COEMA nº02/2017 apresenta a partir do seu Art. 36 as condições e padrões para reuso, admitindo limites de coliformes termotolerantes para cada modalidade de reuso como mostra o Quadro 5.

Quadro 5 - Condições e padrões para reuso de efluente.

Modalidades de reuso	Parâmetro
	Coliformes termotolerantes
Art. 38 - Para fins urbanos	Até 5000 CT/100 mL
Art. 39 - Para fins agrícolas e florestais	a) Culturas a serem consumidas cruas: Não Detectado – ND b) as demais culturas até 1000 CT/100 mL
Art. 40 - Para fins ambientais	Até 10.000 CT/100 mL
Art. 41 - Para fins de aquicultura	Até 1000 CT/100 mL

Fonte: Adaptado da resolução COEMA nº02/2017.

Nota: CT – Coliformes termotolerantes

Avaliando a possibilidade de reutilização do efluente tratado de acordo com o Artigo 40 da COEMA nº 02/2017, é evidente que, durante a maior parte do período analisado (9 meses), os níveis de coliformes totais estão em conformidade com os padrões permitidos no Art.40. Dessa forma, é viável utilizar esse efluente de maneira ambientalmente responsável, ou seja, empregar água de reuso para apoiar a execução de projetos de restauração do meio ambiente.

Para a prática de atividades recreativas que envolvam contato primário com a água, como em praias, rios ou lagos, onde ocorre o contato físico direto com a água, por exemplo, na área turística em estudo, é de extrema importância estar em conformidade com os critérios de qualidade de balneabilidade estabelecidos na Resolução CONAMA nº 274/2000.

4.2 Avaliação do ciclo de vida do sistema de tratamento da ETE Flecheiras

4.2.1 Inventário do ciclo de vida da ETE Flecheiras

A fase mais exigente e demorada da ACV, em comparação com as outras etapas, é a elaboração do inventário do sistema (Claudino; Talamini, 2013). Para compilar este inventário, foi essencial conduzir uma análise minuciosa dos dados do projeto da ETE, realizar visita *in loco* e coletar informações junto aos responsáveis e operadores da estação. Todos esses elementos foram devidamente considerados durante o processo de catalogação dos fluxos de entrada e saída da ETE.

Após a elaboração do inventário, os fluxos de entrada e saída foram inseridos no *software* OpenLCA. Durante o processo de modelagem, o programa organiza os dados inseridos, os distribui nas categorias de impacto específicas do método de avaliação de impacto escolhido e realiza a caracterização. Na caracterização, os dados do inventário são multiplicados por fatores de equivalência correspondentes a cada categoria de impacto.

Neste estudo, o método de avaliação ReCiPe foi empregado, tanto na abordagem *midpoint* quanto *endpoint*, ambas fundamentadas na caracterização sob a perspectiva hierarquista. A Tabela 5 apresenta os detalhes do inventário para a ACV ambiental, social e econômica da ETE, nos cenários estudados.

Tabela 5 - Inventário para a Avaliação do Ciclo de Vida da ETE.

Fluxos	Unidade	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
		ENTRADAS		
DQO	kg	337	388	457
Metano	kg	67,4	77,6	91,4
Cloro	kg	8,9	10,3	12,1
Energia da bomba dosadora	kWh	2,2	2,2	2,9
		SAÍDAS		
DBO	kg	9	11	13
DQO	kg	58	66	77
Metano	kg	11,6	13,2	15,5
Cloro residual	kg	0,46	0,53	0,63

4.2.2 ACV da dimensão ambiental da ETE Flecheiras

No contexto da avaliação do ciclo de vida na dimensão ambiental, foram adotadas categorias intermediárias de impacto (*midpoint*) devido a uma relação mais forte com os fluxos ambientais e uma incerteza relativamente baixa.

Os resultados expressam a eficiência do tratamento praticado na estação, observando os fluxos com maior potencial de impacto, os cenários com maior e menor impacto negativos, como também as categorias de impacto mais afetadas. A Tabela 6 apresenta os resultados referentes a seis categorias de impactos ambientais no cenário 1.

Tabela 6 - Potenciais impactos ambientais do esgoto no cenário 1.

Categoria de impacto	Unidade de referência	Potenciais impactos	
		Bruto	Tratado
Mudança climática (GWP100)	kg CO ₂ -Eq	1500,10	256,32
Formação de oxidante fotoquímico	kg NMVOC	0,68	0,12
Toxicidade humana	kg 1,4-DCB-Eq	1520,73	78,25
Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DCB-Eq	27,60	1,42
Ecotoxicidade em água doce	kg 1,4-DCB-Eq	169,80	8,74
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DCB-Eq	3,28	0,17

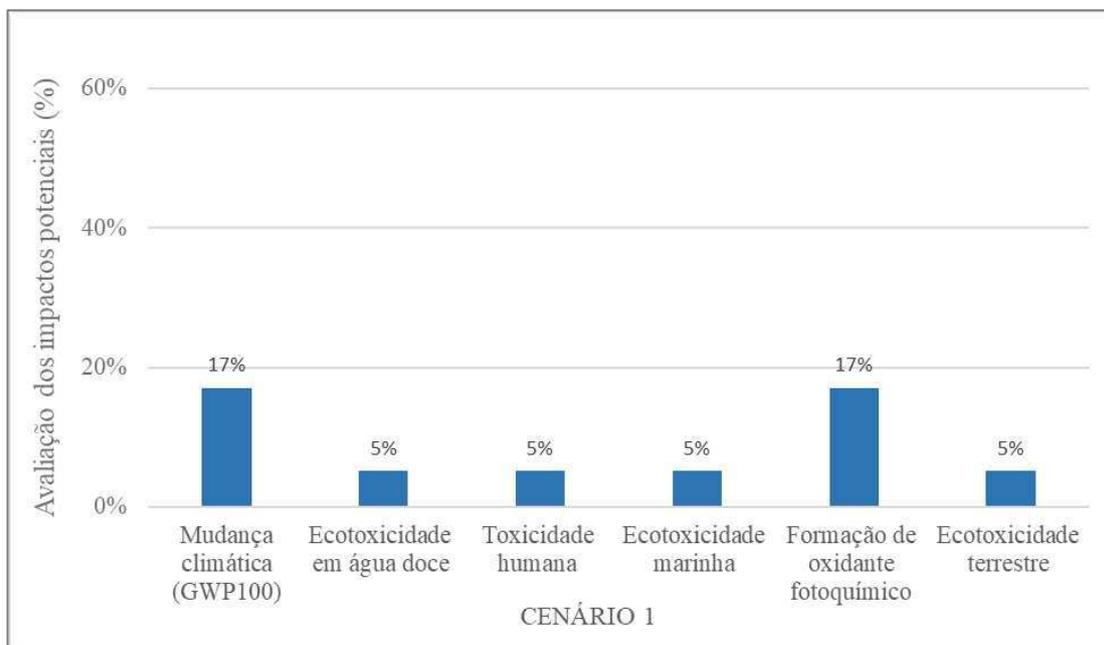
Para comparar as categorias de impacto, tendo em vista que as unidades de referência não são as mesmas, foi preciso fazer a normalização dos dados. De acordo com as Normas Técnicas NBR ISO 14040 (ABNT, 2014a) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2014b), a normalização é um estágio opcional que visa apoiar a interpretação do perfil de impacto.

Neste trabalho, procedeu-se à normalização interna dos dados, expressando os valores das diversas categorias de impacto em relação a uma referência comum. Em outras palavras, cada valor de categoria de impacto por cenário foi dividido pelo maior valor correspondente em cada cenário proposto (Bueno, 2014), resultando em uma métrica adimensional que facilita a comparação entre as categorias de impacto.

Para compreender os possíveis impactos ambientais, realizou-se uma comparação entre as categorias de impacto em cada cenário proposto, utilizando valores relativos expressos em porcentagem. Assim, a partir dos dados apresentados na Tabela 6, tornou-se possível avaliar a diminuição dos impactos ambientais associados ao processo de tratamento executado pela ETE Flecheiras.

Os resultados de cada categoria de impacto para o cenário atual são representados na Figura 17. Observa-se uma notável diminuição, que varia de 83% a 95%, nos impactos ambientais com o tratamento de esgoto nessa área, enfatizando a importância da coleta e disposição adequada dos efluentes sanitários como medidas essenciais para promover a sustentabilidade da localidade em estudo.

Figura 17 - Potenciais impactos ambientais da ETE Flecheiras no cenário atual.



O cenário 1 – tratado representa a situação atual, em que existe tratamento para os efluentes domésticos da região e o quanto esse tratamento reduz os impactos ao meio. O cenário 1 – bruto representa a situação de Flecheiras para o ano de 2021, mostrando quanto o esgoto *in natura*, se lançado sem tratamento, prejudica o meio ambiente com as emissões que causam problemas na água (ecotoxicidade marinha e de água doce) no ar (mudança climática, formação de oxidante fotoquímico) e no solo (ecotoxicidade terrestre).

Na área de estudo, uma das preocupações relacionadas aos problemas ambientais está associada à emissão de metano (CH_4) para a atmosfera. É importante destacar que o CH_4 é reconhecido como um dos principais gases de efeito estufa (GEE), devido ao seu significativo potencial de aquecimento global em relação ao dióxido de carbono (CO_2). De acordo com o IPCC (2014), o CH_4 possui um potencial de aquecimento global 28 vezes maior que o CO_2 , considerando um horizonte temporal de 100 anos.

Em 2015, foi assinado o acordo de Paris, cujo principal objetivo é evitar que o aquecimento global ultrapasse 1,5°C até o final do Século 21. Cada país participante estabeleceu suas próprias metas de redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE), conhecidas como Contribuição Nacionalmente Determinada (Nationally Determined Contribution, ou NDC na sigla em inglês). A NDC brasileira de 2015 estipula que o Brasil deve reduzir suas emissões em 37% até 2025 e em 43% até 2030, em relação aos níveis de emissão de 2005. Em adição a isso, em 2021, o Brasil assumiu o compromisso de ampliar sua ambição para uma redução de 50% até 2030 e atingir emissões líquidas neutras até 2050 (BRASIL, 2022). Isso implica que todas as emissões geradas pelo país devem ser neutralizadas por meio de fontes de captura de carbono, tais como o reflorestamento, a restauração de ecossistemas ou outras tecnologias (BNDES, 2023).

No âmbito estadual, a Secretaria de Meio Ambiente e Mudança do Clima (SEMA) do estado do Ceará, em colaboração com o Fórum Cearense de Mudanças Climáticas, Biodiversidade e de Combate à Desertificação, está engajada na elaboração do Plano Estadual de Mudanças Climáticas (PEMC) e do Plano Estadual de Adaptação (PEA). Estes planos têm como base a Lei Federal nº 12.187/2009, que estabelece a Política Nacional de Mudanças Climáticas, e a Lei Estadual nº 16.146/2016, que aborda a Política Estadual de Mudanças Climáticas.

Dessa forma, o tratamento dos efluentes proporcionou cerca de 83% de redução das emissões e conseqüentemente dos impactos em 2021 referentes à categoria de impacto mudanças climáticas, cooperando com a meta definida pela NDC brasileira.

A fim de obter uma compreensão abrangente da avaliação do ciclo de vida durante o período de operação da ETE, a Tabela 7 exibe os resultados dos potenciais impactos ambientais nos cenários propostos 2 e 3 alusivos aos anos futuros (2030 e 2040). Observa-se que o cenário 3 (final de plano) apresenta o maior potencial de impacto em todas as categorias.

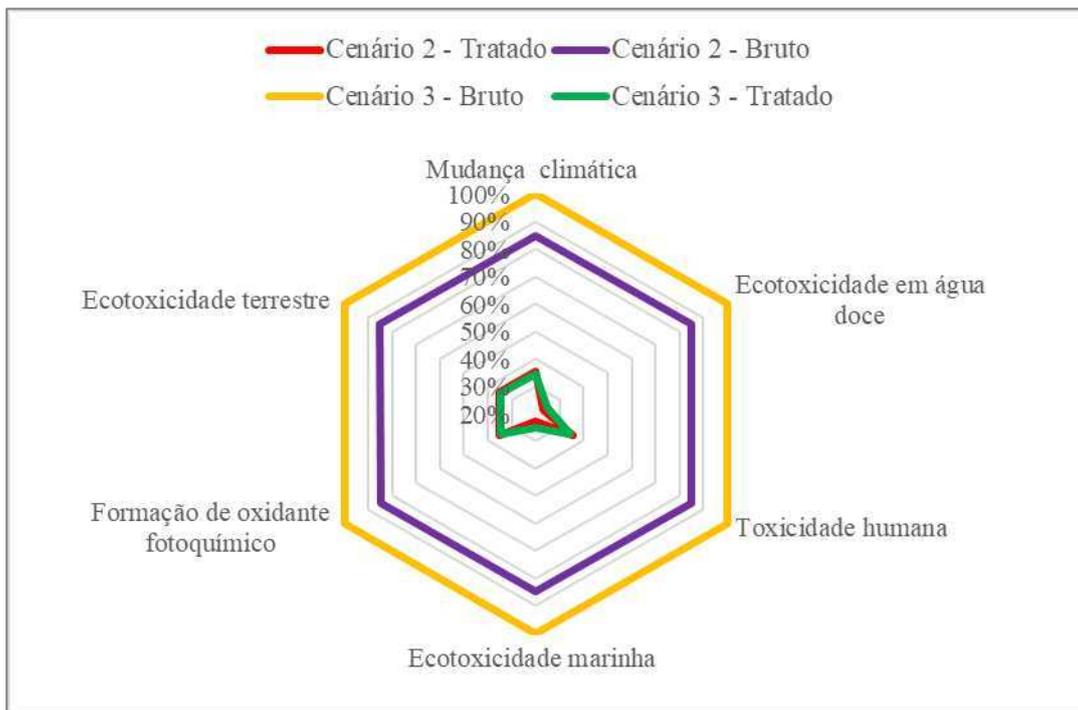
Tabela 7 - Potenciais impactos nos cenários 2 e 3 alusivos aos anos futuros.

Categoria de impacto	Unidade de referência	Potenciais impactos			
		Cenário 2		Cenário 3	
		Bruto	Tratado	Bruto	Tratado
Mudança climática (GWP100)	kg CO ₂ -Eq	1726,38	294,81	2032,09	347,10
Formação de oxidante fotoquímico	kg NMVOC	0,79	0,13	0,93	0,16
Toxicidade humana	kg 1,4-DCB-Eq	1750,37	90,16	2059,96	107,17
Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DCB-Eq	31,77	1,64	37,39	1,94
Ecotoxicidade em água doce	kg 1,4-DCB-Eq	195,44	10,07	230,01	11,97
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DCB-Eq	3,78	0,19	4,45	0,23

Além disso, percebe-se quanto o esgoto bruto é impactante para as seis categorias de impactos analisadas. Essa ocorrência é atribuída, evidentemente, às características do esgoto: altas concentrações de matéria orgânica, sólidos suspensos totais, sólidos sedimentáveis e nutrientes. Isso ressalta a importância do tratamento como medida de controle de impactos ambientais que são provocados quando ocorre o lançamento inadequado em corpos receptores, contaminando as águas e o ecossistema local.

A Figura 18 permite a comparação dos impactos nas diferentes categorias nos cenários 2 e 3 após a aplicação do procedimento de normalização interna. Ao examinar os cenários relacionados ao esgoto tratado, é evidente que os valores percentuais são muito semelhantes, e o mesmo padrão se repete ao analisar o esgoto bruto, com valores quase idênticos. Essa semelhança pode ser atribuída à proximidade dos valores de vazão entre esses cenários.

