



Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

**Avaliação do ciclo de vida aplicada ao
tratamento de efluentes: Estudo de caso da
fase de operação de uma ETE**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Karina da Silva Lopes

2023

Karina da Silva Lopes

Avaliação do ciclo de vida aplicada ao tratamento de efluentes: Estudo de caso da fase de operação de uma ETE

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Maurício Furtado Maués

Belém, 26 de janeiro de 2023.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

L864a Lopes, Karina da Silva.

Avaliação do ciclo de vida aplicada ao tratamento de efluentes:
estudo de caso da fase de operação de uma ETE / Karina da Silva
Lopes. — 2023.
110 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Luiz Maurício Furtado Maués
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, Belém, 2023.

1. Avaliação do ciclo de vida. 2. Estação de tratamento de
esgoto. 3. Impactos ambientais do tratamento de esgoto. 4.
Reator de biofilme de leito móvel. I. Título.

CDD 624



AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA APLICADA AO TRATAMENTO DE EFLUENTES: ESTUDO DE CASO DA FASE DE OPERAÇÃO DE UMA ETE

AUTORA:

KARINA DA SILVA LOPES

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO EM: 26 / 01 / 2023.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Luiz Maurício Furtado Maués
Orientador (UFPA)

Profa. Dra. Cristiane Bueno
Membro Externo (UFSCAR)

Profa. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro
Membro Interno (UFPA)

Visto:

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

Karina da Silva Lopes

Título

Avaliação do ciclo de vida aplicada ao tratamento de efluentes: Estudo de caso da fase de operação de uma ETE

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre.

Belém, 26 de janeiro de 2023.

Prof. Dr. Luiz Maurício Furtado Maués
Orientador
Faculdade de Engenharia Civil – UFPA

Banca Examinadora

Prof^a. Dr(a). Cristiane Bueno
Examinador(a) Externo(a)
Departamento de Engenharia Civil – UFSCar

Prof^a. Dr(a). Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro
Examinador(a) Interno(a)
Faculdade de Engenharia Civil – UFPA

Coordenador do Programa
Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Coordenador do PPGEC/ITEC/UFPA

À minha família
Em especial aos meus avós Maria e Manoel
e a meus pais Maria das Graças e Raimundo.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por todas as oportunidades ao longo da vida e por abençoar minha caminhada até aqui.

Aos meus avós Maria e Manoel, por participarem de cada processo da minha formação, por serem os primeiros a comemorar e dar sentido a cada conquista minha e por sempre me fazerem presente em suas orações.

À minha mãe Maria das Graças, por ser meu exemplo de força e resiliência. Ao meu pai Raimundo, quem sempre me ensinou a lutar pelos meus objetivos, por mais distantes que parecessem. Obrigada por todo amor e confiança.

Aos meus tios Conceição e Jeová, por todas as oportunidades e por me transformarem através da educação. Serei sempre grata.

Ao Yago, meu maior incentivador, por todo apoio e por se fazer presente sempre que precisei. Obrigada por toda motivação e companheirismo.

Ao professor Luiz Maurício, pela sua busca incessante em capacitar e qualificar seus alunos além do ato de orientar. Obrigada por todos os ensinamentos repassados e por me acolher e confiar o desenvolvimento dessa pesquisa.

À Poliana, por toda cumplicidade e amizade construída ao longo desses anos de mestrado. Obrigada por compartilhar cada momento e tornar esse ciclo mais leve.

Ao Dilvan, pela sua contribuição à pesquisa com a disponibilização de dados, sempre de forma prestativa.

E às professoras Cristiane Bueno e Luciana Cordeiro, por somarem contribuições valiosas à pesquisa.

RESUMO

As estações de tratamento de efluentes são projetadas para minimizar danos relacionados à poluição de corpos hídricos, entretanto, podem ocasionar impactos ambientais relativos ao consumo de recursos, energia, produtos químicos e emissões durante sua vida útil. Portanto, para que se alcance o objetivo desses sistemas, deve-se defini-los de forma holística, considerando seus impactos globais sobre o meio ambiente. Nesse sentido, o presente estudo buscou avaliar a etapa de operação de uma ETE com tecnologia MBBR localizada em São Luis-Maranhão por meio da Avaliação do ciclo de vida (ACV), de modo a identificar as principais causas de impacto no processo. Além disso, buscou-se comparar os resultados obtidos aos de demais estudos com escopo semelhante de ACV, de modo a auxiliar no processo de seleção de ETE's. Primeiramente foi realizado o levantamento de informações relacionadas ao processo, proveniente de documentos e dados disponibilizados pela empresa responsável (fontes primárias) e da base de dados Ecoinvent 3.0 (fonte secundária). Para o escopo, a unidade funcional adotada foi 1 m³ (metro cúbico) de efluente tratado e os fluxos considerados foram: entrada de eletricidade, produtos químicos, água e transporte. Na etapa de AICV, os dados foram avaliados através dos métodos ReCiPe midpoint (H) 2016 e CML 2001, sendo processados com a utilização do software SimaPro 9.1.1. Por fim, estudos encontrados através da RSL que apresentassem escopo de ACV semelhante ao da presente pesquisa, foram selecionados para análise comparativa. Os resultados mostram que o transporte de efluentes foi o fator que mais derivou impactos associados e o consumo de água foi o componente de menor impacto do processo, além disso, o sistema analisado contribui principalmente para impactos de ecotoxicidade marinha, demandando atenção de medidas para atenuar suas causas. Quanto a comparação a outros estudos que analisaram a mesma tecnologia de tratamento os resultados apresentaram diferenças, devido a associação de fatores distintos como matriz energética e transporte de efluentes utilizado. Em relação à comparação com pesquisas que abordaram de tecnologias distintas, o presente estudo apresentou maior impacto em relação às demais, tanto pela avaliação com o método ReCiPe quanto com o CML, dado o transporte adotado no processo.

Palavras- chave: Avaliação do ciclo de vida; Estação de tratamento de esgoto; Impactos ambientais do tratamento de esgoto; Reator de biofilme de leito móvel;

ABSTRACT

Effluent treatment plants are designed to minimize damages related to the pollution of water bodies; however, they can cause environmental impacts associated with the consumption of resources, energy, chemicals, and emissions during their useful life. Therefore, to achieve the objective of these systems, they must be defined holistically, considering their global impacts on the environment. In this sense, the present study sought to evaluate the operation stage of an WWTP with MBBR technology located in São Luis-Maranhão through the Life Cycle Assessment (LCA) to identify the leading causes of impact in the process. In addition, we sought to compare the results obtained with those of other studies with a similar scope of LCA to assist in the selection process of WWTPs. First, information related to the process was collected from documents and data made available by the responsible company (primary sources) and from the Ecoinvent 3.0 database (secondary source). For the scope, the functional unit adopted was 1 m³ (cubic meter) of treated effluent and the flows considered were: input of electricity, chemical products, water, and transport. In the LCIA stage, the data were evaluated using the ReCiPe midpoint (H) 2016 and CML 2001 methods, being processed using the SimaPro 9.1.1 software. Finally, studies found through the RSL that presented an LCA scope similar to the present research were selected for comparative analysis. The results show that the transport of effluents was the factor that most derived associated impacts, and water consumption was the component with the lowest impact on the process; in addition, the analyzed system contributes mainly to marine ecotoxicity impacts, demanding attention to measures to mitigate its causes. As for the comparison with other studies that analyzed the same treatment technology, the results showed differences due to the association of different factors, such as the energy matrix and the effluent transport used. Compared with studies that addressed different technologies, the present study had a more significant impact on the others, both by the evaluation with the ReCiPe method and with the CML, given the transport adopted in the process.

Keywords: Life cycle assessment; Wastewater treatment plant; Environmental impacts of wastewater treatment; Moving bed biofilm reactor;

*“O uso adequado da ciência
não é conquistar a natureza,
mas viver nela.”*
(Barry Commoner)

Sumário

Capítulo	Página
1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Objetivos	17
1.1.1. Objetivo Geral	17
1.1.2. Objetivos Específicos	17
1.2. Hipótese.....	17
1.3. Estrutura do trabalho	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1. Avaliação do ciclo de vida (ACV)	18
2.2. Definição e considerações gerais	18
2.3. Normatização	20
2.4. Etapas da ACV	21
2.4.1. Definição de objetivo e escopo.....	22
2.4.2. Análise de inventário do ciclo de vida (ICV)	22
2.4.3. Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV)	25
2.4.4. Interpretação	29
2.5. Análise de qualidade de dados	30
3. TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS.	33
3.1. Definição e etapas de tratamento	33
3.2. Reator de biofilme com leito móvel	35
3.3. Impactos ambientais no tratamento de esgoto.....	37
4.AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA APLICADA AO TRATAMENTO DE ESGOTO..	38
5. METODOLOGIA DA PESQUISA	56
5.1. Delineamento da pesquisa.....	56
5.2. Abordagem ao tema	58
5.3. Estudo de caso	61
5.4. Avaliação do Ciclo de Vida	64
6. RESULTADOS	73
6.1. Análise do estudo de caso	73
6.1.1. Método ReCiPe	73
6.1.2. Método CML	74
6.1.3. Normalização.....	76
6.2. Análise comparativa.....	78

6.2.1. Estudos com avaliação de mesma tecnologia (MBBR).....	78
6.2.2. Estudos com avaliação de tecnologia diferente	83
7. CONSIDERAÇÕES GERAIS	89
8. RECOMENDAÇÕES	91
REFERÊNCIAS	92
ANEXOS	101

Lista de Tabelas

Tabela	Página
Tabela 01: Dados fornecidos pela empresa.....	68
Tabela 02: Representação da qualidade dos dados ponderados.....	72
Tabela 03: Resultados de AICV em estudos que utilizaram o método ReCiPe.....	84
Tabela 04: Resultados de AICV em estudos que utilizaram o método CML.....	87

Lista de Figuras

Figura	Página
Figura 01: Exemplo de estágios do ciclo de vida de um produto.....	19
Figura 02: Etapas da ACV.....	21
Figura 03: Etapas consideradas na análise de inventário.	23
Figura 04: Elementos da fase de avaliação de impacto.	25
Figura 05: Correlação de aspectos ambientais a categorias de impacto.....	27
Figura 06: Associações dos elementos da fase de interpretação a outras fases da ACV.	30
Figura 07: Configuração de um sistema MBBR.	35
Figura 08: Unidade de biomídia (A) sem uso e (B) com lodo aderido.	35
Figura 09: Delineamento da pesquisa.....	57
Figura 10: Etapas da RSL.....	60
Figura 11: Mapa de localização da ETE.....	61
Figura 12: Etapas do sistema de tratamento.....	63
Figura 13: Limites do sistema com base na NBR ISO 14.040.....	65
Figura 14: Resultados da avaliação de impacto através do método ReCiPe.....	74
Figura 15: Resultados da avaliação de impacto através do método CML.....	75
Figura 16: Resultados normalizados (CML).	76
Figura 17: Resultados normalizados (ReCiPe).....	77
Figura 18: Comparação entre os resultados de Lopes (2023), Teow <i>et al.</i> (2021) e Bui <i>et al.</i> (2022).	78
Figura 19: Comparação entre os resultados de Lopes (2023) e Bui <i>et al.</i> (2022).	80
Figura 20: Comparação entre os resultados de Lopes (2023), Kamble <i>et al.</i> (2019) e Singh <i>et al.</i> (2018).	82
Figura 21: Categorias de impacto e seus fatores de influência.....	86