Figura 18 - Análise dos impactos ambientais nos cenários 2 e 3 alusivos aos anos futuros.

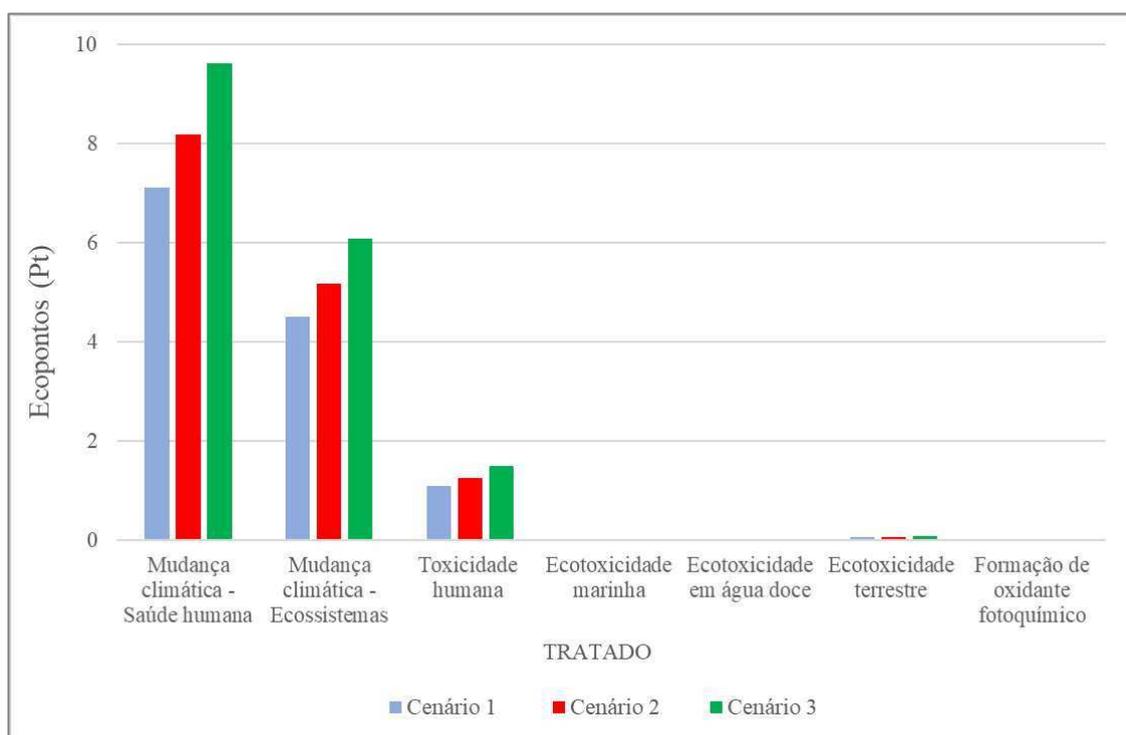


Para as categorias de mudança climática e formação de oxidantes fotoquímicos, o elemento que apresentou o maior potencial de causar impactos foi o gás metano emitido. Para as categorias de toxicidade humana, e das de ecotoxicidade, água doce, marinha e terrestres os maiores potenciais de causar impactos encontrados estão correlacionados ao cloro. O consumo de energia elétrica é responsável pelos potenciais impactos ambientais para as categorias de toxicidade humana e ecotoxicidade de água doce, o que condiz com o estudo de Resende (2018).

A abordagem *midpoint* fornece as categorias de impacto em várias unidades de referência. Portanto, para avaliar a importância relativa das categorias de impacto, comparando-as de forma igualitária, recorreu-se à abordagem *endpoint*. Essa abordagem realiza a normalização e a ponderação, resultando em uma única categoria de impacto expressa em unidades de Ecopontos (Pt), essa pontuação é relativa e compara o desempenho ambiental entre diferentes alternativas, permitindo identificar a alternativa que tem o maior e o menor impacto ambiental.

Assim, na Figura 19, os resultados após a aplicação da abordagem *endpoint* são apresentados, possibilitando a comparação dos impactos ambientais da ETE de Flecheiras em cada cenário analisado. É notável que o impacto mais relevante está relacionado às mudanças climáticas, em comparação com as demais categorias de impacto.

Figura 19 - Potenciais impactos ambientais do efluente tratado nos cenários propostos.



As estações de tratamento de esgoto são responsáveis por diversos impactos, sendo um dos principais a eutrofização (marinha e água doce) a qual não foi incluída como categoria de impacto, neste estudo, devido à indisponibilidade de dados de entrada e saída, pois, o fósforo e nitrogênio não são objeto de monitoração pela operadora do sistema de tratamento de esgoto em Flecheiras. Contudo, se os dados do inventário tivessem incluído esses indicadores, potencialmente presentes no efluente, os resultados seriam diferentes.

4.2.3 ACV na dimensão social da ETE Flecheiras

Conforme Huertas-Valdivia *et al.* (2020), nos últimos anos, tem-se observado um aumento notável do interesse na dimensão "social" da sustentabilidade no contexto do desenvolvimento sustentável. A principal finalidade da ACV na perspectiva social é analisar os potenciais impactos sociais resultantes das atividades ou práticas de organizações envolvidas no uso de um produto ou em seu ciclo de vida de produção.

Segundo Kalbar *et al.*, (2017) o aumento do uso dessas avaliações é amplamente atribuído à crescente popularidade dos resultados da AICV, que facilita a comunicação dos impactos para a sociedade. Na prática, para analisar os indicadores sociais com maior impacto, foi adotada a abordagem *endpoint* do método ReCiPe.

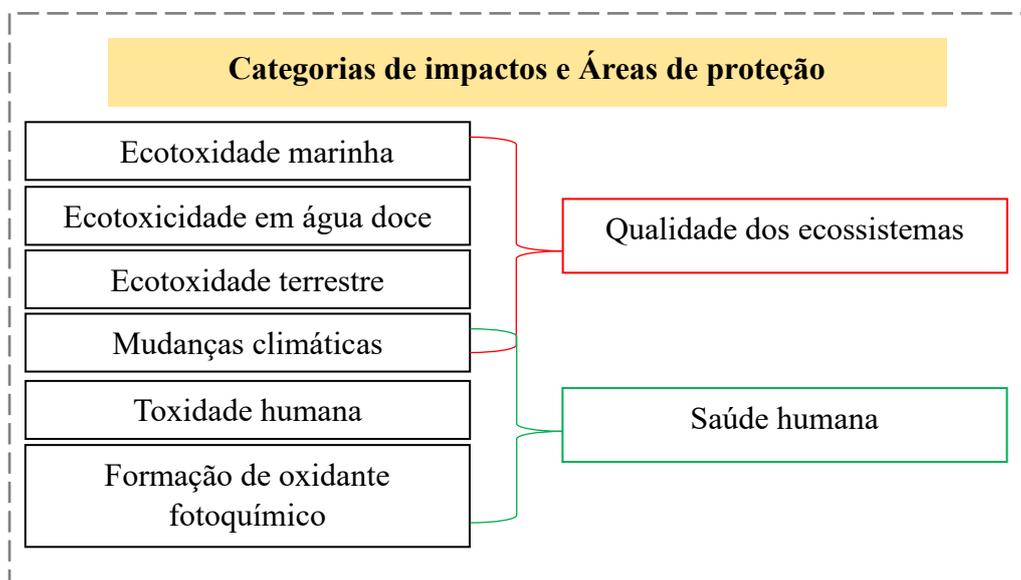
De acordo com Corominas *et al.*, (2020) os indicadores de *midpoint* podem gerar uma série de *trade-offs* (relações do tipo “perde ou ganha”) entre as categorias de impacto, resultando em uma falta de clareza para a tomada de decisões. Além disso, a comunicação eficaz dos resultados da ACV para públicos não técnicos continua sendo um desafio (Sohn *et al.*, 2020). Como resultado, algumas pesquisas recentes em ACV (por exemplo, Arzate *et al.*, 2019; Akhoundi; Nazif, 2020) têm se concentrado em indicadores orientados para *endpoint* com o intuito de fornecer resultados de ACV mais simples e compreensíveis.

De fato, os resultados da ACV são, primeiramente, associados às categorias de impacto *midpoint* que, por sua vez, estão vinculadas a três categorias de danos *endpoints*. Essas três categorias são saúde humana, qualidade do ecossistema e escassez de recursos.

Essas informações são agrupadas para criar um escore final, que representa o valor do indicador em uma pontuação única e adimensional, medida em Ecopontos. A magnitude numérica desse valor expressa a magnitude do impacto ambiental. Quanto maior for o valor do indicador, maior será o impacto ambiental negativo associado ao produto ou atividade em avaliação. Esses processos visam tornar as unidades de medida mais uniformes e os resultados mais compreensíveis, o que auxilia os tomadores de decisão.

Os resultados deste estudo compreenderam duas áreas de proteção: qualidade dos ecossistemas e saúde humana. A Figura 20 ilustra o agrupamento das categorias nas áreas de proteção, ou seja, a qualidade dos ecossistemas abrange a ecotoxicidade de água doce, ecotoxicidade marinha, ecotoxicidade terrestre e as mudanças climáticas. Na saúde humana abrange mudanças climáticas, toxicidade humana e formação de oxidante fotoquímico.

Figura 20 - Disposição das categorias de impactos nas áreas de proteção.



Conforme Huijbregts *et al.*, (2017), a unidade de medida utilizada para avaliar a qualidade do ecossistema na área de proteção é a perda de espécies locais integrada ao longo do tempo (ano da espécie). Por outro lado, a saúde humana é representada pelos anos perdidos ou de incapacidade causados por doenças ou acidentes, mensurados em anos de vida ajustados por incapacidade (DALY) por unidade de massa emitida no ambiente. O DALY é uma medida estatística dos anos de vida perdidos ou afetados pela população devido a doenças ou outros fatores, sendo utilizado, por exemplo, pela Organização Mundial da Saúde (OMS).

Arvidsson *et al.*, (2018) ressaltam que a saúde humana é abordada em várias disciplinas científicas distintas, incluindo, obviamente, a ciência médica. Além disso, é frequentemente mencionada como um aspecto de grande importância no campo da avaliação do ciclo de vida social, assim como, a qualidade dos ecossistemas que desempenha um papel importante na proteção da dignidade e do bem-estar humano na ACV social. O ser humano é parte integrante dos ecossistemas e depende dos serviços que eles fornecem. Portanto, considerar a qualidade dos ecossistemas é essencial para garantir a sustentabilidade e a preservação do bem-estar humano na ACV social.

Os resultados na abordagem *endpoint* indicaram que os impactos das mudanças climáticas e toxicidade humana se destacaram em relação às outras categorias de impacto.

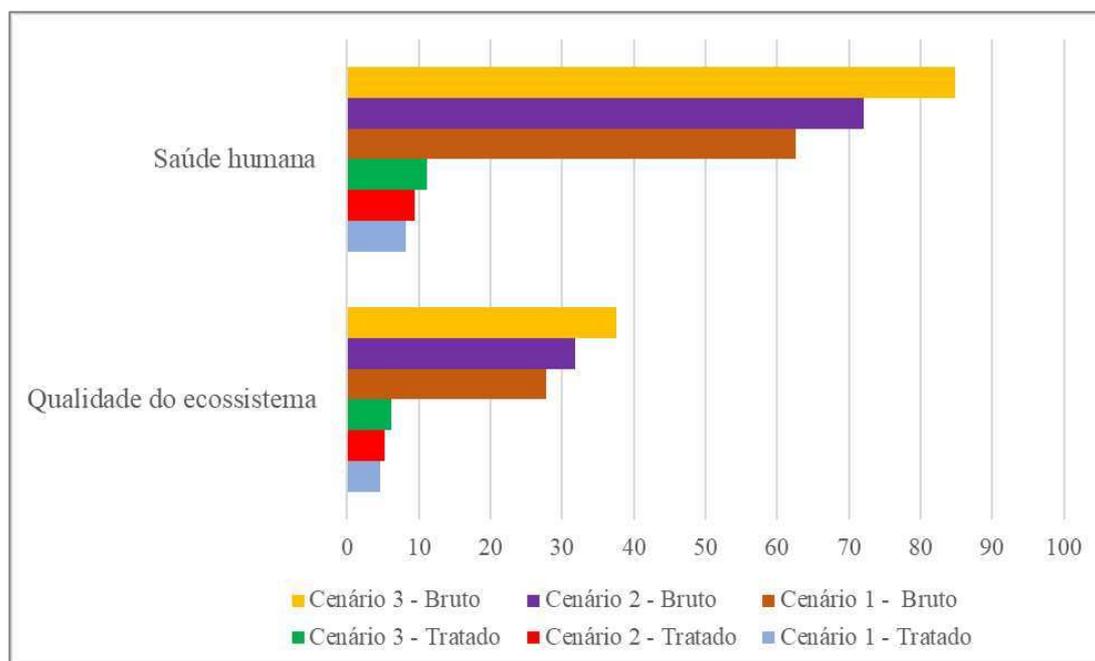
Na categoria de impacto mudança climática, a modelagem de danos é realizada em várias etapas. A emissão de um gás de efeito estufa (em kg) resulta no aumento da concentração atmosférica de gases de efeito estufa (em ppb), o que, por sua vez, aumenta a capacidade de forçamento radiativo (em W/m^2), o qual é a mudança na energia radiativa que a terra recebe e emite de volta para o espaço devido a fatores como gases de efeito estufa, levando ao aumento da temperatura média global (em °C). Esse aumento de temperatura acarreta danos à saúde humana e qualidade dos ecossistemas.

O fator de caracterização de toxicidade humana e ecotoxicidade é responsável por considerar a persistência ambiental, o acúmulo na cadeia alimentar humana e a toxicidade de um produto químico (Goedkoop *et al.*, 2009). O caminho de causa e efeito, desde a emissão para o meio ambiente, passando pelo destino e exposição, até as espécies afetadas e a incidência de doenças, resulta em danos para a qualidade dos ecossistemas e para a saúde humana.

A Figura 21 apresenta os danos associados aos esgotos (bruto e tratado). A categoria saúde humana foi a que apresentou maiores danos em relação aos componentes analisados. O cenário 3, como esperado, é o que mais contribui com os danos à qualidade dos

ecossistemas e à saúde humana. Isso é justificado pela maior vazão de 1257,98 m³/d, prevista para 2040, e pela implementação total do projeto para operação da ETE no final de plano.

Figura 21 - Pontuação dos impactos do esgoto nos cenários propostos.



Portanto, os impactos totais da ETE durante o seu ciclo de vida foram 45 Ecopontos (Pt) contabilizando os impactos vistos nos cenários 1, 2 e 3 para o efluente tratado. Considerando a hipótese de não existência de tratamento, os cenários 1, 2 e 3, baseados no aumento da contribuição de esgotos, levariam a impactos significativos, o cenário 3, por exemplo, chegaria a 85 (Pt) na área de proteção saúde humana. Isso mostra que a operação da ETE tem um impacto globalmente positivo no meio ambiente.

É amplamente consensual na comunidade científica que o lançamento de esgoto nas águas superficiais representa uma séria ameaça global à saúde humana. Além disso, estudos científicos apontam que a contaminação da água por esgoto também tem impactos significativos na vida selvagem e nos ecossistemas naturais (Wear; Thurber, 2015; Prüss-Ustün *et al.*, 2019). A flora e a fauna que habitam nas proximidades ou dentro de corpos d'água contaminados frequentemente acumulam substâncias tóxicas e patógenos veiculados pelo esgoto.

De acordo com Wear *et al.*, (2021), em regiões onde a água doce está intensamente poluída, o despejo de esgoto resulta em níveis perigosamente baixos de oxigênio, à medida

que as bactérias decompositoras consomem quantidades crescentes de matéria orgânica, esgotando o oxigênio disponível. Esse processo leva à formação de zonas mortas. Embora seja comumente admitido que a poluição por esgoto afeta predominantemente os ecossistemas aquáticos, é importante ressaltar que os sistemas terrestres, a vida selvagem e as comunidades humanas do seu entorno também são afetadas pela poluição.

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, com foco na água, saúde e recursos naturais, oferecem uma valiosa oportunidade para a colaboração entre os setores de saúde pública, desenvolvimento e meio ambiente (Chen *et al.*, 2023). Essa colaboração interdisciplinar é fundamental para alcançar avanços significativos na segurança hídrica e no saneamento.

4.2.4 ACV na dimensão econômica da ETE Flecheiras

Na dimensão econômica foi realizada a Avaliação do Ciclo de Vida para analisar os custos do ciclo de vida da estação de tratamento de esgoto, em virtude dos impactos ambientais que a ETE representa. Essa análise considerou os preços relacionados às emissões do esgoto afluente e efluente final em cada cenário.

Os preços ambientais desempenham o papel de atribuir um valor monetário à qualidade ambiental, refletindo o quanto as pessoas estariam dispostas a pagar por essa qualidade. Esses preços são implícitos, pois não podem ser diretamente determinados no mercado, sendo necessário realizar cálculos para estimá-los.

Os autores Bruyn *et al.*, (2018) definem os preços ambientais como índices que calculam o valor marginal social de prevenção de emissões ou intervenções, expressando-os em euros por quilograma de poluente. Dessa forma, os preços ambientais indicam a perda de bem-estar devido a um custo adicional, por quilograma de poluente, emitido ao meio ambiente.

Dessa forma, os preços ambientais frequentemente correspondem aos custos externos, uma vez que a ausência de um mercado para a qualidade ambiental impossibilita sua observação direta e empírica. De acordo com Çapa *et al.* (2022), os custos externos também chamados de externalidades, referem-se aos impactos ambientais, sociais ou econômicos que não são considerados diretamente nos preços de um produto ou serviço.

Esses custos devem ser considerados na perspectiva do ciclo de vida da estação de tratamento de esgoto e são definidos como o reflexo dos impactos ambientais decorrentes das emissões geradas em diversas etapas como: extração de matérias-primas, produção de

produtos químicos, geração de eletricidade, transporte desses produtos químicos, além dos processos de tratamento.

O manual de preços ambientais da CE Delft - *Committed to the Environment* (Bruyn *et al.*, 2018) apresenta uma estrutura de pesquisa e metodologia que visa estabelecer um valor monetário para a qualidade ambiental, de acordo com a percepção da sociedade.

Esse manual apresenta conjuntos de preços ambientais e fatores de ponderação que podem ser utilizados como índices em análises econômicas e ambientais. Os fatores de ponderação são dependentes do método de caracterização adotado, e aqueles desenvolvidos no manual da CE Delft foram baseados na caracterização adotada no método ReCiPe, baseado na perspectiva hierarquista.

Bruyn *et al.*, 2018 destacam que os preços ambientais apresentados no manual são valores médios para a poluição na Europa. Uma vez que a caracterização ReCiPe é baseada nessas médias europeias. Embora seja representativa em escala global seu uso individual pelos países pressupõe que o preço médio do impacto ambiental do poluente seja o mesmo que na Europa.

A análise de custo do ciclo de vida tem como objetivo estimar os custos externos associados aos impactos ambientais resultantes do esgoto e comparar os custos referentes ao esgoto bruto e ao esgoto que passa por tratamento, em diferentes cenários propostos. Para essa análise, foi utilizada a metodologia *Environmental Prices*, previamente aplicada por Medeiros (2021), que atribui valores monetários a cada categoria de impacto ambiental, conforme demonstrado na Tabela 7.

É relevante ressaltar que o preço de cada categoria foi estabelecido para um cenário em 2015, utilizando o Euro como moeda. Para atualizar os valores, considerou-se um ajuste de 8,6% para compensar a inflação entre 2015 e 2022 na Europa (EUROSTAT, 2023). Além disso, foi aplicada uma taxa de câmbio de R\$5,43/€, com base na cotação do dia 10 de maio de 2023, de acordo com o Banco Central do Brasil (2023). A Tabela 8 apresenta os valores corrigidos para cada categoria de impacto considerada no presente estudo.

Tabela 8 - Preços ambientais estimados por impacto ambiental.

Categoria de impacto	Unidade	Preço ambiental como custo externo	Preço ambiental corrigido
Mudança climática (GWP100)	kg CO ₂ -Eq	€ 0,057	R\$ 0,34
Ecotoxicidade em água doce	kg 1,4-DCB-Eq	€ 0,036	R\$ 0,21
Toxicidade humana	kg 1,4-DCB-Eq	€ 0,0991	R\$ 0,58
Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DCB-Eq	€ 0,00739	R\$ 0,04
Formação de oxidante fotoquímico	kg NMVOC	€ 1,15	R\$ 6,78
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DCB-Eq	€ 8,69	R\$ 51,24

Fonte: Adaptado de Bruyn *et al.*, (2018).

A monetização dos resultados da ACV é uma forma de estimar os custos ambientais externos ao converter os impactos ambientais físicos em termos financeiros. Essa abordagem possibilita a comparação e a compensação entre diversas questões ambientais, assim como os aspectos econômicos e sociais relacionados (Morel *et al.*, 2018; Canaj *et al.*, 2021). Para garantir a sustentabilidade a longo prazo, é fundamental realizar uma análise econômica abrangente dos custos e benefícios relacionados ao tratamento de águas residuais (Arborea *et al.*, 2017).

A aplicação da monetização da externalidade ambiental, isso se refere principalmente às externalidades negativas, deve ser realizada de forma clara e compreensível, de modo a permitir uma comparação fácil de entender entre custo econômico direto e custo externo (Song; Liu; Yang, 2021; Huang *et al.*, 2023).

Os autores Nguyen *et al.*, (2016) afirmam que ao expressar os impactos ambientais em termos monetários, é possível adicioná-los facilmente aos custos diretos. A determinação dos custos externos é importante para impulsionar uma taxa corretiva, sendo os impostos ambientais uma ferramenta comum na redução da poluição. Dessa forma, a internalização dos custos externos pode ser alcançada por meio de instrumentos como taxas ecológicas, pedágios e reformas tributárias ecológicas.

Conforme Pigou (1929), as externalidades são imperfeições de mercado, e a intervenção do Estado nas atividades econômicas se dá por meio de uma política tributária que emprega impostos para internalizar os custos ambientais que, em sua maioria, são negligenciados pelos poluidores.

No Brasil, a implementação de impostos ambientais representa uma tarefa árdua, em virtude de seus inúmeros episódios de má administração e apropriação indevida de recursos. Todavia, quando esses impostos são direcionados para proteger o meio ambiente da degradação, potencializam benefícios significativos.

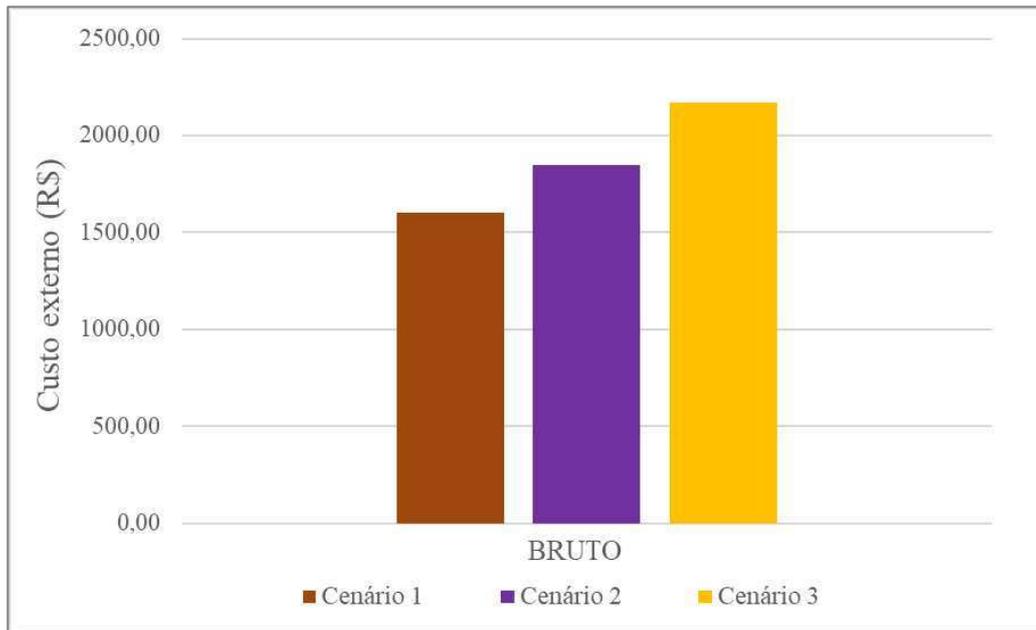
De acordo com Tupiassu; Gonçalves; Gros-Désormeaux, (2019), a tributação ambiental não apenas gera receita para o setor público, mas também estimula a implementação de práticas sustentáveis na produção, seguindo o princípio do poluidor-pagador. Alguns países europeus passaram por profundas reformulações em seus sistemas fiscais, colocando o aspecto ambiental como uma ênfase central na tributação, um esforço conhecido como Reforma Fiscal Verde.

Um exemplo disso são os impostos verdes ou ambientais, que visam reduzir as emissões de carbono e combater o aquecimento global, além de contribuir para a redução do desmatamento. Em países que já adotaram esses impostos, cada tonelada de CO₂ lançada na atmosfera é taxada e o dinheiro arrecadado é reinvestido na economia verde, resultando em bilhões de dólares destinados a projetos ambientais.

Antes de incluir as externalidades no preço de produtos, serviços ou processos manufaturados, é essencial comunicar à sociedade civil e às empresas públicas e privadas sobre a relevância ambiental desse imposto, a fim de minimizar conflitos. Embora seja, sem dúvida, um desafio, a internalização dos custos ambientais representa um passo em direção à sustentabilidade (Medeiros, 2021).

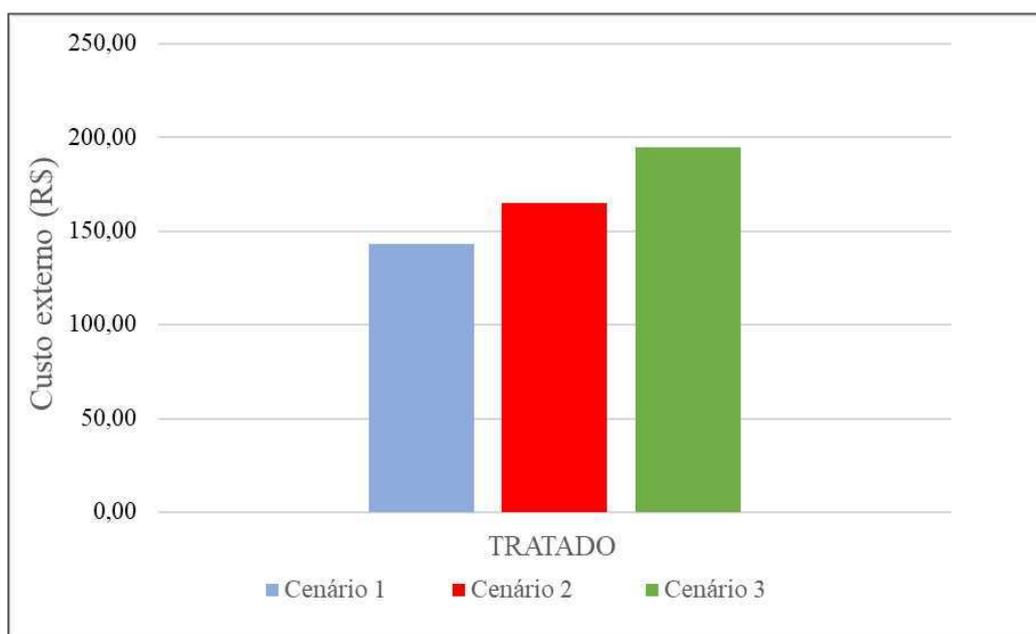
Assim, foram estimadas as externalidades relacionadas aos impactos ambientais resultantes do esgoto, tanto na forma bruta quanto tratada, em cada cenário proposto, conforme ilustrado na Figura 22. No cenário atual para o esgoto bruto, os custos externos são calculados em cerca de R\$ 1603,07 por quilograma de poluente/dia. Os custos referentes aos impactos ambientais causados pela contribuição de esgoto bruto na localidade de Flecheiras poderiam chegar a R\$2172,00 por quilograma de poluente/dia (R\$1,70 por m³ de esgoto lançado).

Figura 22 - Custos externos referentes ao afluente bruto.



A Figura 23 exibe os resultados para os cenários de efluente tratado, no cenário atual, os custos externos são calculados em cerca de aproximadamente R\$ 144,00 por quilograma de poluente e podem alcançar R\$ 195,00 ao final de plano. Comparando as respectivas figuras, verifica-se que as menores externalidades ambientais ocorrem nos cenários com a intervenção do sistema de esgotamento sanitário. Dessa maneira, é importante destacar que, embora a ETE cause impactos ambientais na área de sua instalação, esses tornam-se pequenos quando comparados aos consideráveis impactos do esgoto que é lançado sem tratamento no meio ambiente, nesse caso, em uma área com influência turística.

Figura 23 - Custos externos referentes ao efluente tratado.



Ao realizar o estudo de ACV, é possível obter informações sobre os impactos ambientais, o que permite tomar medidas para controlar esses impactos e introduzir melhorias. Essas ações levam a uma maior sustentabilidade da estação de tratamento de esgoto e da área turística em seu entorno, possibilitando um planejamento estratégico.

4.3 Propostas de melhorias para gestão sustentável da ETE Flecheiras

A maioria das estações de tratamento de esgoto, atualmente, é implantada e operada como sistemas "fim-de-tubo", seguindo uma abordagem linear de coleta, tratamento e descarte. Como regra geral, a eficiência de uma ETE pode ser medida pela conformidade com os limites legais de descarga ambiental para o efluente tratado, ao mesmo tempo em que se busca otimizar os custos de implementação e operação.

No entanto, no âmbito da perspectiva do ciclo de vida, é necessário conceber esses sistemas considerando uma gestão ambientalmente responsável, fundamentada nos princípios da sustentabilidade. Isso deve ser aplicado desde as fases iniciais do projeto até a sua desativação ou desmontagem, com a incorporação de uma abordagem integrada que englobe as fases líquida, sólida e gasosa. Desse modo, a sustentabilidade a longo prazo não se restringe apenas à proteção direta da saúde humana, mas também à minimização dos impactos indiretos sobre o meio ambiente.

No que diz respeito a ETE Flecheiras, é de extrema relevância que os princípios da sustentabilidade inerentes ao tratamento de esgotos superem não apenas a busca por eficiência e eficácia operacionais. Nesse sentido, é recomendável considerar melhorias para a gestão sustentável da ETE, tais como:

- Reduzir a demanda por energia;
- Minimizar a dependência de insumos externos, como produtos químicos;
- Realizar monitoramento e medição dos indicadores nitrogênio e fósforo;
- Aprimorar a comunicação e o envolvimento com as partes interessadas;
- Diminuir a geração de resíduos sólidos;
- Providenciar programas de treinamento atualizados para os operadores e gestores da ETE;
- Documentar relatórios de monitoramento que registrem as vazões de entrada e saída do efluente;
- Recuperar recursos provenientes de esgotos, incluindo a reutilização da água, lodo, nutrientes e biogás.