Lista de Quadros

Quadro	Página
Quadro 01: Tipos e fontes de incertezas em etapas da ACV.....	31
Quadro 02- Matriz para avaliação da qualidade de fontes de dados.	32
Quadro 03: Descrição sucinta dos principais sistemas de tratamento de esgoto em nível secundário.....	34
Quadro 04: Síntese dos estudos identificados	47
Quadro 05: Formulação da linguagem de busca da RSL.	58
Quadro 06: Fluxos considerados no estudo.	70
Quadro 07: Métodos e categorias de avaliação de impacto.....	71

Lista de Abreviaturas e Siglas

Símbolo	Significado
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do ciclo de vida
AICV	Avaliação de impacto do ciclo de vida
ANA	Agência Nacional das Águas
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DQO	Demanda química de oxigênio
ETE	Estação de tratamento de esgoto
ICV	Inventário do ciclo de vida
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MBBR	Moving bed biofilm reactor
NACLO	Hipoclorito de sódio
RSL	Revisão sistemática da literatura
UF	Unidade funcional

1. INTRODUÇÃO

O tratamento de esgoto como parte do saneamento básico é de extrema importância para o desenvolvimento sustentável, visto que proporciona melhores condições de saúde à sociedade, reduz a poluição e danos aos corpos hídricos, além de gerar impactos positivos à economia. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (WHO, 2014), cada montante de investimento dado ao saneamento possui retorno 4 vezes maior em economia no tratamento de doenças relacionadas.

No ano de 2015, a Organização das Nações Unidas estabeleceu a agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável, possuindo objetivos a serem atendidos, como a meta 6.3 que trata da melhoria na qualidade de recursos hídricos e redução do índice de águas residuais não tratadas. A forte influência dessas instituições nas políticas públicas de vários países implicou na busca por alinhamento a estes objetivos (FERREIRA, 2021). Dentre os quais, está o Brasil que apresenta apenas 46,5% da população urbana atendida pelo serviço de tratamento de esgoto (ANA, 2020) e através da Lei 14.026 de 15 de julho de 2020, atualizou o Marco Legal do Saneamento Básico visando garantir até 2033 que 99% da população brasileira tenha acesso à água potável e 90% à coleta e ao tratamento de esgoto.

A busca por elevar os níveis de saneamento através da coleta e tratamento de esgoto tem resultado no surgimento e adoção de tecnologias mais complexas e sofisticadas (ARIAS *et al.*, 2020). No entanto, os avanços na eficiência da remoção de poluentes de águas residuais, por outro lado, resultam em maior consumo de recursos como energia, insumos, produtos químicos, emissões atmosféricas e geração de resíduos, pondo em questão seus benefícios ambientais quando mal planejado (MOLINOS-SEANTE, HERNÁNDEZ-SANCHO, SALA-GARRIDO, 2011; MORERA *et al.*, 2017; MORSY *et al.*, 2020; NGUYEN *et al.*, 2021).

Portanto, para que se alcance o real objetivo de uma estação de tratamento que é a minimização de danos ambientais, deve-se defini-la de forma holística, considerando seus impactos globais sobre o meio ambiente, indo além da proteção dos corpos hídricos ao incluir demandas e emissões durante sua vida útil (DIXON; SIMON; BURKITT, 2003; LUNDIN; BENGTSSON; MOLANDER, 2000; MACHADO *et al.*, 2007).

Além disso, existem diversas tecnologias de tratamento de efluentes, as quais possuem diferentes características e desempenhos. Para Kalbar *et al.* (2016) Nguyen *et al.* (2021), essas particularidades podem diferir no consumo de materiais, insumos de construção e operação, energia e área requerida para implantação, gerando impactos distintos ao ambiente.

Porém, de acordo com Bonton *et al.* (2012), as escolhas das tecnologias de tratamento geralmente fundamentam-se apenas em questões técnicas e econômicas. Desse modo, mensurar e avaliar o desempenho ambiental de tais sistemas, de modo a incluir na concepção de projetos de esgotamento sanitário é fundamental para tomada de decisão mais racional e alinhada com os princípios da preservação sustentável (LOPES *et al.*, 2017).

Dentre os mecanismos utilizados para determinação de impactos ambientais de um produto ou serviço, tem-se como destaque a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), um método padronizado internacionalmente pelas normas ISO 14040 (2009) e ISO 14044 (2009).

De acordo com Lopes *et al.*(2017), esta ferramenta vem sendo aplicada aos estudos de avaliação do tratamento de águas residuais há anos, sendo para Burchart-Korol e Zawartka (2019a), Lorenzo-Toja (2017) um campo de grande importância para auxiliar no processo de planejamento, implantação e operação, incluindo a escolha das tecnologias adotadas e o grau de tratamento necessário, visto que permite uma análise complexa de todos os elementos do sistema de tratamento de águas residuais. Possibilitando, dessa forma, a seleção de soluções de forma factível em uma perspectiva tecnológica e ambiental (TOURINHO, 2014).

Dentre as fases do ciclo de vida de uma estação de tratamento, a operação é a que mais contribui para danos ao meio ambiente (DEL BORGHI *et al.*, 2008; LOPES; QUEIROZ; KIPERSTOK, 2018; NGUYEN *et al.*, 2021; XUE *et al.*, 2019). Nesse sentido, o presente trabalho tem como objeto de estudo a fase de operação de uma ETE localizada em São Luis-Maranhão que adota Reator de biofilme de leito móvel como tecnologia de tratamento e realiza transporte de efluentes através de caminhão tanque, sendo esse tipo de transporte pouco usual em sistemas de tratamento.

A análise desse sistema através da ACV torna-se relevante, dada esta peculiaridade em seu processo, sendo assim, a presente pesquisa tem o intuito de responder às seguintes questões:

Quais as principais causas de impacto ambiental na fase de operação de uma estação de tratamento de esgoto que utiliza tecnologia de Reator de biofilme de leito móvel e adota caminhão tanque para transporte de efluentes ?

Como a ETE avaliada se qualifica em comparação às demais estações de tratamento (com tecnologias semelhantes e distintas) analisadas em outros estudos, com base na avaliação de impactos ambientais?

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Realizar uma análise quantitativa dos impactos ambientais relacionados à fase de operação de um sistema que utiliza reator de biofilme de leito móvel para tratamento de esgoto através da avaliação do ciclo de vida e comparar seus resultados aos de tecnologias semelhantes e distintas avaliadas em outros estudos.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Identificar por meio de RSL os métodos e categorias de avaliação de impacto mais adotados em outras pesquisas de forma a subsidiar a estruturação da ACV;
- Avaliar os efeitos ambientais negativos associados a etapa de operação da ETE, por meio da ACV;
- Comparar os resultados obtidos com os de demais tecnologias abordadas em estudos com escopo semelhante de ACV;

1.2. Hipótese

O desempenho ambiental de uma ETE não está vinculado apenas a tecnologia adotada para tratamento, podendo também sofrer influência de demais escolhas de projeto como localização, fornecedores, logística adotada para transporte do efluente e insumos utilizados no processo.

1.3. Estrutura do trabalho

A presente dissertação está segmentada em 5 capítulos estruturados da seguinte forma:

Capítulo 1: consta a introdução com a abordagem geral ao tema, justificativa e questões da pesquisa, também são apresentados os objetivos pretendidos e a organização da pesquisa.

Capítulo 2: são retratados conceitos relevantes a pesquisa, discorrendo sobre ACV e suas etapas; aplicações e tecnologias de tratamento de águas residuais, bem como os impactos associados a esses sistemas e por fim, apresentado o estado da arte acerca da avaliação de ETE's por meio da ACV obtido através da RSL realizada nesta pesquisa.

Capítulo 3: Discorre sobre a estrutura de RSL adotada para embasamento da pesquisa, bem como, aborda a implementação do método e detalhamento do estudo de caso.

Capítulo 4: apresenta os resultados obtidos na pesquisa, evidenciando os principais achados com a aplicação dos diferentes métodos de AICV adotados, bem como, a análise comparativa a outros estudos.

Capítulo 5: discorre sobre as conclusões gerais do trabalho e apresenta sugestões para pesquisas futuras.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esse capítulo discorre sobre os principais assuntos que fundamentam a pesquisa, contextualizando o mecanismo utilizado na determinação de impactos e o processo avaliado no estudo, assim como apresenta a abordagem ao tema encontrada na literatura.

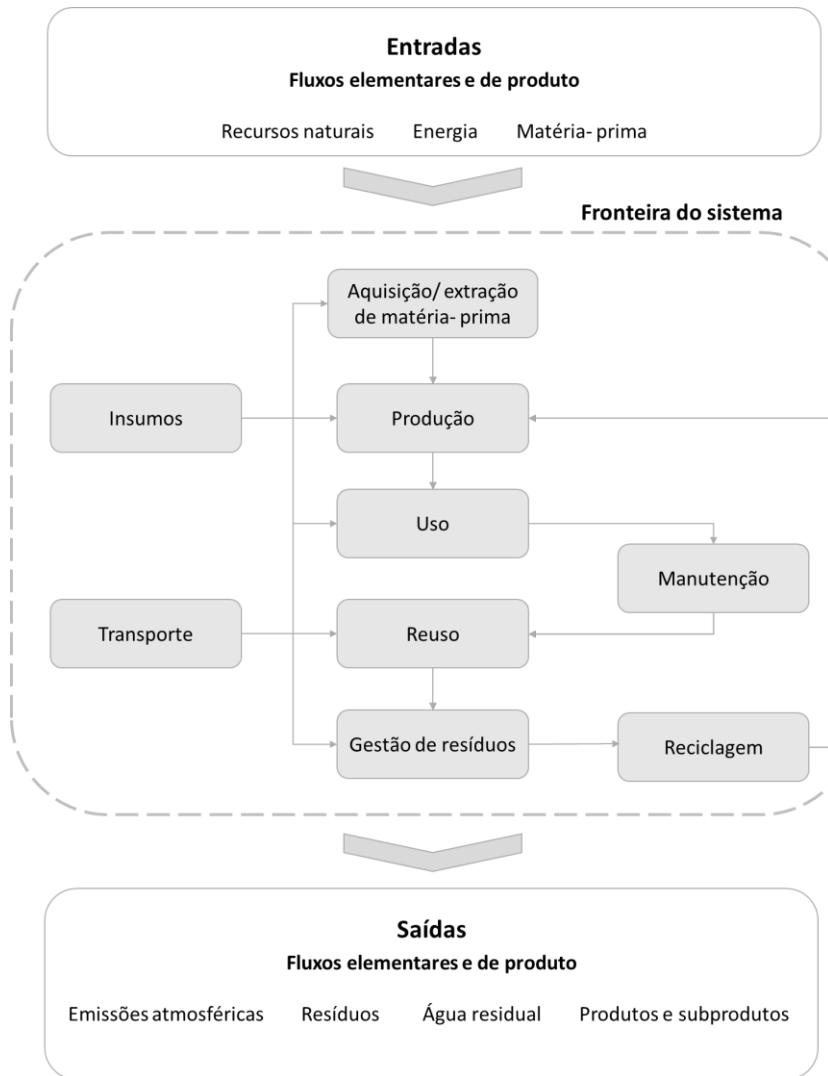
2.1. Avaliação do ciclo de vida (ACV)

2.2. Definição e considerações gerais

Avaliação do ciclo de vida (ACV), consiste em uma técnica voltada para identificação, quantificação e análise de aspectos e respectivos impactos ambientais de processos, serviços ou fabricação de produtos (ABNT, 2009a; COROMINAS et al., 2013; GALLEGO-SCHMID; TARPANI, 2019), sendo muitas vezes considerada um método de gestão ambiental (ARAUJO, 2013).