Dessa forma, para promover a gestão sustentável da estação de tratamento de esgoto de Flecheiras, é recomendado reduzir o consumo de energia no funcionamento do sistema, uma vez que, de acordo com Ling *et al.* (2021), isso impacta diretamente os custos operacionais e a pegada de carbono. Adicionalmente, é recomendável conduzir uma análise abrangente para avaliar a viabilidade de aproveitar o biogás gerado na ETE como fonte de energia para atender às necessidades da instalação.

Além disso, é essencial realizar exames laboratoriais de rotina para monitorar a eficácia na remoção de nutrientes, nitrogênio e fósforo, a fim de prevenir problemas de eutrofização. Isso se torna crucial, visto que, conforme observado por Meena *et al.* (2019), a eutrofização pode causar diversos impactos prejudiciais no ecossistema aquático, como a redução dos níveis de oxigênio dissolvido, deterioração da qualidade da água, ameaças à pesca e degradação das atividades de lazer.

Como também, é importante manter canais de comunicação abertos com as partes interessadas, permitindo que se familiarizem com o sistema de tratamento, compartilhem feedbacks e preocupações, e aproveitem os recursos disponíveis na estação. Conforme destacado por Lyu *et al.* (2021), a colaboração entre partes envolvidas, na qual elas

alcançam um consenso em questões de sustentabilidade por meio de interações contínuas, é considerado um método crucial na gestão sustentável.

Para aprimorar a gestão e reduzir a geração de resíduos sólidos (lodo), recomenda-se a implementação de leitos de secagem, de acordo com Bressani-Ribeiro *et al.*, (2019) o lodo removido, com um teor de sólidos de cerca de 35%, pode ser encaminhado diretamente para processos de calagem/maturação ou compostagem. Assim como, recomenda-se, o uso do lodo estabilizado na agricultura, por meio de parcerias entre a Companhia de Água e Esgoto do Ceará, a Prefeitura Municipal local e as associações de produtores rurais, visando atingir a meta de resíduo zero.

Manter os operadores da ETE atualizados e adequadamente treinados é de vital importância para garantir uma gestão eficaz da estação e para minimizar problemas no sistema. Conforme enfatizado por Chernicharo *et al.* (2018), além de investir em projetos, infraestrutura e equipamentos, é crucial capacitar os profissionais responsáveis pela operação da ETE. Da mesma forma, o estudo de Kõrgmaa *et al.*, (2020) destacou que o treinamento dos profissionais encarregados da operação das estações de tratamento de esgoto desempenha um papel significativo na manutenção da eficiência do tratamento de águas residuais e na remoção de substâncias orgânicas prejudiciais.

De igual relevância, é fundamental manter um monitoramento constante da vazão de entrada, visando prevenir sobrecargas orgânicas na estação de tratamento de esgoto e assegurar a manutenção e eficiência das unidades de tratamento. Adicionalmente, é de grande importância reduzir a dependência de produtos químicos, os quais podem representar riscos para a saúde humana e o ecossistema.

Por fim, é recomendado expandir o processo de reuso da água, que já está implementado na ETE, considerando a construção de tubulações para transportar água de reuso aos consumidores. Além disso, a realização de campanhas e projetos de educação ambiental na região, para conscientizar a comunidade e proporcionar acesso a esse recurso. Isso permitirá que a comunidade utilize a água de reuso para fins não potáveis, concretizando a transformação do "resíduo em recurso" na comunidade de Flecheiras.

4.3.1 Potencial de recuperação de recursos na ETE Flecheiras

A percepção do esgoto como mero rejeito é uma ideia ultrapassada, conforme evidenciado por pesquisas nacionais e internacionais. Esses estudos comprovam que é viável recuperar recursos em estações de tratamento de esgoto, tornando o processo de

tratamento mais sustentável (Cerqueira; Aisse, 2020; Rosa Junior *et al.*, 2021; Areias *et al.*, 2023). De fato, em alguns países desenvolvidos, as estações de tratamento de esgoto já são consideradas sistemas de recuperação de recursos. No entanto, os esforços nessa direção ainda são incipientes e, quando realizados, geralmente ocorrem de forma desarticulada, abordando apenas algumas das diversas possibilidades existentes.

Os principais recursos da ETE Flecheiras considerados para recuperação e seu uso principal foram:

1. Fase líquida (água para reutilização)

A Lei no 14.026/2020, que estabelece o novo marco legal do saneamento básico, trouxe avanços significativos ao incluir princípios fundamentais e diretrizes que visam aprimorar o setor. Dentre esses princípios, destacam-se a redução e controle das perdas de água, a racionalização do consumo, o estímulo à eficiência energética, o reuso de efluentes e o aproveitamento de águas pluviais. Essas diretrizes refletem o compromisso com a sustentabilidade e a busca por práticas mais responsáveis no âmbito do saneamento.

A reutilização de águas residuais tratadas representa uma alternativa prática, frequentemente negligenciada e abundantemente disponível para abordar os desafios relacionados à água e alimentos. Além disso, conforme observado por Arzate *et al.*, (2019) a atenuação do esgotamento hídrico, como exemplificado pela água recuperada, desempenha um papel significativo na diminuição dos impactos ambientais em áreas caracterizadas por uma severa escassez de água.

Os benefícios se estendem ainda mais, e conforme Arborea *et al.*, (2017) afirmam, a utilização de águas residuais tratadas na agricultura, bem como em setores como o industrial, recreativo e ambiental, não apenas auxilia na proteção de corpos d'água superficiais e ecossistemas aquáticos e terrestres, mas também desempenha um papel vital no que se denomina gestão integrada dos recursos hídricos. Essa prática possibilita a consecução de importantes objetivos ambientais, tanto em termos de qualidade quanto de quantidade de água.

Outro exemplo positivo de reutilização das águas residuais, como indicado por Jan *et al.* (2022), é a prática de irrigação. Esta prática tem o potencial de reduzir a necessidade de tratamentos adicionais e despesas com fertilizantes, uma vez que o solo e as plantas atuam como biofiltros, aproveitando os nutrientes presentes na água residual. Essa

abordagem permite minimizar os esforços de purificação, uma vez que a água de esgoto contém quantidades significativas de nutrientes.

Perante o exposto, a ETE Flecheiras tem todo o aporte para realizar o tratamento de esgoto visando atender aos requisitos de qualidade necessários para reutilização da água, inclusive, com o protótipo inovador de aquário com peixes nas instalações da estação, desempenhando o papel de monitorar a qualidade da água. No entanto, para que a água tratada possa ser utilizada com êxito em atividades como irrigação agrícola, recarga artificial de aquíferos subterrâneos e fins industriais, é imperativo que sua qualidade esteja em conformidade com os padrões estabelecidos para a reutilização.

Contudo, a ETE Flecheiras ainda não aderiu aos padrões legais estabelecidos para águas de reuso. Infelizmente, como evidenciado anteriormente, a conformidade no que diz respeito ao reuso dos efluentes tratados não está sendo observada. Os dados dos indicadores microbiológicos, como os relacionados à presença de *E. coli*, excedem significativamente os limites estipulados na Resolução COEMA nº 02/2017 para o reuso do efluente em categorias como fins urbanos, agrícolas, florestais e aquicultura. Entretanto, tais efluentes podem ser considerados para reuso em contextos de fins ambientais.

2. Fase sólida (lodo)

No Brasil, a gestão do lodo de esgoto representa um desafio considerável devido aos elevados custos de tratamento e descarte, bem como às complexidades operacionais associadas. Contudo, ao invés de adotar a disposição final em aterros sanitários, diversas alternativas estão disponíveis, incluindo a incineração, a utilização na construção civil, na agricultura e na recuperação de áreas degradadas. Essas alternativas ganham destaque em países com atividade agrícola intensa e vastas áreas passíveis de restauração.

Na ETE Flecheiras, a destinação ambientalmente correta do lodo ainda não foi implementada. Isso se deve à falta de um aterro sanitário próximo e à ausência de um consórcio entre os municípios para a disposição dos resíduos sólidos. Dessa forma, encontrar uma solução apropriada para a destinação desses resíduos armazenados no tanque de adensamento de lodo (TAL), tornou-se uma tarefa prioritária para os gestores da ETE atualmente.

Uma das opções vantajosas para a destinação ambientalmente apropriada, recomendada para a estação de Flecheiras seria o reaproveitamento do lodo na agricultura, o que representa uma forma de valorização desse subproduto. Isso ocorre devido ao fato

de que o esgoto possui uma proporção ideal de nitrogênio e fósforo para o solo. Esses nutrientes também podem substituir os fertilizantes convencionais utilizados em terras inférteis, muitas vezes importados, conhecidos como "NPK" (N para nitrogênio, P para fósforo, K para potássio).

De acordo com o estudo realizado por Lopes (2021), os municípios brasileiros têm o potencial de gerar aproximadamente 238 toneladas de lodo por ano, contendo cerca de 10.588 kg de nitrogênio (N), 1.129 kg de fósforo (P) e 844 kg de potássio (K). Esses resultados são significativos em relação à demanda por fertilizantes NPK em diversos tipos de culturas. Além disso, a produção e o consumo de alimentos com menor uso de fertilizantes químicos contribuem para a segurança alimentar, promovendo uma produção de alimentos que respeita o meio ambiente.

Na Tabela 9, são fornecidas informações sobre a carga total estimada de lodo que é extraída diariamente do sistema (UASB+FSA) da ETE Flecheiras, nos anos estudados. Ao analisar o ano de 2021, estima-se que aproximadamente 9.325,8 kgSST/ano de lodo tenha sido retirado da estação. Essa quantidade de lodo poderia ser adequadamente destinada, contribuindo para tornar uma estação mais sustentável.

Tabela 9 - Carga total estimada de lodo retirada do sistema (UASB+FSA).

Ano	Vazão média (m ³ /d)	Lodo retirado do sistema (kgSST/d)
2021	928,80	25,55
2030	1068,77	29,40
2040	1257,98	34,60

O estudo conduzido por Bittencourt *et al.* (2014) examinou o reaproveitamento do lodo na agricultura, onde 88.166 toneladas de lodo (equivalente a 33.404 toneladas secas) foram destinadas a 2.288 hectares de áreas agrícolas. O lodo fornecia 88% do calcário, 74% do nitrogênio (N), 73% do pentóxido de fósforo (P₂O₅) e 35% do óxido de potássio (K₂O) para a fertilização de culturas como milho, soja, feijão, aveia, trigo, adubo verde, além da implantação e pós-colheita de frutíferas. Ressaltando que os 80 agricultores beneficiados puderam reduzir seus gastos com fertilizantes e calcário, economizando em média US\$ 813,45 por hectare.

3. Fase gasosa (biogás do reator UASB)

A expansão da utilização de reatores UASB no tratamento de esgoto doméstico tem resultado em um incremento na produção de biogás como um subproduto desse procedimento (Rosa *et al.*, 2016). Comumente, esses subprodutos gasosos são encaminhados para serem queimados na atmosfera. Embora essa abordagem contribua para a diminuição das emissões de gases de efeito estufa, ela implica na subutilização do potencial energético do biogás, ao mesmo tempo em que pode acarretar impactos ambientais potenciais.

O biogás gerado pelos reatores UASB é composto principalmente por metano (70 a 81%), nitrogênio (10 a 25%) e dióxido de carbono (6 a 14%). Em menor quantidade, o biogás também contém traços de hidrogênio (0 a 3%), sulfeto de hidrogênio (233 a 2.470 ppm) e outros gases traço (Possetti *et al.*, 2018).

A operação da estação de tratamento de esgoto representa a maior contribuição para o potencial de aquecimento global, tornando essencial abordar a emissão direta de biogás para a atmosfera. No estudo de Lopes (2021), a recuperação do biogás demonstrou potencial para evitar a emissão de cerca de 800 toneladas de CO₂ equivalente por ano na atmosfera, por meio do processo de tratamento (UASB + *Wetlands*). Dessa forma, é importante ressaltar que os sistemas de tratamento, como reatores UASB, não podem negligenciar as emissões diretas de gases de efeito estufa.

Recomenda-se que a ETE Flecheiras incorpore coletores de biogás nos reatores UASB, a fim de minimizar perdas e recuperar o potencial energético desse gás, mesmo em uma escala menor. Isso resultará em benefícios ambientais substanciais devido à notável redução das emissões de metano. Além disso, para uma utilização mais eficiente do biogás, é crucial projetar e construir os reatores UASB de modo a otimizar tanto a produção quanto a coleta do biogás, além de operá-los adequadamente para evitar perdas.

Akhoundi e Nazif (2020) concluíram que 1 kWh de eletricidade produzida por geradores de biogás locais na estação de tratamento gera impactos ambientais menores em comparação com 1 kWh de eletricidade proveniente da rede elétrica nacional do Irã em todas as categorias de impactos analisadas. Conseqüentemente, o uso da eletricidade gerada pelos geradores de biogás locais na estação de tratamento contribui para a redução dos impactos ambientais totais da ETE.

Os resultados da análise de ciclo de vida ambiental revelam que as emissões de metano da ETE Flecheiras têm um impacto substancial nas categorias de mudança

climática e formação de oxidantes fotoquímicos. Para reduzir esse impacto, como já mencionado, é fundamental recuperar o metano e utilizá-lo como fonte de energia.

A Tabela 10 enfatiza a significância da recuperação do biogás como uma das principais estratégias para reduzir o impacto do aquecimento global e enfrentar a crise climática. Essa abordagem é considerada uma alternativa de transição rápida e essencial para conter o aumento da temperatura global a 1,5°C, ao mesmo tempo que contribui para o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, que têm como alvo a luta contra as mudanças climáticas (ODS 13).

O programa ProBio 1.0 foi utilizado para estimar o potencial energético do biogás na ETE Flecheiras, considerando o cenário típico no ano de 2021, conforme apresentado na Tabela 10. Esses dados analisados são de grande relevância para embasar a tomada de decisões visando melhorias nas políticas públicas de saneamento, além de possibilitar a adoção de práticas ambientalmente sustentáveis nos sistemas urbanos de água e esgoto.

Tabela 10 - Estimativa da produção de biogás pelo programa ProBio.

Dados inseridos no programa	
DQO afluente	363 (mg/L)
Vazão	928,80 (m ³ /d)
Dados ProBio 1.0 - Cenário típico	
Eficiência remoção DQO	65 (%)
Eficiência redução SO ₄	75 (%)
Coef. produção de lodo	0,15 (kgSV/kgDQO rem)
Coef. produção DQO-lodo	0,213 (kgDQO-lodo/kgDQOrem)
Temperatura operacional do reator	25 (°C)
Produção de metano e biogás	
% de metano no biogás	59,5 (%)
Perda de metano dissolvido no efluente	17,2 (mg/L)
Carga DQO convertida em CH ₄	165,5 (KgDQO-CH ₄ /d)
Produção real de metano no biogás	34,9 (m ³ /d)
Produção real de biogás	58,6 (m ³ /d)
Potencial de geração de energia	
Produção normalizada de metano	32,0 (Nm ³ /d)
Taxa de emissão de metano	210,1 (ton CO ₂ eq)
Energia química disponível	316,7 (kWh/d)
Produção normalizada de biogás	53,7 (Nm ³ /d)

5. CONCLUSÕES

- A ETE de Flecheiras, constituída por UASB seguido por filtro submerso aerado e decantador lamelar, apresentou uma alta eficiência de tratamento em que pese as características médias do efluente tratado 6 mg/l de SST, 78 mg/l de DQO e pH 7,7.
- A desinfecção dos efluentes da ETE após o tratamento não atingiu os padrões estabelecidos nas legislações estadual e federal, resultando em uma qualidade inadequada dos indicadores microbiológicos.
- A aplicação da ACV possibilitou avaliar a sustentabilidade no objeto de estudo, contemplando a adoção e a não adoção da ETE e analisar potenciais impactos negativos nas dimensões ambiental, social e econômica avaliando diferentes cenários, da fase inicial ao final de plano, de operação da ETE.
- Na dimensão ambiental, fase de operação, 20 anos, foram detectados como pontos críticos da ETE o uso da solução de hipoclorito de cálcio na desinfecção do efluente e as emissões de metano, GEE, para a atmosfera.
- Com relação à dimensão social foi demonstrado que os impactos gerados pela ETE (período atual, médio e longo prazo), interferem na saúde humana e na qualidade dos ecossistemas, mas são 85% menos significativos do que seriam se os esgotos não fossem tratados.
- Na dimensão econômica, os custos externos decorrentes dos impactos ambientais mostraram-se significativos em termos monetários, essa avaliação contribuiu para orientar os gestores nas tomadas de decisões visando a sustentabilidade da ETE.
- As propostas de melhorias visaram nortear a gestão sustentável da ETE destacando áreas que necessitam de ajustes e identificando as oportunidades de recuperação de recursos por meio do reuso do efluente tratado, do reaproveitamento do biogás e da destinação adequada do lodo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, P. S.; RODRIGUES, M. B. Proposta de arranjo de indicadores para avaliação da sustentabilidade de estações de tratamento de esgoto por zona de raízes. **Synergismus scyentifica UTFPR**, Pato Branco, v. 6, n. 1, p. 1–8, 2011.

ABOU-ELELA S.I., FAWZY M.E., EL-GENDY A.S. Potential of using biological aerated filter as a post treatment for municipal wastewater, **Ecological Engineering**, v. 84, p. 53-57, 2015.

AGUNYO M.F., J. BORN, WOZEI E., MOELLER B. Exploring the environmental feasibility of integrated sanitation systems for Uganda. **J. Sustain. Dev. Energy Water Environ. Syst.**, v. 7. p. 28-43, 2019.

AHMED Y. Z., EL GENDY AHMED, & EL HAGGAR S. Sustainability Assessment of Municipal Wastewater Treatment. **International Journal of Earth, Energy and Environmental Sciences**, 2017.

AKHOUNDI, A. NAZIF, S. Life-cycle assessment of tertiary treatment technologies to treat secondary municipal wastewater for reuse in agricultural irrigation, artificial recharge of groundwater, and industrial usages. **Journal Environmental Engineering**, v.146, n.6, 2020.

AKYÜZ, M. K. Determining economic and environmental impact of insulation by thermoeconomic and life cycle assessment analysis for different climate regions of Turkey. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 43, n. 7, p. 829–851, 4 set. 2020.

ALVES, I. M. **Avaliação energética e ambiental do ciclo de vida de um sistema de abastecimento de água.** – 70f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, 2018. Caruaru, 2018.

AMARAL, K. G. C.; AISSÉ, M. M.; POSSETTI, G. R. C. Avaliação da sustentabilidade no gerenciamento de lodo e biogás, em estação de tratamento de esgotos utilizando a técnica de ACV. [s. l.], n. 1, p. 1–7, 2018.

AMOR, M. DEL M. D. DEL et al. Tools for evaluation and prediction of industrial noise sources. Application to a wastewater treatment plant. **Journal of Environmental Management**, v. 319, p. 115725, out. 2022.

ANDERSON, K.; OTOO, M.; NOLASCO, M. Innovative sanitation approaches could address multiple development challenges. **Water Science and Technology**, [s.l.], v. 77, p. 855-858, 2018.

ARASHIRO, L.T., MONTERO, N., FERRER, I., ACIÉN, F.G., GÓMEZ, C., GARFÍ, M. Life cycle assessment of high rate algal ponds for wastewater treatment and resource recovery. **Science of the Total Environment**. v. 622–623, p.1118–1130, 2018.

AREIAS I.O.R., MANHÃES R. DA S.T., COLORADO H. A., RODRÍGUEZ R. J. S., SOUZA D., MONTEIRO S. N., VIEIRA C. M. F., Recycling of sewage treatment plant

(STP) waste in red ceramics, **Journal of Materials Research and Technology**, v. 23, p. 53-63, 2023.

ARBOREA S, GIANNOCCARO G, DE GENNARO BC, IACOBELLIS V, PICCINNI AF. Cost–Benefit Analysis of Wastewater Reuse in Puglia, Southern Italy. **Water**. v.9, n. 3, 2017.

ARZATE, S., PFISTER, S., OBERSCHELP C., SÁNCHEZ-PÉREZ J.A. Environmental impacts of an advanced oxidation process as tertiary treatment in a wastewater treatment plant. **Science of the Total Environment**, v. 694, 2019.

ASHRAF, A.; RAMAMURTHY, R.; RENE, E. R. Wastewater treatment and resource recovery technologies in the brewery industry: Current trends and emerging practices. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 47, p. 101432, out. 2021.

ASMELASH A. G.; KUMAR S., Assessing progress of tourism sustainability: Developing and validating sustainability indicators. **Tourism Management**, v.71, 2019, P. 67-83.

ASTERIS, P. G. et al. Machine Learning Approach for Rapid Estimation of Five-Day Biochemical Oxygen Demand in Wastewater. **Water**, v. 15, n. 1, p. 103, 28 dez. 2022.

AUGUSTO, M. R.; CALHEIROS, H. C.; CARVALHO, V. S. B.. Simulação numérica da dispersão do sulfeto de hidrogênio emitido por um reator UASB para tratamento de esgoto doméstico. **Revista Ambiente & Água**, v. 12, n. 2, p. 215–225, mar. 2017.

ARVIDSSON, R., HILDENBRAND, J., BAUMANN, H. et al. A method for human health impact assessment in social LCA: lessons from three case studies. *Int J Life Cycle Assess*, v. 23, p. 690–699, 2018.

AWAD, H.; ALALM, M.G.; EL-ETRIBY, H.K. Environmental and cost life cycle assessment of different alternatives for improvement of wastewater treatment plants in developing countries. **Science of the Total Environment**, v.660, p.57–68, 2019.

BAI, R. L. et al. Quantification of greenhouse gas emission from wastewater treatment plants. **Greenhouse Gases: Science and Technology**, 29 ago. 2022.

BAK, J.; BARBUSÍŃSKI, K.; THOMAS, M. Review of Methods for Assessing the Impact of WWTPs on the Natural Environment. **Clean Technologies**, v. 3, n. 1, p. 98–122, 1 mar. 2021.

BARROS, V. G.; DIEGOLI, S. B.; MOREIRA, N. M.; SILVA, J. C. dos S. Ete. Operação, acompanhamento e desenvolvimento de algoritmo de controle para automatização de remoção de nutrientes de uma estação de tratamento de esgotos piloto, **Brazilian Journal of Development**, v. 7, ed. 5, p. 48996-49009, 2021.

BARBOSA R. B. G.; ALMEIDA R. de S.; MEIRA A. C.S.; SILVA D. R. S.; MOURA L. B.; Pessoa T.; Identificação dos impactos socioambientais decorrentes da implantação da estação de tratamento de esgoto no Semiárido Paraibano. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 10, 2021.

BENI, M. C et al. **Turismo: planejamento estratégico e capacidade de gestão - desenvolvimento regional, rede de produção e clusters**. 1. ed. Barueri: Manole, 2012. v. 2000. 594p.

BNDES-Painel NDC - nossa contribuição para as metas de redução de emissões do Brasil, 2023. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/desenvolvimento-sustentavel/resultados/emissoes-evitadas/>. Acesso em: junho de 2023.

BRASIL, Lei 11.445 de 05 de janeiro de 2007, *Institui as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.666, de 21 de junho de 1993, e 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978*. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/111445.htm. Acesso em: 26 de fevereiro de 2022.

BRASIL, Lei 14.026 de 15 de julho de 2020, Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. **Diário Oficial da União**, Brasília – DF, julho de 2020.

BRASIL. Resolução Conselho Nacional de Recursos Hídricos nº 54, de 28 de novembro de 2005 - Estabelece critérios gerais para reúso de água potável. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília – DF, março de 2006.

BRASIL. Viabilidade técnico-econômica de produção de energia elétrica em ETEs a partir do biogás. 1 ed. Brasília, Distrito Federal: **Ministério das Cidades**, p. 145, 2017b.

BRASIL. **Paris Agreement**: Brazil's Nationally Determined Contribution (NDC). Brasília: MRE. 2022. Acesso em: maio. 2023. Disponível em: <https://www4.unfccc.int/sites/NDCStaging/Pages/Party.aspx?party=BRA>.

BALOGUN S., OGWUELEKA T.C., Coliforms removal efficiency of Wupa wastewater treatment plant, Abuja, Nigeria, **Energy Nexus**, v. 4, 2021.

BISWAS A., CHAKRABORTY S., Organics and coliform removal from low strength domestic wastewater using integrated constructed wetland – microbial fuel cell reactor with bioelectricity generation, **Journal of Cleaner Production**, v. 408, 2023.

BILOTTA, P.; ROSS, B.Z.L. Estimativa de geração de energia e emissão evitada de gás de efeito estufa na recuperação de biogás produzido em estação de tratamento de esgotos. **Eng. Sanit. Ambient.**, Vol. 21, n. 2, p. 275 – 282, 2016.

BITTENCOURT, S.; AISSE, M.M.; SERRAT, B.M. Gestão do uso agrícola do lodo de esgoto: estudo de caso do estado do Paraná, Brasil. **Eng. Sanit. Ambient.**, v. 22, n. 6, p.1129 – 1139, 2017.

BITTENCOURT, S.; SERRAT, B.M.; AISSE, M.M.; GOMES, D. (2014) Sewage sludge usage in agriculture: a case study of its destination in the Curitiba Metropolitan Region, Paraná, Brazil. **Water Air Soil Pollution**, v. 225, n. 9, p. 2074-2082, 2014.

BYRNE, D.; LOHMAN, H.; COOK, S.; PETERS, G.; GUEST, J. (2017). Life Cycle Assessment (LCA) of Urban Water Infrastructure: Emerging Approaches to Balance Objectives and Inform Comprehensive Decision-Making. *Environ. Sci.: Water Res. Technol.*, 2017.

BOLDRIN, M. T. N., FORMIGA K. T. M., PACCA S. A., Environmental performance of an integrated water supply and wastewater system through life cycle assessment — A Brazilian case study, **Science of The Total Environment**, v.835, 2022.

BORZOOEI, S.; CAMPO, G.; CERUTTI, A.; MEUCCI, L.; PANEPINTO, D.; RAVINA, M.; RIGGIO, V.; RUFFINO, B.; SCIBILIA, G.; ZANETTI, M. Feasibility analysis for reduction of carbon footprint in a wastewater treatment plant. *J. Clean. Prod.* 2020, 271, 122526.

BORJA, P. C.; MORAES, L., R., S. Indicadores de saúde ambiental com enfoque para a área de saneamento. Parte I – aspectos conceituais e metodológicos. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s.l.], Vol. 8, n. 1, p. 13-25, 2003.

BRESSANI-RIBEIRO, T.; MOTA FILHO, C.R.; MELO, V.R.; BIANCHETTI, F.J.; CHERNICHARO, C.A.L. Planning for achieving low carbon and integrated resources recovery from sewage treatment plants in Minas Gerais, Brazil. **J. Environ. Manage.**, v. 242, p. 465-473, 2019

BRUYN, S. de BIJLEVELD, M., GRAAFF, L. de SCHEP, E., SCHROTEN, A., VERGEER, R., AHDOUR, S. **Environmental Prices Handbook**. Delft, CE Delft Committed to the Environment, 2018.

BUENO R. de F., ANDRADE T. M., FARIA J. K., LIDUINO V. S. UASB technology and constructed wetland alternative to sewage treatment of small communities. **Environmental Engineering and Management Journal**, Vol. 19, nº. 7, p.1181-1188, 2020.

BUENO, C., **Avaliação de ciclo de vida na construção civil: análise de sensibilidade**. – 268f. Tese (doutorado) – Universidade de São Paulo., 2014. São Carlos, 2014.

BUONOCORE, E.; MELLINOVA, S.; ANGELISB, G.; LIUB, G.; ULGIATIA, S. Life cycle assessment indicators of urban wastewater and sewage sludge treatment. **Ecological Indicators**, v. 94, p.13–23, 2018.

BYLIŃSKI, H. et al. Monitoring of odors emitted from stabilized dewatered sludge subjected to aging using proton transfer reaction–mass spectrometry. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 6, p. 5500–5513, 4 jan. 2019.

CAGECE. **Nossa História**. 2021. Disponível em: <https://www.cagece.com.br/quem-485-somos/historia/>. Acessado em: 26 de fevereiro de 2022.

ÇAPA S., ÖZDEMİR A., GÜNKAYA Z., ÖZKAN A., BANAR M., An environmental and economic assessment based on life cycle approaches for industrial wastewater treatment and water recovery. **Journal of Water Process Engineering**, v. 49,2022.

CALIJURI, M. L.; SANTIAGO, A. F.; CAMARGO, R. A. et al. Estudo de indicadores de saúde ambiental e de saneamento em cidade do Norte do Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s. l.], Vol. 14, n. 1, p. 19-28, 2009.

CAVALCANTE, K. L., MACIEL, W. M., MACIEL, H. M., NOGUEIRA, D. H., PEREIRA, S. M., e TELES, L. P. do N. Análise Físico-Químico da Qualidade de Efluentes para Fins de Reuso na Irrigação no Município de Iguatu – CE. **Brazilian Journal of Development**. v.6, n.10, 2020.

CAMPOS, F.; NOLASCO, M. A. Prospecção Científica e Tecnológica Aplicada ao Conceito de Estações de Tratamento de Esgoto Sustentáveis. **Cadernos de Prospecção**, [s. l.], Vol. 14, ed. 3, p. 964-980, 2021.

CAMPOS, A. A.; POLETTE, M. A Gestão Integrada da Zona Costeira. In: MONTEIRO, Andreia Quandt; NETO, Cassiano Monteiro; POLETTE, Marcus. (Coord.). **A zona costeira do Ceará: diagnóstico para a gestão integrada**. Parte I. Fortaleza: ASSOCIAÇÃO DE PESQUISA E PRESERVAÇÃO DE ECOSISTEMAS AQUÁTICOS – AQUASIS, 2003. p. 13-21.

CANAJ K., MEHMETI A., MORRONE D., TOMA P., TODOROVIC M., Life cycle-based evaluation of environmental impacts and external costs of treated wastewater reuse for irrigation: A case study in southern Italy. **Journal of Cleaner Production**, v 293, 2021.

CASTRO NETO, P. de L. **Derramamento de esgotos nas praias de Manaíra e Bessa: A percepção social de um problema ambiental**. Trabalho de conclusão de curso. 37f.: il. Universidade Federal da Paraíba – João Pessoa, 2018.

CARTAXO, A. S. B.; ALBUQUERQUE, M. V. C.; SILVA, M. C. C. P.; RODRIGUES, R. M. M.; RAMOS, R. O.; SÁTIRO, J. R.; LOPES, W. S.; LEITE, V. D. Contaminantes emergentes presentes em águas destinadas ao consumo humano: ocorrência, implicações e tecnologias de tratamento. **Brazilian Journal of Development**, Vol.6, n.8, p.61814-61827, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n8-559>.

CERNAT L., GOURDON J. Paths to success: Benchmarking cross-country sustainable tourism. **Tourism Management**, v. 33, n. 5, p. 1044-1056, 2012.