Define-se como ciclo de vida todos os estágios ocorridos para realização de um bem ou serviço, desde a utilização de recursos naturais até a disposição final (ABNT, 2009a, 2009b). Dessa forma, a ACV visa contabilizar os fluxos (entradas e saídas) de fatores associados a cada etapa do ciclo de vida (figura 01), como materiais, energia, produtos e emissões, através de uma abordagem completa, bem como avaliar os impactos potenciais associados a esses fluxos (ABNT, 2014a; EUROPEAN COMMISSION, 2010; GUTIERREZ, 2014; MACEDO, 2011), proporcionando uma análise holística de aspectos e impactos ambientais (BILEC; RIES; MATTHEWS, 2010).

Figura 01: Exemplo de estágios do ciclo de vida de um produto.



Fonte: Adaptado de ABNT (2009a); Gutierrez (2014).

Entre as vantagens associadas à utilização da ACV, pode-se observar a contribuição na tomada de decisão, implementação de melhorias, mensuração e diagnóstico de desempenho ambiental do processo analisado (ABNT, 2009a, 2009b; BUENO, 2014)

Além disso, ao quantificar os impactos através de uma perspectiva do ciclo de vida e por uma abordagem multicritério, a ACV permite a identificação dos pontos críticos ou principais contribuintes para os impactos ambientais totais do sistema, ajudando a resolver o problema de mudança de carga (*shifting of burdens*), quando há melhoria ambiental em uma fase do processo e piora em outra etapa (COLTRO *et al.*, 2007; FINNVEDEN *et al.*, 2009).

Dessa forma, a ACV é considerada um instrumento eficaz transparente e reproduzível para apresentação resultados relevantes, servindo de apoio a decisões relacionadas a consumo

e produção sustentáveis (GUINÉE et al., 2011; LORENZO-TOJA et al., 2016; REAP et al., 2008).

Por ser uma metodologia ampla, a aplicação da ACV pode tomar diversas formas, dependendo do objetivo do estudo, disponibilidade de dados, ferramentas e procedimentos (ABNT, 2009a; LUZ, 2017). Para Matthews, Hendrickson e Matthews (2014), além de sua configuração original que considera todo o ciclo de vida, a ACV também pode se concentrar em estudos que abordam apenas as fases de extração de matéria prima até a chegada na indústria (berço ao portão) ou a etapa de beneficiamento/fabricação (portão ao portão).

2.3. Normatização

GUINÉE et al. (2011) evidencia que as décadas de 70 a 90 compreenderam o período de maturação da ACV, sendo esta, realizada utilizando diferentes métodos, abordagens e terminologias e apresentando muitas vezes, resultados conflitantes, o que acabou limitando temporariamente a aplicação da metodologia.

Coltro et al. (2007) afirma que diversos estudos semelhantes apresentavam diferenças em suas conclusões devido a variação de fatores como idade dos dados, tecnologias, logística de abastecimento de matérias-primas e matriz energética, considerações feitas e fronteiras adotadas, afetando a interpretação do que seria um sistema mais adequado para o meio ambiente.

Diante disso, identificou-se a necessidade de padronização da metodologia de ACV, sendo “Diretrizes para Avaliação do Ciclo de Vida - um Código de Prática” o primeiro documento desenvolvido neste sentido, resultado de muito esforço pela *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC) através da reunião de pesquisadores líderes na área para discussão sobre o tema, por meio de conferências internacionais (COLTRO et al., 2007).

A ACV passou a ser normatizada internacionalmente através da *International Organization for Standardization* (ISO) com a publicação da série de normas ISO 14000 que dispõe de diferentes temas relacionados à gestão ambiental. No Brasil, a ISO é representada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), tendo as seguintes normas relacionadas a ACV:

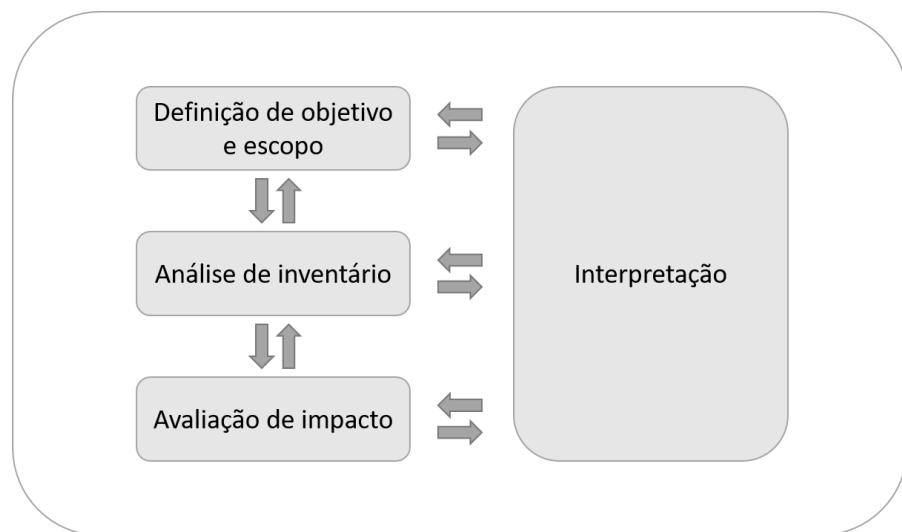
- ABNT NBR – ISO 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura.
- ABNT NBR – ISO 14044: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações.

Além destes elementos normativos, é importante mencionar o Sistema Internacional de Referência de Dados do Ciclo de Vida de Produtos e Processos (ILCD), desenvolvido pela Comissão Europeia e composto por uma série de documentos técnicos que oferecem orientações relacionadas a boas práticas de ACV para empresas e governos. Esses documentos, critérios e ferramentas são vistos como as soluções mais adequadas para permitir o uso eficiente de abordagens confiáveis e robustas de ciclo de vida em Pequenas e Médias Empresas (IBICT, 2014), sendo bastante utilizados para nortear estudos de ACV.

2.4. Etapas da ACV

De acordo com as normas ISO 14040 e 14044, a metodologia da ACV é estruturada seguindo 4 (quatro) etapas, apresentadas na figura 02:

Figura 02: Etapas da ACV.



Fonte: Adaptado de ABNT (2009a).

Como pode ser observado, uma das características do método de ACV é a interatividade entre suas etapas, o que é representado pelas setas em duplo sentido que as interligam, garantindo que o escopo de uma ACV possa ser modificado ao longo do seu desenvolvimento

(ABNT, 2009a). Uma descrição mais detalhada de cada fase da ACV é apresentada nas seções seguintes:

2.4.1. Definição de objetivo e escopo

A definição do objetivo é a etapa inicial de um estudo de ACV, portanto, seu delineamento é importante para guiar as demais etapas, de forma que seja avaliado efetivamente o que se deseja com o estudo (ARAUJO, 2013). Nesta etapa, devem ser definidos de forma clara a (1) aplicação pretendida, (2) razões para realização do estudo, (3) público-alvo a quem se pretende comunicar os resultados e (4) se existe a intenção de utilizar os resultados em afirmações comparativas a serem divulgadas publicamente (ABNT, 2009a, 2009b).

Posteriormente, é delineado o escopo da ACV, que deve estabelecer a abrangência do estudo, bem como definir os elementos constituintes da avaliação. Sendo: (1) sistema de produto¹ a ser estudado, (2) função do sistema², (3) unidade funcional³, (4) fronteira do sistema⁴, (5) procedimentos de alocação, (6) metodologia (s) de AICV e respectivas categorias de impacto a serem utilizadas, (7) tipo de interpretação e análise crítica de resultados, (8) requisitos de qualidade de dados, (9) pressupostos, (10) limitações, (11) tipo e formato do relatório requerido para o estudo e (12) escolha de valores e elementos opcionais (ABNT, 2009a, 2009b).

2.4.2. Análise de inventário do ciclo de vida (ICV)

Para realização de um estudo de ACV, faz-se necessário o levantamento de dados referentes ao processo ou produto que está sendo analisado (ALVES, 2016). Dessa forma, a segunda fase da ACV compreende o inventário de dados relacionados a entradas e saídas do sistema de produto em estudo, sempre alinhado em alcançar os objetivos estabelecidos na etapa anterior (ABNT, 2009a, 2009b).

Nessa fase é realizada a quantificação dos fluxos envolvidos em todo o ciclo de vida do sistema, sendo realizada mediante etapas, conforme estabelecido na ISO 14044 (figura 03):

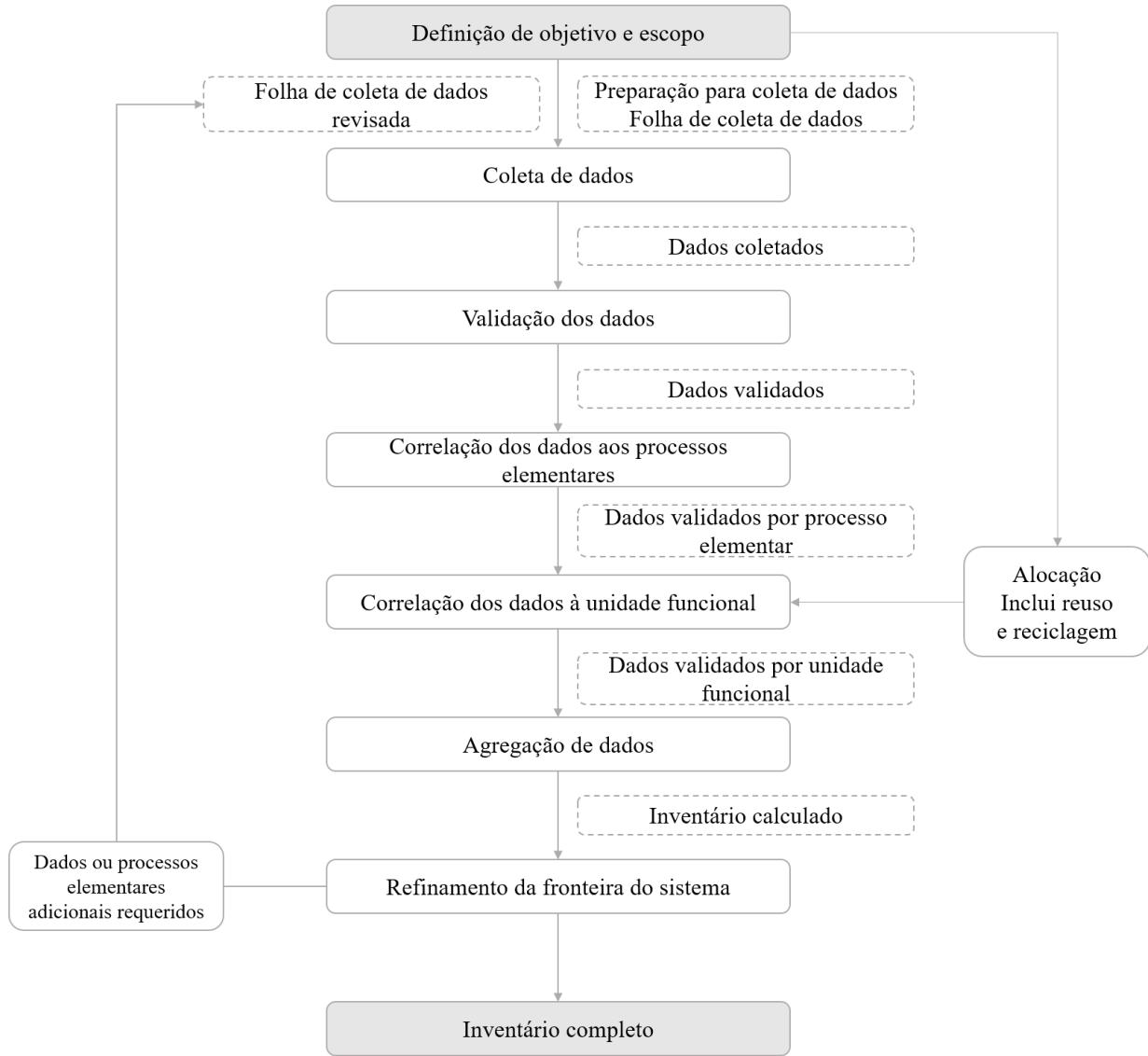
¹ Conjunto de processos elementares, com fluxos elementares e de produto, desempenhando uma ou mais funções definidas e que modelam o ciclo de vida de um produto.

² Característica qualitativa que retrata o desempenho do sistema em estudo.

³ Desempenho quantificado de um sistema de produto para utilização como uma unidade de referência.

⁴ Conjunto de critérios que especificam quais processos elementares fazem parte de um sistema de produto.

Figura 03: Etapas consideradas na análise de inventário.



Fonte: Adaptado de ABNT (2009b).

a) Coleta de dados:

A coleta de dados é considerada a principal fase do inventário, sendo muitas vezes a mais extensa, pois envolve grandes quantidades de informações (GUINÉE, 2001). São coletados dados qualitativos e quantitativos, para cada processo elementar dentro das fronteiras do sistema (ABNT, 2009a; ROSSI, 2013).

Dependendo das fontes de obtenção, podem ser classificados como primários ou secundários, devendo-se dar preferência aos dados primários que compreendem informações levantadas em campo, no local de estudo, ou a partir de fontes diretas como relatórios e documentos ligados ao processo, entretanto, devido a amplitude de fluxos ao longo de todo o ciclo de vida, nem todas as informações necessárias ao inventário estarão disponíveis de forma

primária , dessa forma, pode-se recorrer a fontes secundárias como bases de dados, sites governamentais e publicações relacionadas (GUINÉE, 2001; IFU HAMBURG GMBH, 2016).

Após serem coletados, os dados devem passar por processos como validação, agregação e correlação a processos elementares e unidade funcional, de forma a possibilitar sua operacionalização no estudo de ACV (ABNT, 2009b).

b) Validação e agregação dos dados:

A validação dos dados é importante para verificar se a qualidade dos dados é consistente com a aplicação requerida, para tal, este processo realiza-se por meio de balanço de massa e energia, de modo que dados quantitativos de entrada e saída do sistema são calculados em relação ao fluxo de referência (ABNT, 2009a, 2009b; ARAUJO, 2013; LUZ, 2017).

Quanto à agregação, é conveniente que os dados considerados sejam relacionados apenas se estiverem ligados a substâncias equivalentes e a impactos ambientais semelhantes (ABNT, 2009a, 2009b).

c) Correlação a unidade funcional e processos elementares:

Conforme dispõe a NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b), os dados devem ser calculados levando em consideração o fluxo determinado para cada processo elementar do sistema, bem como a unidade funcional estabelecida.

d) Refinamento da fronteira do sistema:

Devido sua característica iterativa, a ACV pode sofrer modificações a medida que o conhecimento do estudo vai se aprofundando com novas aquisições de dados e/ou identificação de limitações do sistema, poderão ser realizadas alterações dos objetivos e do âmbito de análise (PITUO, 2017), como ocorre quando há refinamento da fronteira do sistema, em que há exclusão de estágios do ciclo de vida não significativos, exclusão de entradas e saídas ou inclusão de novos processos elementares, devidamente justificados (ABNT, 2009a, 2009b).

e) Alocação:

A alocação ocorre quando um processo ou produto interfere em outros ciclos ou fases do ciclo de vida não considerados na fronteira de sistema adotada. Em geral, poderá haver mais de um produto e/ou a geração de subprodutos, que sendo reincorporados no processo, ou compartilhados com outros sistemas, através da sua reutilização ou reciclagem, deverá ser adotado o procedimento de alocação para a distribuição das responsabilidades quanto às contribuições para os impactos, aplicando-se as regras previstas nas normativas. A NBR ISO

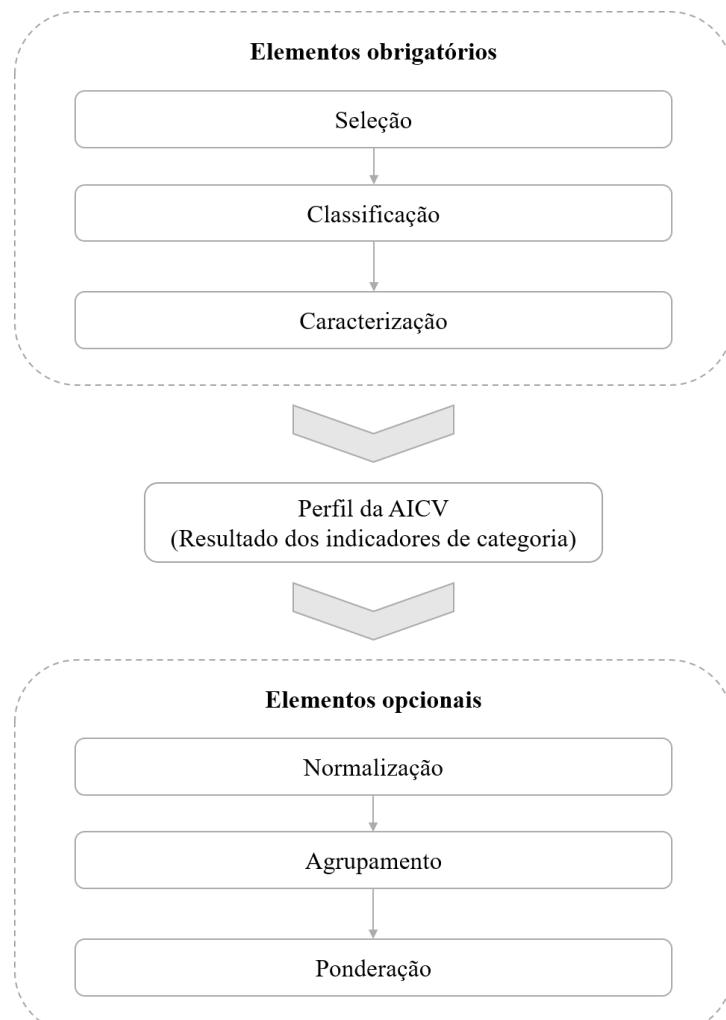
14044 (ABNT, 2009b) orienta que a alocação seja evitada sempre que possível através dos critérios de expansão do sistema (FARIAS, 2020; PITUCO, 2017).

2.4.3. Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV)

Esta fase tem por objetivo associar os dados compilados na etapa de inventário a indicadores e categorias de impacto, possibilitando realizar o levantamento da significância dos impactos ambientais potenciais resultantes do sistema de produto estudado, ao longo de seu ciclo de vida (ABNT, 2009a). Dessa forma, os dados de entrada e saída são interpretados com base nos impactos ambientais que podem ocasionar (COLTRO *et al.*, 2007). Tem-se como exemplo, a relação de causa e efeito entre o lançamento de nutrientes (fósforo e nitrogênio) em excesso no corpo hídrico e a eutrofização do mesmo (ARAUJO, 2013).

A AICV subdivide-se em elementos obrigatórios e opcionais, seguindo os passos apresentados na figura 04:

Figura 04: Elementos da fase de avaliação de impacto.



Fonte: ABNT (2009a).

1) Elementos obrigatórios:

a) Seleção:

Envolve a escolha de categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização.

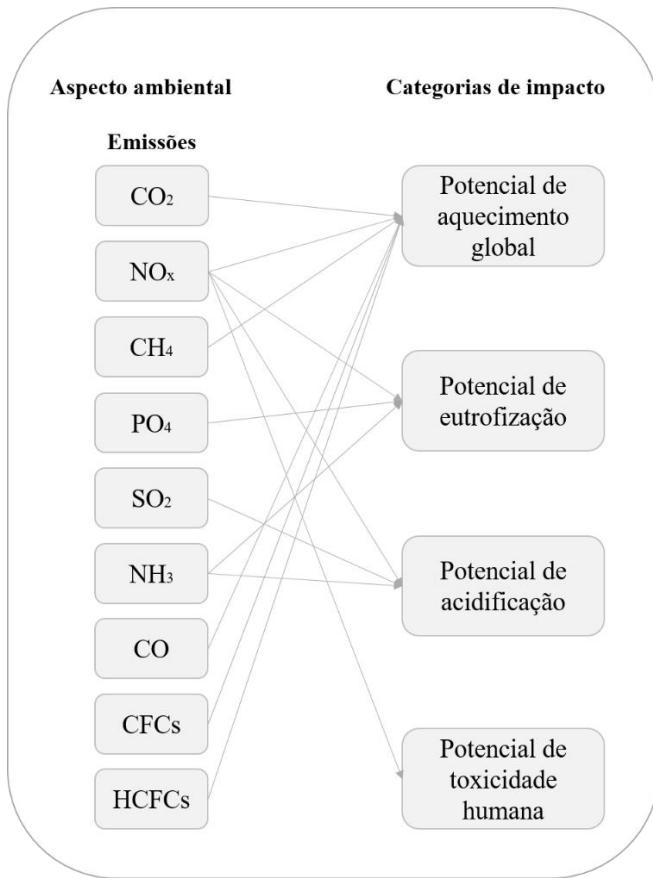
As categorias de impacto refletem as questões ou problemáticas ambientais ocasionadas pelos fluxos do sistema que são levantados no ICV (ABNT, 2009b). Tais categorias podem representar impactos em escala global, local, regional ou abordar as três em conjunto, sendo classificadas como *midpoint* e *endpoint* (EUROPEAN COMMISSION, 2010; FEHRENBACH et al., 2015; LUZ, 2017). Categorias de *midpoint* possuem abordagem orientada ao problema, ou seja, indicam o impacto ou perturbação em si, ocasionados por determinada intervenção ao meio ambiente, já as categorias de *endpoint* retratam os danos causados aos ecossistemas e saúde humana (PIEKARSKI, 2015).