CERQUEIRA, P. L. W.; AISSE, M. M. Custos de processamento de lodo em Estações de Tratamento de Esgoto com reatores anaeróbios de manto de lodo e pós-tratamento aeróbio: subsídios para Estudos de Concepção. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Vol. 26, n. 2, p. 251–262, mar. 2021.

CHEN S.; ZHU X.; ZHOU Y.; YAN Y.; WANG R.; HAN P. Measurement of water resources carrying capacity in Gugang Town of Central China based on human-water-agriculture framework, **Science of The Total Environment**, Volume 881, 163459, ISSN 0048-9697, 2023.

CHERNICHARO, C.A.L.; VAN LIER, J.B.; NOYOLA, A.; RIBEIRO, T.B. (2015) Anaerobic Sewage Treatment: State of the Art, Constraints and Challenges. **Rev Environ Sci Biotechnol**. V. 14, p. 649–679, 2015.

CHERNICHARO, C. A. de L. **Reatores anaeróbicos**. 2ª ed. ampliada e atualizada. Belo Horizonte: DESA – UFMG, 2016, v. 5, 379 p. ISBN 9788542301724, 2016.

CHERNICHARO, C.; BRANDT, E.; BRESSANI-RIBEIRO, T.; MELO, V.; BIANCHETTI, F.; MOTA FILHO, C.; MCADAM, E. Development of a tool for improving the management of gaseous emissions in UASB-based sewage treatment plants. **Water Pract. Technol.**, v.12, n. 4, p. 917–926, 2017.

CHERNICHARO, C.A.L.; RIBEIRO, T.B; PEGORINI, E.S.; POSSETTI, G.R.C.; MIKI, M.K.; SOUZA, S.N. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário. Parte 1: Tópicos de Interesse. **Revista DAE**, São Paulo, v.66, n.214, 2018.

CHHIPI-SHRESTHA, G.; HEWAGE, K.; SADIQ, R. Selecting sustainability indicators for small to medium sized urban water systems using fuzzy-ELECTRE. **Water Environ. Res.**, [s. l.], v. 89, n. 3, p. 238–249, 2017.

CHRISTODOULOU A., STAMATELATOU K.; Overview of legislation on sewage sludge management in developed countries worldwide. **Water Sci Technol.** 2016; Vol.73 n.3, p. 453–462, 2016.

CHUEIRI, D. M.A.; FORTUNATO, R. A. Turismo e esgoto domésticos na Ilha Grande (RJ): uma análise exploratória nas praias de Abraão e Aventureiro. **Revista Brasileira de Ecoturismo**, São Paulo, v.14, n.1, p. 55-73, 2021.

CLAUDINO, E. S.; TALAMINI, E.. Análise do Ciclo de Vida (ACV) aplicada ao agronegócio: uma revisão de literatura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 1, p. 77–85, jan. 2013.

COLTRO, L; MOURAD, A. L.; GARCIA, E. C.; QUEIROZ, G. **Avaliação do Ciclo de Vida como Instrumento de Gestão**. Centro de Tecnologia de Embalagem – CETEA / ITAL, 2007.

COROMINAS, L.; BYRNE, D.M; GUEST, J.S.; HOSPIDO, A.; ROUX, P.; SHAW, A.; SHORT, MD. The application of life cycle assessment (LCA) to wastewater treatment: A best practice guide and critical review. **Water Research**, v.184, 2020.

COROMINAS, L., FOLEY, J., GUEST, J. S., HOSPIDO, A., LARSEN, H. F., MORERA, S., & SHAW, A. Life cycle assessment applied to wastewater treatment: state of the art. **Water Research**. 47(15), 5480-5492. 2013.

CORNEJO, P.K.; ZHANG, Q.; MIHELICIC, J.R. How does scale of implementation impact the environmental sustainability of wastewater treatment integrated with resource recovery? *Environmental Science and Technology*, v. 50, n. 13, p. 6680-6689, 2016.

COSSIO, C. et al. EVAS - a practical tool to assess the sustainability of small wastewater treatment systems in low and lower-middle-income countries. **Science of The Total Environment**, v. 746, p. 140938, dez. 2020.

CUNHA, R. J. G., NAKADA, L. Y. K., LONGO, R. M. L., URBAN, R. C. Efluentes com foco em melhoria da qualidade da água de reuso: estudo de caso em uma indústria farmacêutica. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica**. v.14. p.1413-1428, 2021.

DAI, T. et al. Potential linkage between WWTPs-river-integrated area pollution risk assessment and dissolved organic matter spectral index. **Environmental Geochemistry and Health**, 25 jun. 2023.

DEMIR, Ö.; YAPICIOĞLU, P. Investigation of GHG emission sources and reducing GHG emissions in a municipal wastewater treatment plant. **Greenhouse Gases: Science and Technology**, 2019.

DIMOSKA, T., PETREVSKA, B. **Indicators for sustainable tourism development in Macedonia**. Conference proceedings, first international conference on business, economics and finance »From liberalization to globalization: Challenges in the changing world, Štip, Macedonia, pp. 389–400, 2012.

DINÇER, F. et al. Dispersion modeling and air quality measurements to evaluate the odor impact of a wastewater treatment plant in İzmir. **Atmospheric Pollution Research**, maio 2020.

DUARTE, O.; SÁNCHEZ, L.; CÁRDENAS, M.; CANTÃO, M.; POSSETTI, G.R.C.; AISSE, M.M. Ventajas y desventajas del uso de la espectrofotometría monitoreando la calidad del agua residual en un reactor anaeróbico. **Revista Científica Unet.**, v. 30, p. 302 – 312, 2018.

DUARTE, A. D.; SILVA, G. L., Aplicação da ferramenta de Análise de Ciclo de Vida (ACV) no processo de tratamento de efluentes em uma lavanderia de beneficiamento de jeans. **Exacta engenharia de produção**, v.15, n.2, p. 355-367, 2020.

DWIPAYANTI, N. M. U. et al. Inclusive WASH and sustainable tourism in Labuan Bajo, Indonesia: needs and opportunities. **Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development**, v. 12, n. 5, p. 417–431, 1 maio 2022.

ENGLANDE AJ, REIMERS RS (2001) Gestão de bio sólidos – situação de desenvolvimento sustentável e direção futura. **Wat Sci Tech**. v. 44, n. 10, p.41–46.

EUROSTAT. **Annual inflation stable at 0.9% in the euro area: Up to 1.3% in the EU**, 2023. Disponível em: <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/2995521/11562987/2-17032021-APEN.pdf/388cc26e-eac1-6dae-8312-d1b6c3c0afa7>. Acesso em: maio de 2023.

FAJARDO, P. A.; SALVADOR, N. N. B.; TEIXEIRA, B. A. N. Estações de tratamento de esgoto sanitário: uma abordagem sobre a sustentabilidade. **8o Congresso Luso - Moçambicano de Engenharia / V Congresso de Engenharia de Moçambique**, [s. l.], p. 4–8, 2017.

FAN, F. et al. Application of activated sludge for odor control in wastewater treatment plants: Approaches, advances and outlooks. **Water Research**, v. 181, p. 115915, 15 ago. 2020.

FARAGÒ, M. et al. From wastewater treatment to water resource recovery: Environmental and economic impacts of full-scale implementation. **Water Research**, v. 204, p. 117554, out. 2021.

FREIRE, R.C. **Proposta de um sistema de indicadores de sustentabilidade para a gestão de estações de tratamento de esgoto**. 2021. 171 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

FREIRE, R. C., SILVA, F. J. A., OLIVEIRA FILHO, R. L., TARGINO, J. M., SILVA M. das G.M. Desempenho de uma ETE tipo UASB seguido de FSA (Estudo de Caso). **Brazilian Journal. of Development**. vol. 6, n.12, p.102760-102773, 2020.

FREITAS, B. DE O.; DANIEL, L. A. A new anaerobic, aerobic, nitrification, anoxic reactor (AANAR) with overlaid biological zones: Sulfide removal from wastewater and biogás. **Chemical Engineering Journal**, v. 452, p. 139255, jan. 2023.

FAUSTINI, V.C., GABRIELA, C., RIBEIRO, F., REIS, V., LOZER, J.G., GORZA, N.L., BRITO, P.B. (2018) **Estudo de caso sobre a implantação de sistema de reuso urbano não potável em estações de tratamento de esgoto**, 29º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente. Vitória, Brasil, 2018.

FOGLIA A. et al., Comparative life cycle environmental and economic assessment of anaerobic membrane bioreactor and disinfection for reclaimed water reuse in agricultural irrigation: A case study in Italy. **Journal of Cleaner Production**, v. 293, 2021.

FLORIPES, T.C.; CHERNICHARO, C.A.L.; MOTA FILHO, C.R. Avaliação do descarte de excesso de lodo secundário de FBP sobre o desempenho de reatores UASB em escala plena: estudo de caso da ETE Laboreaux – Itabira-MG. **Revista DAE**, São Paulo, v. 66, n. 211, p. 89-104, jul./set. 2018.

GALLEGO-SCHMID, A.; TARPANI, R. R. Z. Life cycle assessment of wastewater treatment in developing countries: A review. **Water Research**, v. 153, p. 63–79, abr. 2019.

GARRIDO-BASERBA, M.; HOSPIDO, A.; REIF, R.; MOLINOS-SENANTE, M.; COMAS, J.; POCH, M. Including the environmental criteria when selecting a wastewater treatment plant. **Environm. Modelling and Software**, [s. l.], v. 56, p. 74-82, 2014.

GAMEIRO, T. et al. Role of waste-based geopolymer spheres addition for pH control and efficiency enhancement of anaerobic digestion process. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, v. 44, n. 6, p. 1167–1183, 1 jun. 2021.

GÉMAR, G., GÓMEZ, T., MOLINOS-SENANTE, M., CABALLERO, R., 2018. Assessing changes in eco-productivity of wastewater treatment plants: the role of costs, pollutant removal efficiency and greenhouse gas emissions. **Environmental Impact Assessment Review**. 69, p. 24–31, 2018.

GUIMARÃES F. F.R., C.; NOIA A. C.; SANTOS S., A. Ocupações formais no setor de turismo do nordeste brasileiro: um estudo sobre as diferenças entre gêneros. **TURYDES: Revista sobre Turismo y Desarrollo local sostenible**, v. 12, n. 26, p. 35, 2019.

GODOI, A. F. L. et al. Human exposure to hydrogen sulphide concentrations near wastewater treatment plants. **Science of The Total Environment**, v. 610-611, p. 583–590, 1 jan. 2018.

GOFFI A. S., TROJAN, F., DE LIMA, J. D., LIZOT, M., THESARI, S.S.; Economic feasibility for selecting wastewater treatment systems. **Water Sci Technol**, 2018; 78 (12): 2518–2531.

GOEDKOOP, M.; HEIJUNGS R.; DE SCHRYVER A.; STRUIJS J.; VAN ZELM R. **ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and the endpoint level/Report I: Characterization**. Holanda: Ministerie van VROM, Den Haag, 2009.

GUERRA-RODRÍGUEZ S., CUESTA S., PÉREZ J., E. RODRÍGUEZ, RODRÍGUEZ-CHUECA J. Life Cycle Assessment of sulfate radical based-AOPs for wastewater disinfection, **Chemical Engineering Journal**, Volume 474, 2023.

HEIMERSSON, S.; SVANSTRÖM, M.; EKVALL, T. Opportunities of consequential and attributional modelling in life cycle assessment of wastewater and sludge management. **Journal of Cleaner Production**, v. 222, p. 242–251, jun. 2019.

HERRERO C. C., et al. Tourism under a life cycle thinking approach: A review of perspectives and new challenges for the tourism sector in the last decades. **Science of The Total Environment**. v. 845, 2022.

HERNÁNDEZ-CHOVER, V. et al. Circular economy and efficiency to ensure the sustainability in the wastewater treatment plants. *Journal of Cleaner Production*, v. 384, p. 135563, 15 jan. 2023.

HERNÁNDEZ-PADILLA, F., MARGNI, M., NOYOLA, A., GUERECA-HERNANDEZ, L., BULLE, C. Assessing wastewater treatment in Latin America and the Caribbean: enhancing lifecycle assessment interpretation by regionalization and impact assessment sensibility. **Journal of Cleaner Production**. v. 142, p. 2140–2153, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.068>.

HAUSCHILD, M.Z., HUIJBREGTS, M.A.J. 2015. Introducing life cycle impact assessment. In *Life cycle impact assessment*. **Springer**, 1–16, 2015.

HUANG, F. et al. Impacts of dissolved oxygen control on different greenhouse gas emission sources in wastewater treatment process. **Journal of Cleaner Production**, v. 274, p. 123233, nov. 2020.

HUANG B., et al., Life cycle cost analysis of solar energy via environmental externality monetization, **Science of The Total Environment**, v. 856, Part 1, 2023.

HUERTAS-VALDIVIA, I.; FERRARI, A.M.; SETTEMBRE-BLUNDO, D.; GARCÍA-MUIÑA, F.E. Social Life-Cycle Assessment: A Review by Bibliometric Analysis. **Sustainability**, v.12, n.15 6211, 2020.

HUIJBREGTS, M. A. J., STEINMANN, Z. J. N., ELSHOUT, P. M. F., STAM, G., VERONES, F., VIEIRA, M. D. M., HOLLANDER, A., ZIJP, A. M., VAN ZELM, R. **Report I: Characterization: ReCiPe 2016 A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level.** Bilthoven, The Netherlands: National Institute for Public Health and the Environment, p. 201, 2017.

HUH, S.-Y.; SHIN, J.; RYU, J. Expand, relocate, or underground? Social acceptance of upgrading wastewater treatment plants. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 36, p. 45618–45628, 15 ago. 2020.

HUNT, C. C. **Modelo multicritério de apoio à decisão aplicado à seleção de sistema de tratamento de esgoto para pequenos municípios.** 2013. Universidade Federal do Rio de Janeiro, [s. l.], 2013.

IPECE - INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ. **Perfil Básico Municipal do Trairi.** Governo do Estado do Ceará. Secretaria de Gestão e planejamento, 2017.

IOC/UNESCO, 2011. **A Blueprint for Ocean and Coastal Sustainability.** IOC/UNESCO, Paris, 2011.

IPCC, 2014: **Climate Change 2014 Impacts, Adaptation, and Vulnerability Part A: Global and Sectoral Aspects Working Group II Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change;** Field, C. B., Bilir, T. E., Kissel, E. S., Levy, A. N., Mach, K. J., Mastrandrea, M. D., White, L. L. et al., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom, 2014.

IPCC, 2019: **2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.** Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S. (eds). Published: IPCC, Switzerland.

JANI, AHMAD T., WANI M. S., ALI DAR S., WANI N. A., MALIK N. A., TANTARY Y. R. Chapter 1 - Threats and consequences of untreated wastewater on freshwater environments. **Microbial Consortium and Biotransformation for Pollution Decontamination**, p.1-26, 2022.

JIMÉNEZ, B. et al. Helminth Egg Automatic Detector (HEAD): Improvements in development for digital identification and quantification of helminth eggs and their application online. *Experimental Parasitology*, v. 217, p. 107959, out. 2020.

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos.** 4. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2005.

JORDÃO, E.P; PESSÔA, C.A. **Tratamento de Esgotos Domésticos.** 6. ed. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2011.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos.** 7. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2014.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 8. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2017.

KALBAR, P.P.; KARMAKAR, S.; ASOLEKAR, S. R. Assessment of wastewater treatment technologies: life cycle approach. **Water and Environment Journal**, v.27, p.261–268, 2013.

KALBAR, P.P., BIRKVED, M., NYGAARD, S.E. AND HAUSCHILD, M., Weighting and Aggregation in Life Cycle Assessment: Do Present Aggregated Single Scores Provide Correct Decision Support?. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, p. 1591-1600, 2017.

KAMBLE, S. et al. Environmental and economic performance evaluation of municipal wastewater treatment plants in India: a life cycle approach. *Water Science and Technology*, v. 79, n. 6, p. 1102–1112, 15 mar. 2019.

KAMINSKI, G.F.; WAGNER, L.G.; SILVA, F.O.M.; POSSETTI, G.R.C. Análise crítica acerca da aplicação de queimadores enclausurados em ETEs para destruição de biogás. In: **SIMPÓSIO MAUI BRASIL**, 3 – Alemanha. Anais [...]. Curitiba, PR: Universität Stuttgart, UFPR, SENAI e ABES: ABES, 2017.

KRASAVTSEVA, E. A. et al. Removal of Suspended Solids from Industrial Wastewater. **Journal of Mining Science**, v. 58, n. 3, p. 466–475, jun. 2022.

KAUR H.; GARG P., Urban sustainability assessment tools: A review. *Journal of Cleaner Production*. v.210,2019, p. 146-158, 2019.

KELLNER, E.; CALIJURI, M. C.; PIRES, E. C. Aplicação de indicadores de sustentabilidade para lagoas de estabilização. **Eng Sanit Ambien**, v. 14, n. 4, p.455-464, out/dez. 2009.

KHANLARI A., TUNCER A. D., SÖZEN A., ŞIRIN C., GUNGOR A. Energetic, environmental and economic analysis of drying municipal sewage sludge with a modified sustainable solar drying system, **Solar Energy**, V. 208 ,2020, P.787-799.

KOLLMANN, J. et al. Acceptance of on-site wastewater treatment and reuse in Bengaluru, India: The role of perceived costs, risks, and benefits. **Science of The Total Environment**, v. 895, p. 165042, 15 out. 2023.

KÖRGMAA, V. et al. Removal of hazardous substances in municipal wastewater treatment plants. **Water Science and Technology**, v. 81, n. 9, p. 2011–2022, 1 maio 2020.

KUMAR, A. et al. Greenhouse gases emission control in WWTS via potential operational strategies: A critical review. **Chemosphere**, v. 273, p. 129694, 1 jun. 2021.

LIMA, D.; APPLEBY, G.; LI, L. A Scoping Review of Options for Increasing Biogas Production from Sewage Sludge: Challenges and Opportunities for Enhancing Energy Self-Sufficiency in Wastewater Treatment Plants. **Energies**, v. 16, n. 5, p. 2369, 1 mar. 2023.

LIMPHITAKPHONG, N.; PHARINO, C.; KANCHANAPIYA, P. Environmental impact assessment of centralized municipal wastewater management in Thailand. *Int. J. Life Cycle Assess.*, v. 21, p.1789–1798, 2016.

LINS, G. A. (2010). **Avaliação de Impactos em Estação de tratamento de esgotos (ETE)**. Rio de Janeiro, Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

LIU, J. & ZHAO, D. (2020). Three-dimensional water scarcity assessment by considering water quantity, water quality, and environmental flow requirements: Review and prospect. *Chinese Science Bulletin*. 65. 4251-4261. 10.1360/TB-2020-091, 2020.

LING, J.; GERMAIN, E.; MURPHY, R.; SAROJ, D. Designing a Sustainability Assessment Framework for Selecting Sustainable Wastewater Treatment Technologies in Corporate Asset Decisions. *Sustainability*, v.13, n. 7, 2021.

LIZOT, M., GOFFI, A.S., THESARI, S.S. et al. Multi-criteria methodology for selection of wastewater treatment systems with economic, social, technical and environmental aspects. *Environ Dev Sustain* 23, 9827–9851 (2021).

LOBATO, L. C. S. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgotos domésticos**. Tese de Doutorado. UFMG – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Belo Horizonte – MG, 2011.

LOEHR, J. et al. Safer destinations, healthier staff and happier tourists: Opportunities for inclusive water, sanitation and hygiene in tourism. *Tourism Management Perspectives*, v. 40, p. 100883, out. 2021.

LOTFI, K. et al. Predicting wastewater treatment plant quality parameters using a novel hybrid linear-nonlinear methodology. *Journal of Environmental Management*, v. 240, p. 463–474, 15 jun. 2019.

LOPES, T. A. de S. **Avaliação do ciclo de vida de uma ETE composta por reator UASB seguido de Wetlands construídos**. – 136f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2014. Salvador, 2014.

LOPES, T. A. de S.; QUEIROZ, L. M.; KIPERSTOK, A.. Environmental performance of a full-scale wastewater treatment plant applying Life Cycle Assessment. *Revista Ambiente e Água*, v. 13, p. 1-10, 2018.

LOPES, T. A. de S., QUEIROZ, L. M., TORRES EDNILDO A., KIPERSTOK A. Low complexity wastewater treatment process in developing countries: A LCA approach to evaluate environmental gains. *Science of The Total Environment*, v. 720, 2020.

LOPES, T. A. de S. **Desempenho ambiental e energético do tratamento de esgotos sanitários por meio da associação do processo anaeróbio e Wetlands construídos**. – 173f. Tese (doutorado) – Universidade Federal da Bahia., 2021. Salvador, 2021.

LUCKERT, A. et al. Odour mapping and air quality analysis of a wastewater treatment plant at a seaside tourist area. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 195, n. 8, 1 ago. 2023.

LUTTERBECK, C.A.; KIST, L.T.; LOPEZ, D.R.; ZERWES, F.V.; MACHADO, E.L. Life cycle assessment of integrated wastewater treatment constructed wetlands in rural areas. **J. Clean. Prod.**, v.148, p.527–536, 2017.

LYU, Y. et al. Managing water sustainability in textile industry through adaptive multiple stakeholder collaboration. **Water Research**, v. 205, p. 117655, 15 out. 2021.

MACHADO, Ê. L., COLARES, G. S., CERENTINI, P., e PARANHOS, G. (2021). Avaliação de Ciclo de Vida e Econômica de Sistema de Tratamento e Reuso de Efluentes Integrando Reatores Anaeróbios, Wetlands Construídos e Ozonização. **Revista Jovens Pesquisadores**, v.11, n.1, p.45-59. 2021.

MANNINA, G.; REBOUÇAS, T. F.; COSENZA, A.; SÀNCHEZ-MARRÈ, M.; GIBERT, K. Decision support systems (DSS) for wastewater treatment plants – A review of the state of the art. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 290, n. May, p. 121814, 2019.

MANNINA, G. et al. Enhancing a Transition to a Circular Economy in the Water Sector: The EU Project WIDER UPTAKE. **Water**, v. 13, n. 7, p. 946, 30 mar. 2021.

MAŽEIKIENĖ A, ŠARKO J. Additional Treatment of Nitrogen and Phosphorus Using Natural Materials in Small-Scale Domestic Wastewater Treatment Unit. **Water**. 2023.

MEDEIROS, G. M. G. **Modelo conceitual para gestão de águas de drenagem urbana em regiões semiáridas**. – 230f. Tese (doutorado) – Universidade Estadual da Paraíba., 2021. Campina Grande, 2021.

MEENA R. A. A., et al. Trends and resource recovery in biological wastewater treatment system, **Bioresource Technology Reports**, Volume 7, 2019.

MEHMETI, A.; CANAJ, K. Environmental Assessment of Wastewater Treatment and reuse for Irrigation: A Mini-Review of LCA Studies. **Resources**, v. 11, n. 10, p. 94, 13 out. 2022.

METCALF, L.; EDDY H. P. **Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.

MENDES, N.C., BUENO, C., OMETTO, A.R. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. **Production**, v. 26, p. 160–175, 2015.

MICHALAKE, A. E., SILVA, C. R. da, e SILVA F. F. da. Análise dos parâmetros físico-químicos do esgoto tratado de Curitiba (PR) - Estação Belém. **Ciência e Natura**, vol. 38, n. 3, p.1560-1569, 2016.

MITRAKA G.-C. et al. A Comprehensive Review on Pretreatment Methods for Enhanced Biogas Production from Sewage Sludge. **Energies**, v. 15, n. 18, p. 6536–6536, 7 set. 2022.

MOLINOS-SENANTE, M.; GÓMEZ, T.; GARRIDO-BASERBA, M.; CABALLERO, R.; SALA-GARRIDO, R. Assessing the sustainability of small wastewater treatment systems: A composite indicator approach. **Science Of The Total Environment**, Spain, v. 498, n. 497, p. 607-617, ago. 2014.

MORAVEC, M. et al. Proposed Options for Noise Reduction from a Wastewater Treatment Plant: Case Study. **Sustainability**, v. 13, n. 4, p. 2409, 23 fev. 2021.

MOREL, S., TRAVERSO, AND M., PREISS, P., 2018. Discussion panel assessment of externalities: monetisation and social LCA. In: **Designing Sustainable Technologies, Products and Policies**, 2018.

MOREIRA, H.C. Biogás em estações de tratamento de esgotos: os principais legados da cooperação técnica Brasil-Alemanha. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017, 174 p.

MOTA, S. **Introdução à Engenharia Ambiental**. 5. ed. Rio de Janeiro: Abes, 2012. p.524.

MU, D., WU, J., LI, X. et al. Identification of the Spatiotemporal Variability and Pollution Sources for Potential Pollutants of the Malian River Water in Northwest China Using the PCA-APCS-MLR Receptor Model. **Expo Health** (2023).

MUGA, H. E.; MIHELICIC, J. R. Sustainability of wastewater treatment technologies. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 88, 2008, p. 437–447.

MUNDIM, B. C.; VOLSCHAN JR., I.; HOFFMANN, B. S. **Utilização da avaliação do ciclo de vida em estações de tratamento de esgoto doméstico no Brasil**. In: 30 Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2019, Natal. 30 Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2019.

NAYEB, H. et al. Estimating greenhouse gas emissions from Iran's domestic wastewater sector and modeling the emission scenarios by 2030. **Journal of Cleaner Production**, v. 236, p. 117673, nov. 2019.

_____. **NBR ISO 14.040**: Gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2014a.

_____. **NBR ISO 14.044**: Gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2014b.

NAIR K S., MANU B.; AZHONI A. Sustainable treatment of paint industry wastewater: Current techniques and challenges. **Journal of Environmental Management**, v. 296, p. 113105, 15 out. 2021.

NGUYEN, T. L. T., LARATTE, B., GUILLAUME, B., HUA, A. Quantifying environmental externalities with a view to internalizing them in the price of products, using different monetization models. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 109, p. 13 – 23, 2016.

NGUYEN, T. K. L. et al. A critical review on life cycle assessment and plant-wide models towards emission control strategies for greenhouse gas from wastewater treatment plants. **Journal of Environmental Management**, v. 264, p. 110440, jun. 2020.

NIERO, M.; PIZZOL, M.; BRUUN, H. G.; THOMSEN, M. Comparative life cycle assessment of wastewater treatment in Denmark including sensitivity and uncertainty analysis. **Journal of Cleaner Production**, v.68, p.25–35, 2014.

NOURREDINE, H. et al. Linking Urban Water Management, Wastewater Recycling, and Environmental Education: A Case Study on Engaging Youth in Sustainable Water Resource Management in a Public School in Casablanca City, Morocco. **Education Sciences**, v. 13, n. 8, p. 824, 1 ago. 2023.

OLIVEIRA, T. C. R. DE et al. Classificação dos cenários costeiros de praias da Ilha de Santa Catarina, Florianópolis – Brasil. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 39, p. 217–229, 2016.

OMRAN I. I., AL-SAATI N. H., AL-SAATI H. H., HASHIM K. S., AL-SAATI Z. N.; Sustainability assessment of wastewater treatment techniques in urban areas of Iraq using multi-criteria decision analysis (MCDA). **Water Practice and Technology** (2021); 16 (2): 648–660. doi: <https://doi.org/10.2166/wpt.2021.013>.

ORGANIZAÇÃO MUNDIOAL DE SAÚDE - OMS (2023). **Burden of disease attributable to unsafe drinking-water, sanitation and hygiene: 2019 update**. Disponível em: <<https://www.who.int/publications/i/item/9789240075610>>.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE TURISMO – OMT. **Guia de desenvolvimento do turismo sustentável**. Tradução de Sandra Netz. Porto Alegre: Bookman, 2003.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE TURISMO – OMT. **Turismo na agenda 2030** Disponível em: <https://www.unwto.org/tourism-in-2030-agenda> (2021), acessado em 26 de dezembro de 2021.

ORTIZ, M., RALUY R. G., AND SERRA L. Life cycle assessment of water treatment technologies: Wastewater and water-reuse in a small town. **Desalination**. v. 204 (1–3), p.121–131, 2007.

PAPA M., FOLADORI P., GUGLIELMI L., BERTANZA G. How far are we from closing the loop of sewage resource recovery? A real picture of municipal wastewater treatment plants in Italy. *Journal of Environmental Management*. v. 198, p.9-15, 2017.

PASCIUCCO F., PECORINI I., IANNELLI R. A comparative LCA of three WWTPs in a tourist area: Effects of seasonal loading rate variations. **Science of The Total Environment**, v. 863, 2023.

PASQUALINO, J. C., MENESES, M., ABELLA, M., E CASTELLS, F. (2009). LCA as a decision support tool for the environmental improvement of the operation of a municipal wastewater treatment plant. **Environmental science & technology**, v. 43, n.9, 2009.

PATEL, A. et al. Physico-chemical and biological treatment strategies for converting municipal wastewater and its residue to resources. **Chemosphere**, v. 282, p. 130881, 1 nov. 2021.

- PICCARDO, M. T. et al. Odor emissions: A public health concern for health risk perception. **Environmental Research**, v. 204, p. 112121, 1 mar. 2022.
- PINTILIE L., TORRES C. M., TEODOSIU C., CASTELLS F. Urban wastewater reclamation for industrial reuse: An LCA case study. **Journal of Cleaner Production**. v. 139, p.1-14, 2016.
- PLAKAS, K. V.; KARABELAS, A. J.; GEORGIADIS, A. A. Sustainability assessment of tertiary wastewater treatment technologies: A multi-criteria analysis. **Water Science and Technology**, [s. l.], v. 73, n. 7, p. 1532–1540, 2016.
- PLAUBORG F. et al. Cost effectiveness, nitrogen, and phosphorus removal in field-based woodchip bioreactors treating agricultural drainage water. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 195, n. 7, 16 jun. 2023.
- PIGOU, A.C. **The economics of welfare**. London: Macmillan and Co., 1929.
- PRATEEP NA TALANG, R., SIRIVITHAYAPAKORN, S., POLRUANG, S. Environmental impacts and cost-effectiveness of Thailand's centralized municipal wastewater treatment plants with different nutrient removal processes, **Journal of Cleaner Production**, v. 256, 2020.
- PEROTTO, E.; CANZIANI, R.; MARCHESI, R.; BUTELLI, P. Environmental performance, indicators and measurement uncertainty in EMS context: a case study. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 16, n. 4, p. 517–530, 2008.
- POSSETTI, G.R.C. et al. Energy recovery from biogas in UASB reactors treating sewage. In: CHERNICHARO, C.A.L.; BRESSANI-RIBEIRO, T. (ed.). *Anaerobic reactors for sewage treatment: design, construction and operation*. London: **IWA Publishing**, p. 194 – 236, 2019.
- POSSETTI, G. R. C. et al. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário - Parte 5: Biogás e emissões fugitivas de metano. **Revista DAE**, v. 66, n. 214, p. 73–89, 2018.
- POSSETTI, G.R.C. et al. Medições em tempo real do biogás produzido em reatores UASB alimentados com esgoto doméstico. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**, 27., 2013, Anais [...]. Goiânia, GO: ABES, 2013.
- PRÜSS-USTÜN A., WOLF J., BARTRAM J., CLASEN T., CUMMING O., FREEMAN M.C., GORDON B., HUNTER P.R., MEDLICOTT K., JOHNSTON R. Burden of disease from inadequate water, sanitation and hygiene for selected adverse health outcomes: an updated analysis with a focus on low-and middle-income countries. **Int. J. Hyg. Environ. Health**, v. 222, n.5, p. 765-777, 2019.
- QI M., et al. Integrated Determination of Chemical Oxygen Demand and Biochemical Oxygen Demand. **Pol. J. Environ. Stud.**, v. 30, n.2, 2021.