Os modelos de caracterização referem-se a fatores de conversão dos resultados do ICV em indicadores de categoria. Quanto aos indicadores de categoria, representam a forma quantificável dos impactos relacionados à categoria em questão, tem-se como exemplo forçamento radioativo infravermelho (W/m^2) na categoria mudanças climáticas (ABNT, 2009b).

b) Classificação:

Dispondo de dados inventariados e categorias de impacto definidas, a etapa de classificação é realizada com a finalidade de associá-los, de forma que os aspectos identificados no ICV são relacionados aos problemas ambientais que possam desencadear. Durante a classificação, deve-se ter atenção aos resultados de ICV que sejam exclusivos para apenas uma categoria de impacto e principalmente aos que correlacionam-se com várias categorias (ABNT, 2014a, 2014b; ARAUJO, 2013; EUROPEAN COMMISSION, (2010); LUZ, 2017). Na figura 05, tem-se um exemplo:

Figura 05: Correlação de aspectos ambientais a categorias de impacto.



Fonte: Adaptado de Matthews, Hendrickson e Matthews (2014); Rossi (2013).

c) Caracterização:

Cada aspecto ambiental associado ao sistema de produto, possui diferentes pesos de contribuição aos impactos resultantes (BELART, 2007). Dessa forma, na etapa de caracterização, busca-se realizar a quantificação dos dados associados na etapa de classificação. Para tal, os dados do ICV são multiplicados por fatores de equivalência de cada categoria de impacto, que são fatores derivados dos modelos de caracterização definidos previamente, utilizados para converter estes dados em unidade comum do indicador de categoria que nada mais é que a representação quantificável de uma categoria de impacto (ABNT, 2009b).

Tem-se o caso do fator de CO₂ equivalente criado pelo IPCC para representar a categoria potencial de aquecimento global, de forma que outros gases do efeito estufa identificados no sistema sejam convertidos e apresentados na unidade, por exemplo, 1 kg de N₂O e 1kg de CH₄ são equivalentes à emissão de 296 kg e 23 kg de CO₂, respectivamente (COLTRO et al., 2007; MATTHEWS; HENDRICKSON; MATTHEWS, 2014).

2) Elementos opcionais:

Como citado anteriormente, as normas ABNT NBR ISO 14040 e 14044 estabelecem que alguns estudos podem adotar elementos opcionais em sua fase de avaliação de impactos, dependendo de seu objetivo e escopo, sendo eles:

a) Normalização:

Cálculo da magnitude dos resultados de indicadores de categoria relativos a determinado valor de referência, pode-se considerar como valor de referência (1) entradas e saídas totais para uma dada área que pode ser global, regional, nacional ou local, (2) as entradas e saídas totais para uma dada área em uma base per capita ou outra medida similar, e (3) entradas e saídas em um cenário de linha-base, tal como um dado sistema alternativo de produto (ABNT, 2009a, 2009b).

Através dos cálculos, a normalização busca transformar valores com diferentes unidades em valores adimensionais, ou convertê-los para uma mesma unidade, possibilitando realizar comparações e identificar melhores atributos e alternativas, bem como, desconsiderar categorias de impacto de menor contribuição. Além disso, proporciona uma perspectiva ou contexto temporal e espacial para os resultados da AICV (MATTHEWS; HENDRICKSON; MATTHEWS, 2014; TOURINHO, 2014).

b) Agrupamento:

Envolve reunião e possível hierarquização das categorias de impacto. Para tal, pode ser realizada através do agrupamento das categorias em uma base nominal como características de entradas e saídas ou de escalas espaciais (globais, regionais e locais) e através de classificação por hierarquia como alta, média ou baixa prioridade (ABNT, 2009b).

A aplicação desse método é qualitativa e baseada na subjetividade e, portanto, poderá variar de acordo com o autor e a finalidade do estudo (ABNT, 2009a, 2009b; ROSSI, 2013).

c) Ponderação:

Utilização de fatores numéricos (pesos) resultantes da atribuição de valores para conversão dos resultados de diferentes categorias de impacto a uma mesma base, obtendo-se um perfil ambiental ponderado, tornando possível a união de categorias, visto que, se estas forem somadas, conduzirão a um único índice ambiental global ou pontuação total, em outras palavras, os diferentes impactos ambientais são ponderados entre si, resultando em um único número que

representa o impacto ambiental total do sistema de produto, auxiliando na tomada de decisão. (ABNT, 2009b; COLTRO et al., 2007; FARIAS, 2020; TOURINHO, 2014).

Por se basear na escolha de valores, a ponderação torna-se um processo subjetivo podendo-se obter repercussões diferentes com base na utilização de mesmos resultados de indicadores ou resultados normalizados. Portanto, recomenda-se utilizar diferentes fatores e métodos de ponderação e conduzir análises de sensibilidade para avaliar as consequências de diferentes escolhas de valores e métodos de ponderação sobre os resultados da AICV (ABNT, 2009b).

d) Análise de qualidade de dados:

Diferente dos três primeiros elementos, que buscam simplificar a interpretação dos resultados, a análise da qualidade dos dados da AICV tem o objetivo de compreender melhor a significância, a incerteza e a sensibilidade dos seus resultados (ABNT, 2009a; GOEDKOOP et al., 2009).

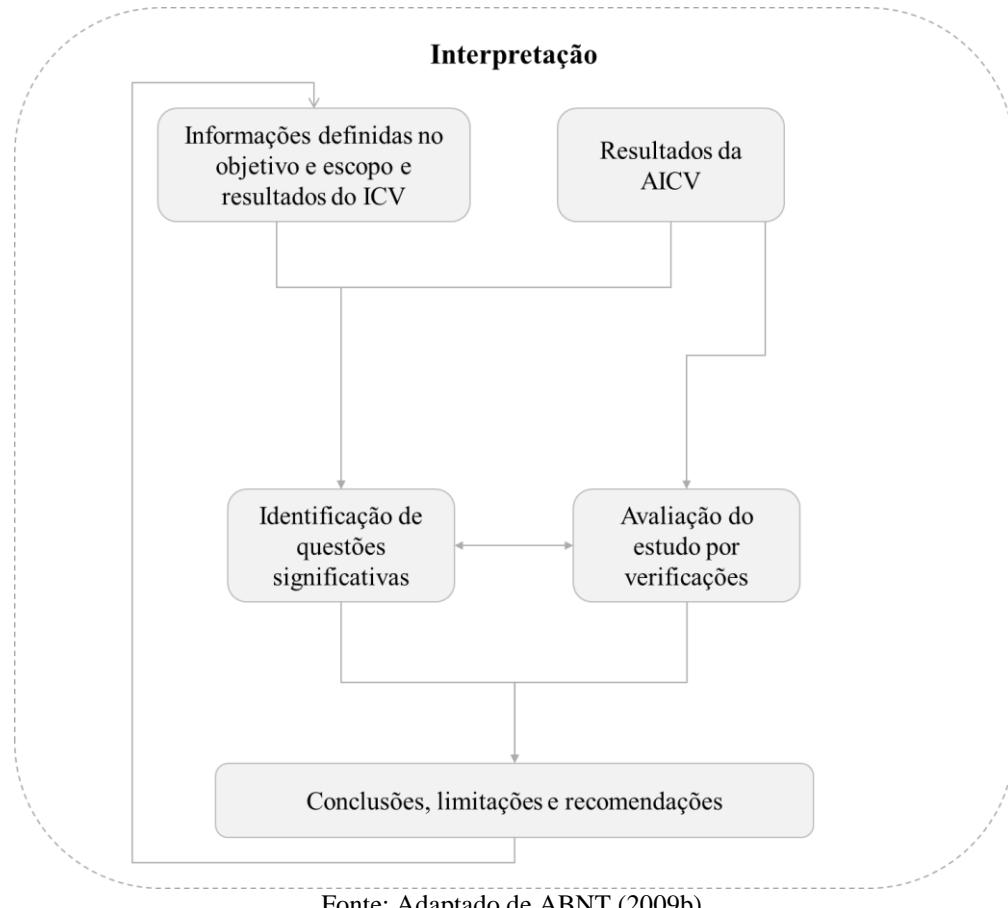
No entanto, para estudos de ACV realizados no Brasil, geralmente não se recomenda a adoção de elementos opcionais, haja vista que os modelos desenvolvidos para esta finalidade foram feitos com base em padrões internacionais, sendo mais apropriado utilizar modelos de *midpoint*, que incluem seleção, classificação e caracterização dos resultados do ICV e não aqueles que chegam até o *endpoint*, incluindo também a normalização dos dados mediante agrupamento e ponderação. (COLTRO, 2007).

2.4.4. Interpretação

A última etapa da ACV tem como objetivo realizar a discussão dos resultados obtidos com sua implementação, servindo de base para conclusões, recomendações e tomada de decisão, sempre de acordo com objetivos e escopo previamente definidos. Para isso, pode contar com a identificação das questões significativas através dos resultados das fases de ICV e AICV que produzem informações sobre o sistema de produto e também com uma avaliação do estudo baseada em verificações de completeza, sensibilidade e consistência (ABNT, 2009b).

As relações estabelecidas na fase de interpretação estão representadas de forma sucinta na figura 06:

Figura 06: Associações dos elementos da fase de interpretação a outras fases da ACV.



Fonte: Adaptado de ABNT (2009b).

Em alguns estudos, o objetivo estabelecido pode ser alcançado através da realização apenas da análise de inventário e interpretação. São os casos denominados de estudo de ICV.

2.5. Análise de qualidade de dados

Por ser uma metodologia voltada para avaliação de sistemas complexos, a ACV envolve associação de extensa quantidade de dados e processos decisórios, decorrendo em incertezas quanto aos seus resultados (CLAVREUL et al., 2013; MULLER et al., 2014). Essas incertezas podem ser classificadas em (1) Incertezas nos parâmetros, as relacionadas aos valores de entrada, tais como erros de medição, variabilidade e ou escassez de dados; (2) Incertezas de cenário que se referem às escolhas na definição e modelagem dos cenários; (3) Incertezas de modelo, relacionada a erros devido aos modelos matemáticos usados na tentativa de expressar a realidade (HUIJBREGTS et al., 2003; LLOYD; RIES, 2007).