QUEIROZ, L. M.; SANTOS, L. V.; VICH, D. V.; A., S. R.; KIPERSTOK, A. II-032 - Aproveitamento de Recursos em ETE Descentralizada: Estimando Ganhos Ambientais por Meio da Avaliação do Ciclo de Vida. **XLX SILUBESA**, Research Gate, 2021.

RAVINA, M. et al. Integrated model for estimating odor emissions from civil wastewater treatment plants. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 4, p. 3992–4007, 10 dez. 2019.

RASHEDI, A.; KHANAM, T. Life cycle assessment of most widely adopted solar photovoltaic energy technologies by mid-point and end-point indicators of ReCiPe method. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 23, p. 29075–29090, 18 maio 2020.

REHL, T.; LANSCH, J.; MÜLLER, J. Life cycle assessment of energy generation from biogas—Attributional vs. consequential approach. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 6, p. 3766–3775, ago. 2012.

RESENDE, J. D. **Avaliação do ciclo de vida ambiental e econômica de sistemas descentralizados de tratamento de esgoto envolvendo *wetlands* construídos.** – 184f. Tese (doutorado) – Universidade de São Paulo., 2018. São Paulo, 2018.

RIBEIRO, J. C.; SILVA, G. H. R. DA.. Acompanhamento operacional e avaliação de uma estação compacta de tratamento de esgoto sanitário: reator UASB seguido de filtro aerado submerso. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, n. 1, p. 27–31, jan. 2018.

RIETOW, J. C., POSSETTI, G. R., CARNEIRO, C., GERVASONI, R., AISSE, M. M., e NOYOLA, A. R. (2022). Aproveitamento do biogás produzido em reatores anaeróbios de fluxo ascendente de manta de lodo para a secagem térmica de lodos de estações de tratamento de esgoto. **Engenharia Sanitária e ambiental**, v. 27, n. 2, p. 347–356, 2022.

RISCH, E.; GUTIERREZ, O.; ROUX, P.; BOUTIN, C.; COROMINAS, L. Life cycle assessment of urban wastewater systems: Quantifying the relative contribution of sewer systems. **Water Research**, v.77, p.35–48, 2015.

ROCHA, M. A.de C. **Arquitetura e resistência: centro socioambiental em Flecheiras** - Ceará. 2017.. Trabalho de conclusão de curso - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2017.

RODRÍGUEZ-CASTILLO, M. et al. Indicators for the sustainability assessment of MBR technologies for wastewater reuse in Chile: The good, the bad, and the ugly. **MethodsX**, v. 10, p. 102111, 2023.

ROSA, A.P.; LOBATO, L.C.S.; BORGES, J.M.; MELO, G.C.B.; CHERNICHARO, C.A.L. Potencial energético e alternativas para o aproveitamento do biogás e lodo de reatores UASB: estudo de caso da estação de tratamento de efluentes Laboreaux (Itabira). **Eng. Sanit. Ambient.**, v. 21, n. 2, p. 315 – 328, 2016. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016123321>.

ROSA JUNIOR, L. A., COSTA, K. R., MACHADO, L. M., MELO, D., e DE SOUZA, C. L. (2021). Aproveitamento de Biogás e Lodo em Pequenas Etes: Estudo de Caso em Catas

Altas / Use of Biogas and Waste in Small Plant: Case Study in Catas Altas. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 6, p.64831–64843, 2021.

ROSENBAUM, R. K., HAUSCHILD, M. Z., BOULAY, A. M., FANTKE, P., ALEXIS LAURENT, NÚÑEZ M., VIEIRA, M. Life Cycle Impact Assessment. In: Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., Olsen, S. I. (eds). **Life Cycle Assessment: Theory and Practice**. Springer International Publishing AG, 2018.

ROSKOSCH A., PATRIC HEIDECKE, C. BANNICK, S. BRANDT, M. BERNICKE, C. DIENEMANN, M. GAST, M. HOFMEIER, C. KABBE, K. SCHWIRN, I. VOGEL, D. VÖLKER, B. WIECHMANN Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland [sewage sludge disposal in Germany] Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau (2018).

RUIZ-ROSA, I.; GARCÍA-RODRÍGUEZ, F. J.; MENDOZA-JIMÉNEZ, J. Development and application of a cost management model for wastewater treatment and reuse processes. **Journal of Cleaner Production**, v. 113, p. 299–310, 1 fev. 2016.

SANTOS, E. S. DOS., MOTA, S., SANTOS, A. B. DOS., MONTEIRO, C. A. B., e FONTENELE, R. M. M. (2011). Avaliação da sustentabilidade ambiental do uso de esgoto doméstico tratado na piscicultura. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 16, n. 1, 45–54. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522011000100008>.

SARPONG, S. Y. et al. The impact of tourism arrivals, tourism receipts and renewable energy consumption on quality of life: A panel study of Southern African region. **Heliyon**, v. 6, n. 11, p. e05351, 1 nov. 2020.

SEIDMOHAMMADI, A., ASGARI, G. & ASADI, F. The biological nutrient removal (BNR) process in Aerobic granular sludge systems treating real landfill leachate of a West Metropolis in Iran. **Int. J. Environ. Sci. Technol.** 19, 7715–7726 (2022).

SIDDIQUI M. I. et al. Recent Advancement in Commercial and Other Sustainable Techniques for Energy and Material Recovery from Sewage Sludge. **Water**, v. 15, n. 5, p. 948–948, 1 mar. 2023.

SHANMUGAM, K. et al. A sustainable performance assessment framework for circular management of municipal wastewater treatment plants. **Journal of Cleaner Production**, v. 339, p. 130657, mar. 2022.

SHARMA, M.K. e KAZMI, A.A. Performance evaluation of a single household anaerobic packaged system for onsite domestic wastewater treatment. **Desalination and Water Treatment**, p. 9216-9225, 2016.

SIEDLECKA, E.; SIEDLECKI, J. Influence of Valorization of Sewage Sludge on Energy Consumption in the Drying Process. **Energies** 2021, Vol.14, 4511. <https://doi.org/10.3390/en14154511>.

SILVA, J.A. Wastewater Treatment and Reuse for Sustainable Water Resources Management: A Systematic Literature Review. **Sustainability**, v.15, n.14, 2023.

SKELLY D.K., BOLDEN, S.R. DION, K.B. Intersex frogs concentrated in suburban and urban landscapes. **EcoHealth**, v. 7, n.3, p. 374-379, 2010.

SILVA, D. A. L., NUNES, A. O., MORIS, V. A. da S., PIEKARSKI, C. M., RODRIGUES, T. O. How important is the LCA software tool you choose? Comparative results from GaBi, openLCA, SimaPro and Umberto. **VII Conferencia Internacional de Análises de Ciclo de Vida Em Latinoamérica**, Colombia, 2017.

SILVESTRE G., FERNÁNDEZ B., BONMATÍ A. Significance of anaerobic digestion as a source of clean energy in wastewater treatment plants. **Energy Conversion and Management** (2015) p.255–262. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.05.033>.

SINGH, P., KANSAL, A., 2016. Energy and GHG accounting for wastewater infrastructure. **Resour. Conservat. Recycl.** 128, 499–507.

SCHNELL, M.; HORST, T.; QUICKER, P. Thermal treatment of sewage sludge in Germany: A review. **J. Environ. Manag.** 2020, 263, 110367.

SNIS – Diagnósticos 2021/2022 “Água e Esgoto”. Disponível em: <<http://antigo.snis.gov.br/diagnosticos>>. Acesso em: 16 de fevereiro de 2023.

STREIMIKIENE, D. et al. Sustainable Tourism Development and competitiveness: the Systematic Literature Review. **Sustainable Development**, v. 29, n. 1, p. 259–271, 19 set. 2020.

SOHN J., BISQUERT P. BUCHE, P., HECHAM A., KALBA P.P. R, B. GOLDSTEIN, M. BIRKVED, S.I. Olsen Argumentation corrected context weighting-life cycle assessment: a practical method of including stakeholder perspectives in multi-criteria decision support for LCA. **Sustainability**. v.12, n.6, 2020.

SONG, Z., LIU, J., YANG, H., Air pollution and soiling implications for solar photovoltaic power generation: a comprehensive review. **Applied Energy** v.298, 2021.

SORS, J. (2001). Measuring progress towards sustainable development in venice: A comparative assessment of methods and approaches.

SOUZA, B. DE M.; DUARTE, M. A. C.; TINÔCO, J. D. Custos de operação e manutenção de estação de tratamento de esgotos por reator anaeróbio e lodos ativados. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 26, n. 3, p. 505–515, jun. 2021.

SOUZA, H. H DE S. et al. Environmental assessment of on-site source-separated wastewater treatment and reuse systems for resource recovery in a sustainable sanitation view. **Science of The Total Environment**, v. 895, p. 165122, 15 out. 2023.

SU, X. et al. Systematic approach to evaluating environmental and ecological technologies for wastewater treatment. **Chemosphere**, v. 218, p. 778–792, 1 mar. 2019.

TAVARES, L. C.; ALMEIDA, I. R.; DIAS, É. C.; TEIXEIRA, L. G.; FERNANDES, L. L. Avaliação da qualidade da água de abastecimento do campus saúde da cidade universitária José da Silveira Netto, Belém, Pará. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, p. 11392-11404, 2019.

TANG, X.; LI, Z.; HE, S.; YANG, B.; ZHANG, Z.; LI, B.; ZHAO, Y. Effect of Nitrogen and Phosphorus Distribution in Overlying Water and Sediment of Major Rivers in Changchun City on Water Quality. **Appl. Sci.** 2022.

TUPIASSU, L.; GONÇALVES, S.A.; GROS-DÉSORMEAUX, J.-R. Análise das reformas fiscais verdes no panorama Europeu. **Revista de Direito Internacional Econômico e Tributário**, v. 14, n. 1, Jan/Jun, p. 1–27, 2019.

TURKOVÁ, J.; KORYTÁROVÁ, J. Methods for Evaluation of WWTPs Environmental Impacts: A Review. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 222, p. 012004, 21 jan. 2019.

UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION (UNESCO). **The United Nations World Water Development Report 2017**. Wastewater: The Untapped Resource. 1. ed. Paris: UNESCO, 2017. 189p.

UNITED NATIONS, 2020. SDG Indicators: global indicator framework for the Sustainable Development Goals and targets of the 2030 **Agenda for Sustainable Development**.

UNICEF (2016), “**The state of the world’s children: a fair chance for every child**”, available at: www.unicef.org/publications/files/UNICEF_SOWC_2016.pdf Acesso em: 22 de agosto de 2021.

VAN HAANDEL, A.V., SANTOS, S. L. E PAIVA, F. Aplicação do sistema UASB-lagoas de polimento para o tratamento de esgoto visando ao reuso agrícola ou industrial ou à proteção de recursos hídricos. **Revista DAE**. v. 69, n 229, p. 173-191, 2021.

VASSALLE, L., FERRER, I., PASSOS, F., MOTA FILHO, C. R., GARFÍ M., Nature-based solutions for wastewater treatment and bioenergy recovery: A comparative Life Cycle Assessment, **Science of The Total Environment**, v. 880,2023.

VAZ, A. P. R.; DUCATTI, M. L.; PASQUALETTO, A. Avaliação de impactos ambientais nas Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários: ETE – LAJES, APARECIDA DE GOIÂNIA – GO. **Artigo Científico. Especialização em Gestão Ambiental. SENAI/UCG**. Goiânia – GO: 17 p., 2003.

VEHBI, B. (2012). In Murat Kasimoglu (Ed.). A model for assessing the level of tourism impacts and sustainability of coastal cities, **Strategies for tourism industry - Micro and Macro perspectives**, 2012.

VILLARÍN M. C., & MEREL S., Paradigm shifts and current challenges in wastewater management, **Journal of Hazardous Materials**, Volume 390, 2020.

WANG, M.; GONG, H. Not-in-My-Backyard: Legislation Requirements and Economic Analysis for Developing Underground Wastewater Treatment Plant in China. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 15, n. 11, p. 2339, 23 out. 2018.

WANG, X.; DONG, Y.; YU, S.; MU, G.; QU, H.; LI, Z.; BIAN, D. Analysis of the Electricity Consumption in Municipal Wastewater Treatment Plants in Northeast China in Terms of Wastewater Characteristics. **Int. J. Environ. Res. Public Health**, 2022.

WEAR S.L., THURBER R.V. Sewage pollution: mitigation is key for coral reef stewardship. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1355, 2015.

WEAR S. L., ACUÑA V., MCDONALD R., FONT C., Sewage pollution, declining ecosystem health, and cross-sector collaboration. **Biological Conservation**, v. 255, 2021.

WERLE S, SOBEK S. Correction to: Gasification of sewage sludge within a circular economy perspective: a Polish case study. **Environ Sci Pollut Res Int.** 2019;26(35):35433-35434. doi: 10.1007/s11356-019-06162-2.

WTO - World Tourism Organization. **Indicators of Sustainable Development for Tourism Destinations - A Guidebook**, Madrid, Spain, 2004.

YAPICIOĞLU, P.; DEMIR, Ö. Minimizing greenhouse gas emissions of an industrial wastewater treatment plant in terms of water–energy nexus. **Applied Water Science**, v. 11, n. 12, 5 nov. 2021.

YERUSHALMI, L., ASHRAFI, O., HAGHIGHAT, F., 2013. Reductions in greenhouse gas (GHG) Generation and energy consumption in wastewater treatment plants. **Water Sci. Technol.** v. 67, n.5, p. 1159–1164. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.681>.

YOSHIDA, H.; CLAVREUI, J.; SCHEUTZ, C.; CHRISTENSEN, T.H. Influence of data collection schemes on the life cycle assessment of a municipal wastewater treatment plant. **Water Res.**, [s. l.], v.56, p. 292–303, 2014.

ZAPASA A. et al. Financial, environmental and social sustainability of rural sanitary wastewater system: case study. **Applied Water Science**, v. 12, n. 12, 8 nov. 2022.

ZHANG, X. et al. Remote sensing monitoring of total suspended solids concentration in Jiaozhou Bay based on multi-source data. **Ecological Indicators**, v. 154, p. 110513, 1 out. 2023.

ZHOU Q., SUN H., JIA L., WU W., WANG J., Simultaneous biological removal of nitrogen and phosphorus from secondary effluent of wastewater treatment plants by advanced treatment: A review, **Chemosphere**, Volume 296, 2022a.

ZHOU, Z. et al. Revival of sun-and-beach tourism through the lens of regulatory and risk dimensions of environmental sustainability. **Heliyon**, v. 8, n. 10, p. e10893, 1 out. 2022b.

ŻYŁKA R., KAROLINCZAK B., DĄBROWSKI W. Structure and indicators of electric energy consumption in Dairy wastewater treatment plant. **Science of the Total Environment** v.782 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146599>.