O quadro 01 apresenta possíveis incertezas associadas ao estudo de ACV, em suas diversas etapas:

Quadro 01: Tipos e fontes de incertezas em etapas da ACV.

Tipos de incerteza		Fases da ACV			
		Definição de objetivo e escopo	Inventário	Avaliação de impacto	Interpretação
Incertezas de parâmetros	Imprecisão de dados	-	Imprecisão de medida devido erro de análise de processo	Erro em considerações relativas aos impactos. Ex: incerteza nos tempos de vida de substâncias	-
	Falta de dados	-	Dados indisponíveis ao pesquisador resultando em parâmetros não avaliados	Dados indisponíveis ao pesquisador resultando em impactos não avaliados	-
	Lacuna de dados	-	Ocorre devido a variação no período de amostragem dos dados inventariados	-	-
	Dado não representativo	-	Dados que não retratam completamente a realidade do estudo. Ex: provenientes de banco de dados e de processos semelhantes	-	-
Variabilidades	Variabilidade espacial	-	Diferenças nas características de dados por representarem regiões diferentes	Diferenças regionais na sensibilidade ambiental	-
	Variabilidade temporal	-	Dados de anos distintos podem não representar o sistema de forma correta	Mudanças nas características ambientais ao longo do tempo	-
	Variabilidade tecnológica	-	Diferenças no desempenho entre processos equivalentes	Diferenças nas características ambientais e humanas	-
Incerteza de modelo		Escolha de modelos impróprios	-	Utilização de modelos de impacto inadequados	-
Incerteza devido a escolhas		Escolha da unidade funcional, fronteiras do sistema, métodos de alocação e caracterização, e modelos de agregação	-	-	-
Incerteza subjetiva		-	Ignorância sobre aspectos relevantes do sistema estudado	Desconhecimento sobre processos modelados	Desconhecimento sobre categorias de impacto, contribuição e fatores de caracterização
Enganos		Em qualquer fase de uma ACV podem ocorrer enganos, resultando em incertezas			

Fonte: Adaptado de Benedet, (2007); Cherubini, (2015).

Diante disso, um estudo de ACV deve ser acompanhado de uma análise minuciosa das incertezas incorporadas ao longo do seu desenvolvimento (HEIJUNGS; HUIJBREGTS, 2004). De acordo com Guimarães (2018), existem diversas ferramentas e metodologias voltadas para este objetivo. Dentre estas, encontra-se a Matriz Pedigree que relaciona a incerteza do dado com as características de sua fonte, sendo: confiabilidade, completude, correlação temporal, geográfica e tecnológica adicional (quadro 02), são atribuídas pontuações na escala de 1 a 5 que representam a qualidade dos dados (WEIDEMA, 1998).

Quadro 02- Matriz para avaliação da qualidade de fontes de dados.

Pontuação do indicador	1	2	3	4	5 (padrão)
Confiabilidade	Dados verificados com base em medições	Dados verificados parcialmente baseados em suposições ou dados não verificados com base em medições	Dados não verificados parcialmente baseados em estimativas qualificadas	Estimativa qualificada (ex: por especialista industrial)	Estimativa não qualificada
Integridade	Dados representativos do mercado considerado, com período adequado para equilibrar as flutuações normais	Dados com representatividade > 50% do mercado considerado, com período adequado para equilibrar as flutuações normais	Dados com representatividade de < 50% do mercado considerado ou > 50%, mas de períodos mais curtos	Dados representativos de apenas um site relevante para o mercado ou alguns sites, mas de períodos mais curtos	Representatividade desconhecida ou dados de um pequeno número de sites e de períodos mais curtos
Correlação temporal	Menos de 3 anos de tempo desde a coleta de dados	Menos de 6 anos de tempo desde a coleta de dados	Menos de 10 anos de tempo desde a coleta de dados	Menos de 15 anos de tempo desde a coleta de dados	Idade dos dados desconhecidos ou mais de 15 anos de tempo desde a coleta de dados
Correlação geográfica	Dados da área em estudo	Dados médios de uma área maior em que a área em estudo está incluída	Dados de área com condições de produção semelhantes	Dados de área com condições de produção ligeiramente semelhantes	Dados de área desconhecida ou distintamente diferente
Correlação tecnológica adicional	Dados de empresas, processos e materiais em estudo	Dados de processos /materiais em estudo(ex:tecnologia idêntica), mas de empresas diferentes	Dados de processos e materiais em estudo, mas de tecnologias diferentes	Dados sobre processos ou materiais relacionados	Dados sobre processos relacionados a nível laboratorial ou de diferentes tecnologias

Fonte: Weidema (1998).

A ACV se configura como uma abordagem dinâmica e sua aplicação é norteada pelos objetivos de cada pesquisa, sem desconsiderar os princípios estabelecidos em norma. Em razão deste trabalho não adentrar à análise de incertezas, a ponderação de dados pelo matriz pedigree assume caráter informativo acerca da qualidade dos dados inventariados, não sendo utilizada para correção de indicadores.

3. TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS.

3.1. Definição e etapas de tratamento

O tratamento de águas residuais é definido como o conjunto de processos, combinados entre si, cujo o objetivo é a alteração das características do esgoto coletado, através de depuração ou remoção de poluentes, impurezas e contaminantes, de forma a torná-lo apropriado para disposição no corpo hídrico e visando atender os padrões de qualidade estabelecidos (BNDES, 2014; CARVALHO et al., 2014; JORDÃO; PESSÔA, 2017; MOURA, 2019; NUNES, 2017).

A escolha dos processos de tratamento a serem empregados está condicionada a diversos fatores. Dentre eles, estão as características quali-quantitativas do esgoto a ser tratado, situação do corpo receptor e sua capacidade de autodepuração, exigências dos órgãos de controle e fiscalização ambiental locais, legislação aplicável, nível do tratamento e eficiências de remoção desejadas (CARVALHO et al., 2014; NETO; MELO; SANTOS, 2021; VON SPERLING, 2017). Adicionalmente, devem ser considerados aspectos econômicos, sociais, operacionais, disponibilidade de área e até os anseios da comunidade (ANA, 2017).

De modo geral, o tratamento de águas residuais é dividido em etapas ou operações unitárias, selecionadas e combinadas conforme o nível de tratamento que se pretende dar ao esgoto. Na concepção do projeto de uma estação devem ser avaliadas as tecnologias de tratamento compatíveis com a solução requerida, podendo resultar na seleção de um ou mais processos de tratamento (ANA, 2017). Sendo:

- Tratamento preliminar- tem como objetivo a remoção de sólidos, sendo constituído por processos mecânicos e físicos, sendo usualmente gradeamento seguido de desarenação e medição de vazão (BORGES, 2014; IBGE, 2020).
- Tratamento primário- voltado para retirada de materiais suspensos remanescentes no efluente, através do processo de decantação (ANA, 2017; VON SPERLING, 2017).
- Tratamento secundário- constitui-se por mecanismos biológicos e tem como principal objetivo a remoção de matéria orgânica presente no efluente (ANA, 2017; IBGE, 2020).
- Tratamento terciário (avançado) - se destina à eliminação de microrganismos patógenos presentes na água residual (vírus e bactérias), complemento ou refino na remoção de nutrientes (nitrogênio e fósforo) quando estes não são retirados totalmente no processo

secundário, e em alguns casos para remoção de substâncias tóxicas como metais pesados (AMOATEY; BANI, 2011; IBGE, 2020).

Vale ressaltar que os sistemas de tratamento de águas residuais são classificados de acordo com o tipo de tratamento biológico/secundário adotado, visto que é a fase que dispõe da maior variedade (BICUDO, 2017). Von sperling (2017) elenca as principais tecnologias adotadas nesse processo (quadro 03):

Quadro 03: Descrição sucinta dos principais sistemas de tratamento de esgoto em nível secundário.

		Lagoas de estabilização	Lagoa facultativa Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa Lagoa aerada de mistura completa + lagoa de decantação Lagoas de alta taxa Lagoas de maturação
		Disposição no solo	Infiltração lenta Infiltração rápida Infiltração subsuperficial Escoamento superficial
	Sistemas alagados construídos (Wetlands)		Sistemas alagados construídos Sistemas alagados construídos de escoamento horizontal subsuperficial Sistemas alagados construídos de escoamento vertical
	Sistemas anaeróbios		Reator anaeróbio de manta de lodo e fluxo ascendente (UASB) Filtro anaeróbio Reator anaeróbio + pós tratamento
	Lodos ativados		Lodos ativados convencional Lodos ativados por aeração prolongada Lodos ativados de fluxo intermitente Lodos ativados com remoção biológica de nitrogênio Lodos ativados com remoção biológica de nitrogênio e fósforo
Reatores aeróbios com biofilmes			Filtro de baixa carga Filtro de carga Biofiltro aerado submerso Biodisco

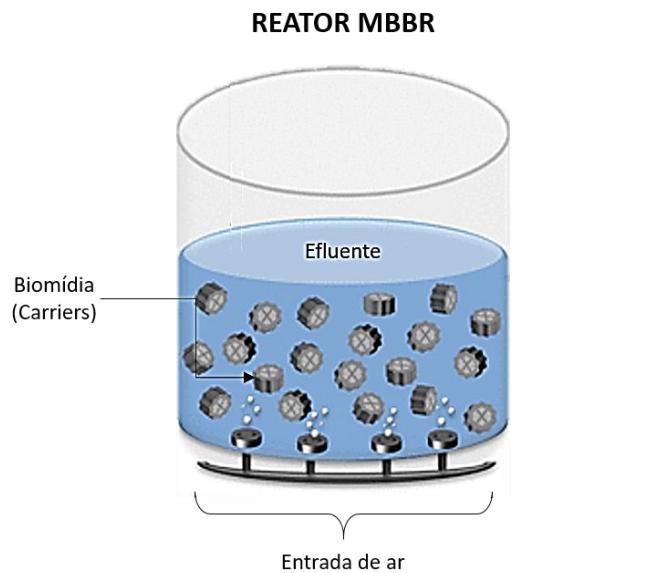
Fonte: Adaptado de Von Sperling (2017).

No Brasil, as tecnologias mais adotadas para tratamento secundário são das classes lagoas de estabilização e lodos ativados (ANA, 2017).

3.2. Reator de biofilme com leito móvel

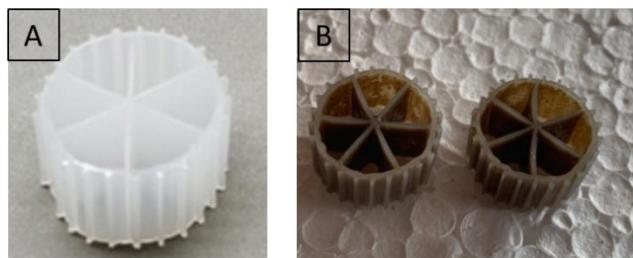
O reator de biofilme com leito móvel, mais conhecido como MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor) surgiu como variante adaptada do sistema de lodos ativados (ODEGAARD, 2006). A tecnologia MBBR consiste na incorporação de anéis (*carriers*) de polietileno de alta densidade (PEAD) ao tanque de aeração de um processo de lodos ativados (figura 07), essas peças possuem formato cilíndrico e grande área superficial para fixação e crescimento de biofilme (figura 08), sendo mantidos em suspensão no meio líquido através de aeração contínua (IZQUIERDO, 2016; QIQI; QIANG; IBRAHIM, 2012).

Figura 07: Configuração de um sistema MBBR.



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

Figura 08: Unidade de biomídia (A) sem uso e (B) com lodo aderido.



Fonte: autor.

Por suas características, os elementos carreadores permitem que uma maior concentração de biomassa seja mantida no reator em comparação com um processo de crescimento suspenso, como o lodo ativado. Isso aumenta a capacidade de tratamento biológico, possibilitando melhor eficiência do processo e utilizando mesmo volume de reator (IZQUIERDO, 2016).

O padrão de agitação no reator é projetado para proporcionar um movimento ascendente dos carreadores na superfície da tela de retenção, o que cria um efeito de depuração para evitar o entupimento, de modo que todo o volume do reator seja biologicamente ativo, resultando no aumento da atividade da biomassa(QIQI; QIANG; IBRAHIM, 2012).

Odegaard *et al.* (2000), comprovaram que o desempenho do tratamento do MBBR é proporcional à área de superfície do biofilme instalado, portanto, as atualizações do tratamento podem ser realizadas simplesmente adicionando carreadores adicionais ao mesmo tanque.

A principal diferença entre a tecnologia MBBR quando comparada a outros sistemas de biofilme é que ela combina as vantagens do sistema de lodo ativado tradicional com as vantagens oferecidas pelos sistemas de biofilme, minimizando as desvantagens de ambos (HANAFY *et al.*, 2019) .

De acordo com Water Environment Federation (2011). Algumas das vantagens inerentes ao uso de sistemas MBBR incluem:

- 1) Maior eficiência volumétrica, possibilitando tratamento com unidades compactas;
- 2) Aumento da estabilidade do processo;
- 3) Perda mínima de carga sem necessidade de retrolavagem periódica;
- 4) Flexibilidade e simplicidade de operação; e
- 5) Compatibilidade com uma variedade de técnicas de separação de sólidos;

Metcalf e Eddy, (2015), também listam algumas vantagens relacionadas a utilização desses sistemas:

- 1) Maior capacidade de tratamento.
- 2) Remoção completa de sólidos.
- 3) Características de sedimentação melhoradas.
- 4) Baixa perda de carga.
- 5) Sem canalização de filtro.
- 6) Produção de lodo reduzida.

O processo de biofilme de leito móvel tem sido usado para muitas aplicações diferentes, sendo principalmente para (1) tratamento biológico autônomo para remoção de DBO, nitrificação e/ou desnitrificação e (2) pré-tratamento antecedendo sistemas de lodo ativado possibilitando maior remoção de matéria orgânica. Seu uso é destinado tanto para tratamento de esgoto municipal quanto para águas residuais industriais (QIQI; QIANG; IBRAHIM, 2012).

3.3. Impactos ambientais no tratamento de esgoto

As estações de tratamento de águas residuais emergiram ao longo da década de 80, tendo como principal objetivo evitar a poluição e contaminação de recursos ambientais como solos e corpos hídricos, através da disposição de infraestrutura voltada para coleta e depuração de efluentes de origem doméstica e industrial e consequentemente elevar os padrões de saúde pública (COLTRO *et al.*, 2007).

A princípio eram projetadas com sistemas simples, de ordem física e biológica para remoção de sólidos e matéria orgânica. O aumento substancial na geração de esgoto associado à diminuição da capacidade de assimilação do meio ambiente, tem resultado em sobrecarga aos ecossistemas fazendo com que as estações de tratamento necessitassem de expansão ou adoção de tecnologias cada vez mais complexas, de modo a reduzir também nutrientes, patógenos e substâncias tóxicas (LORENZO-TOJA *et al.*, 2016).

No entanto, a elevação nos níveis de tratamento pela adoção de técnicas mais sofisticadas resulta em maior consumo de recursos (infraestrutura, produtos químicos e energia) e emissões ambientais (gases de efeito estufa e bioassólidos)(FOLEY *et al.*, 2010), tornando controverso o objetivo das estações de tratamento, caso estes fatores ultrapassem seus impactos positivos (RODRIGUEZ-GARCIA *et al.*, 2011; ZENG; CHEN, 2016).

Para Pituco (2017) grande parte dos sistemas de tratamento ao reduzirem os danos associados às descargas de águas contaminadas no ambiente, suscitam, de forma análoga, outros impactos negativos. Estes podem variar de magnitude em função de diferentes fatores como tipologia, dimensão e da gestão dos sistemas (HERNÁNDEZ-PADILLA *et al.*, 2017; PITUCO, 2017).

Dentre as fases do ciclo de vida de uma estação de tratamento, a operação é a que mais contribui para danos ao meio ambiente, tendo emissões consideráveis de gases efeito estufa devido a utilização de produtos químicos e energia (NGUYEN *et al.*, 2021).

Considerando suas vantagens operacionais frente a algumas tecnologias semelhantes de tratamento, a avaliação ambiental de sistemas MBBR torna-se essencial, sobretudo em sua fase de operação, sendo o objetivo do presente estudo. Somado a isso, o conhecimento do desempenho ambiental de outras tecnologias também se faz essencial, sendo possível através do levantamento em estudos já realizados.

4. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA APLICADA AO TRATAMENTO DE ESGOTO

Por meio da RSL realizada neste estudo, foi possível identificar que a análise de ETE's através da ACV vem sendo principalmente aplicada para determinar impactos associados a suas etapas de construção, operação e/ou fim de vida, sendo o objetivo de 34% (13) dos estudos encontrados, os quais buscaram avaliar desde sistemas mais simples de tratamento de efluentes até os mais complexos.

Burchart-Korol e Zawartka (2019a), realizaram a ACV de fossas sépticas individuais, com objetivo de avaliar seus impactos ambientais desde a construção, passando pela operação até a fase de fim de vida. Para isso, foram utilizados os métodos ReCiPe e TRACI e selecionadas quatro categorias de impacto: emissão de gases do efeito estufa, eutrofização, esgotamento de metais e esgotamento de combustível fóssil.

De acordo com os autores, as categorias de emissão de gases do efeito estufa e esgotamento de metal tem principal influência do uso de concreto e aço na fase de construção, respectivamente. Em relação à categoria de esgotamento de combustíveis fósseis, esta é influenciada diretamente pelo consumo de óleo diesel para transporte do esgoto na fase de operação o qual é realizado por caminhão tanque a vácuo. Quanto à eutrofização, foi demonstrado que o vazamento de tanques e descarga de esgoto descontrolada é a maior causa de impacto nessa categoria.

Além disso, Burchart-Korol e Zawartka (2019a) evidenciam que o reaproveitamento do biogás gerado no processo para produção de energia reduziu em 34% as emissões de GEE's e em 13% o esgotamento de combustível, bem como, a reciclagem de ferro fundido na fase de fim de vida contribuiu para redução de aproximadamente 8% do esgotamento de metais. Mostrando dessa forma, que sem o aproveitamento energético e reciclagem por meio dessas configurações os valores destas categorias durante a vida útil seriam maiores.

Pasqualino *et al.* (2009) e Singh *et al.* (2019) realizaram avaliação da fase de operação de sistemas com tecnologia de reator aeróbico/anaeróbico. Ambos os estudos utilizaram 1m³ como unidade funcional e avaliaram os impactos através do método CML.

Na pesquisa de Pasqualino *et al.* (2009), o processo de tratamento de efluentes impactou principalmente as categorias de acidificação, alterações climáticas, oxidação fotoquímica e esgotamento de recursos abióticos, os autores associam esses resultados ao elevado consumo

de energia durante a operação, tendo como principal fator o uso do reator, que representa 70,85% do total de consumo de eletricidade de todo o sistema.

Singh *et al.* (2019), chegaram ao mesmo resultado quanto ao fator de maior impacto durante o tratamento. O consumo de energia necessária para o funcionamento da ETE é a entrada que mais interfere em 91% das categorias de impacto analisadas no estudo. Tendo pouca influência apenas na categoria de eutrofização, que está associada diretamente ao lançamento de substâncias (nitrogênio e fósforo) ao ambiente. Além disso, os autores concluem que em comparação com outros sistemas de tratamento de águas residuais convencionais, a tecnologia analisada apresenta menor demanda energética, além de baixo custo e operação simples.

Lopes, Queiroz e Kiperstok (2018) avaliaram uma estação de tratamento de grande porte composta por reator UASB seguido de 4 pântanos construídos e desinfecção por hipoclorito de sódio (NaClO). A ACV foi realizada através do método CML e considerando as etapas de construção e operação. As categorias de impacto escolhidas foram: esgotamento abiótico, aquecimento global, acidificação e eutrofização.

De acordo com os autores, na etapa de construção da ETE o uso de armadura de aço foi o fator chave, sendo responsável pela maioria dos impactos ambientais em todas as categorias de avaliação de impacto escolhidas. Isso deve-se à sua produção, principalmente pela adição de alguns metais como cromo, molibdênio e, em menor grau, níquel.

Em relação à fase de operação, os fatores de maior impacto foram (1) uso da solução de hipoclorito de sódio (desinfecção) considerando as categorias de depleção abiótica e acidificação, (2) emissões de metano resultantes da digestão anaeróbica no reator UASB para categoria de aquecimento global (>80%) e (3) presença de nitrogênio e fósforo no efluente final para categoria eutrofização (>90%), dada a baixa eficiência de remoção desses poluentes pelo sistema de tratamento.

A comparação entre as duas fases analisadas no estudo de Lopes, Queiroz e Kiperstok (2018), mostrou que os impactos ambientais decorrentes da operação da ETE são mais significativos do que os da construção para todas as categorias selecionadas, assim como evidenciado em outros estudos (GARFÍ; FLORES; FERRER, 2017; HOSPIDO; MOREIRA; FEIJOO, 2008b; LOPSIK, 2013; PADRÓN PÁEZ *et al.*, 2017; SABEEN *et al.*, 2018).

Singh *et al.* (2017) e Teow *et al.* (2021), buscaram avaliar e quantificar os impactos ambientais apenas da fase de funcionamento de uma usina que opera com tecnologia MBBR

(reator de biofilme de leito móvel). Para isso, Singh *et al.* (2017) adotaram o método CML, considerando 11 categorias de impacto e Teow *et al.* (2021) o método ReCiPe utilizando 4 categorias (mudanças climáticas, acidificação terrestre, toxicidade humana e eutrofização).

Os resultados encontrados em Singh *et al.* (2017) mostraram que os impactos gerados pela estação de tratamento resultam em maior escala do consumo de eletricidade no processo, com interferência maior que 80% em 9 das 11 categorias analisadas sendo o principal hotspot do sistema. Além disso, os autores apontam que o sistema contribui em maior grau para ecotoxicidade aquática marinha e em menor para destruição da camada de ozônio.

Da mesma forma, em Teow *et al.* (2021) o consumo energético durante a operação registrou o maior impacto nas categorias analisadas, sendo maior para mudanças climáticas e acidificação terrestre (>70%). De acordo com os autores, a operação unitária que mais demanda energia elétrica é a membrana de osmose reversa devido a utilização de bomba de alta pressão.

Ambos os autores associam a matriz energética dos países em que estão localizadas as ETE's ao potencial de impacto ambiental da eletricidade utilizada nestes sistemas, visto que é proveniente da queima de combustíveis fósseis.

Bui *et al.* (2022), aplicou a ACV para avaliar benefícios e desvantagens ambientais de um sistema de tratamento de efluente industrial (fábrica de papel e celulose) composta pelo processos de flotação por ar dissolvido (FAD), reator anaeróbico de recirculação interna, reator de biofilme de leito móvel (MBBR) e desinfecção. O método de avaliação adotado foi o ReCiPe, considerando todas suas 18 categorias de impacto.

Os resultados mostraram que dentre as tecnologias adotadas, a flotação por ar dissolvido foi mais impactante, estando diretamente relacionado ao uso de produtos químicos neste processo. Na sequência, pelo mesmo motivo tem-se o reator anaeróbico de recirculação interna e em terceiro lugar o MBBR com influência do uso de energia.

Ademais, o processo de menor impacto foi a desinfecção, com baixa influência em todas as categorias de impacto, exceto apenas na de eutrofização de água doce, onde interferiu em mais de 70% de seu valor, isso se justifica pela baixa eficiência na remoção de nutrientes (nitrogênio e fósforo), que resulta em concentrações elevadas no efluente final a ser lançado ao meio ambiente (BUI *et al.*, 2022).

Mishra *et.al* (2021), avaliaram a etapa de operação de uma ETE composta por Reator de Batelada Sequencial (RBS) e branqueamento. Para este estudo, foi utilizado o método de avaliação CML abordando 10 de suas categorias de impacto.

Seus resultados mostram que o consumo de eletricidade é um contribuinte dominante para os impactos ambientais, sendo demandada principalmente para o funcionamento do RBS. Isso fez com que o reator apresentasse influência superior a 70% em 8 das 10 categorias abordadas. Além disso, os autores afirmam que para tratamento da mesma quantidade de efluentes, a demanda energética total do sistema é superior à de outros estudos, isso deve-se à utilização ineficiente de equipamentos como sopradores, câmara de areia e bombas.

Assim como em Singh *et al.* (2017) e Teow *et al.* (2021), para Mishra *et.al* (2021) o maior problema relacionado à eletricidade encontra-se na matriz de geração adotada, a qual é a base da queima de combustíveis fósseis, mais especificamente carvão. Isso faz com que o processo que demanda maior quantidade de energia para operar tenha maiores impactos ambientais e vice-versa.

Outra abordagem identificada nos estudos encontrados através da RSL é a comparação entre sistemas de tratamento que utilizam diferentes alternativas/tecnologias, de modo que 32% (12) das pesquisas têm essa vertente.

Yi Li *et al.* (2013), avaliaram um sistema composto por reator Anaeróbio /Anóxico/Óxico (A_2O), microflocação e tratamento de lodo e compararam seu desempenho a dois sistemas avaliados em outros estudos, a saber, processo simulado Bardenpho de 5 estágios (anaeróbico, anóxico primário, aeróbio primário, anóxico secundário, aeróbico secundário) (FOLEY *et al.*, 2010) e parque úmido (DUAN *et al.*, 2011). As etapas consideradas foram construção e operação, CML foi o método utilizado, considerando as categorias de depleção de recursos abióticos, aquecimento global, acidificação e eutrofização.

O sistema de parque úmido, por ser a tecnologia de tratamento que demanda maior energia para operação foi a mais impactante em todas as categorias consideradas, pelo contrário, a tecnologia de reator A_2O avaliada em Yi Li *et al.* (2013) apresentou menor impacto para acidificação e depleção de recursos abióticos por possuir o consumo energético mais baixo. Em relação a eutrofização, as tecnologias apresentaram valores parecidos, com pequena diminuição nos resultados do processo simulado de 5 estágios (FOLEY *et al.*, 2010), por possuir melhor

eficiência na remoção de nutrientes e consequentemente proporcionar melhor qualidade do efluente tratado.

Além disso, os autores realizaram uma análise adicional da tecnologia adotada como estudo de caso, modificando a fonte energética utilizada para eólica, o que diminuiu substancialmente os impactos em todas as categorias, ressaltando o benefício do consumo de energia renovável e destacando-o como uma solução para melhoria geral do desempenho ambiental de sistemas de tratamento.

De Feo e Ferrara (2017b) utilizaram a ACV em nível de projeto para a comparação de duas alternativas de sistemas de tratamento em pequena escala: sistema compacto de lodo ativado e sistema de pântano construído. A modelagem dos sistemas considerou as mesmas características operacionais como vazão diária e características físico-químicas do efluente a ser tratado. Todas as fases do ciclo de vida foram incluídas nos limites do sistema (construção, uso e fim de vida). A avaliação foi realizada pelo método ReCiPe abordando todas suas categorias.

O tratamento por pântano construído mostrou-se mais ecológico durante a fase de operação, pelo menor consumo energético nesse sistema. Em contrapartida, apresentou impactos superiores ao lodo ativado quando avaliada sua construção, por demandar quase o triplo de material durante essa fase.

Evidencia-se no estudo que a vida útil operacional das instalações é outro aspecto importante a ser considerado. Haja vista que um aumento de 33% do tempo de vida operacional produziu uma diminuição de mais de 25% do total de impactos ambientais do sistema de pântanos construídos, ou seja, a variação deste parâmetro tem influência significativa nos sistemas de tratamento extensivos, onde ocorre o maior consumo de energia e recursos durante a fase de construção. Dessa forma, o aumento da vida útil implica em uma “diluição” dos impactos ambientais totais em um número maior de anos (DE FEO E FERRARA, 2017b).

Hernández-Padilla *et al.* (2017) buscaram comparar a construção e operação de lagoas de estabilização e lodos ativados, visto que são os dois sistemas de tratamento mais comuns na América Latina e Caribe. Os métodos de avaliação utilizados foram ReCiPe, Impact 2002+ e Impact World+.

Lodos ativados geram menos impactos de aquecimento global do que lagoas de estabilização, além de normalmente apresentar melhor desempenho na categoria de saúde

humana. Entretanto, observou-se controvérsia nos resultados relacionados a danos ao ecossistema, particularmente em relação à eutrofização de água doce.

De acordo com os autores, essa contradição é justificada pelas diferentes premissas de modelagem adotadas por cada metodologia de AICV, demonstrando-se que o entendimento da estrutura dessas metodologias é fundamental para interpretar com precisão os resultados.

Kamble *et al.*(2019) avaliaram seis sistemas de tratamento diferentes, a saber: (1) reator de batelada sequencial, (2) biorreator de membrana, (3) reator de biofilme de leito móvel, (4) lodo ativado, (5) biotecnologia do solo e (6) lagoas aeradas. Este estudo levou em consideração apenas a fase de operação dos processos e utilizou o método CML para avaliação de impacto do ciclo de vida. As tecnologias que apresentaram maior e menor impacto, respectivamente, foram lagoas aeradas e biotecnologia do solo.

Os impactos foram causados principalmente pelo consumo de eletricidade de base fóssil e produtos químicos. Verificou-se também que o consumo elétrico pelas ETE's contribui de forma mais significativa para as categorias de impacto global, como depleção abiótica, aquecimento global, acidificação e potencial fotoquímico de criação de ozônio (KAMBLE *et al.*, 2019).

Embora a biotecnologia do solo tenha se apresentado como a alternativa de menor impacto ambiental por ser altamente eficiente para remoção de metais pesados e possuírem baixa demanda energética, os autores destacam que a implementação destas tecnologias requer grandes áreas de terra, podendo ser um fator de peso em regiões que o mix de eletricidade seja de base renovável e o uso da terra esteja comprometido.

Demais estudos encontrados na literatura buscam avaliação por cenários, seja através da comparação de situações com e sem tratamento, pela variação/substituição de tecnologias ou inclusão delas nos sistemas ou pela modificação de métodos de AICV.

Chu, Abbassi e Richard (2022) compararam quatro cenários, sendo (1) descarte das águas residuais sem tratamento, lançadas diretamente no meio ambiente, (2) envio para tratamento em estação municipal centralizada, (3) tratamento local com biorreator de membrana e (4) tratamento local com biorreator de membrana associado a osmose reversa e filtração ultravioleta. Foram adotados os métodos ReCiPe e TRACI para avaliação dos impactos.

O cenário 1 (sem tratamento) apresentou impacto expressivo na categoria de eutrofização na avaliação por ambos os métodos. Por outro lado, interferiu minimamente nas demais

categorias, em razão de não necessitar de materiais e energia, visto que nenhuma opção de tratamento foi aplicada.

O cenário de tratamento em ETE centralizada municipal teve a maior pegada ambiental tanto na utilização do ReCiPe quanto do TRACI. Sendo os sistemas de tratamento local (cenários 3 e 4) as melhores opções, visto que apresentaram redução de impactos de 10% a 60% nas categorias quando comparadas a ETE municipal. A combinação do biorreator e membrana a osmose reversa e filtração UV foi o melhor cenário, além de possibilitar o reuso da água, ocasionando menores impactos.

O resultado dos impactos de toxicidade humana apresentou grande discrepância na avaliação pelos métodos ReCiPe e TRACI, o que é atribuído à diferença de modelos adotados em cada um. No entanto, conclusões semelhantes foram feitas em ambos os métodos, para maioria das categorias analisadas (CHU, ABBASSI E RICHARD, 2022).

Pausta *et al.* (2018) utilizaram a ACV para avaliar o potencial de modernização de um tratamento convencional de águas residuais nas Filipinas. O primeiro cenário envolve a atualização para recuperação biológica de nutrientes, já o segundo considera recuperação bioquímica de nutrientes.

Os dados foram processados usando o método IMPACT 2002+ e os resultados mostram que integrar os sistemas de recuperação de nutrientes ao cenário atual pode trazer benefícios ambientais, visto que reduzem em cerca de 12% a 14% de impactos relacionados à eutrofização, 4% de extração mineral e 3,5% de acidificação aquática.

Os autores evidenciam que embora pareça pouco, uma diminuição de 3,5% na acidificação aquática e 4% na extração mineral, equivalem a redução de 56.700 kg de SO₂ eq e 50.000 MJ, respectivamente, nas emissões anuais em termos absolutos. Todavia, espera-se um aumento de 5% a 6 % no potencial de aquecimento global para os cenários, dado aumento do consumo de energia e produtos químicos com a implementação das tecnologias de tratamento de águas residuais.

Em síntese, a comparação dos cenários com base em todas as categorias de impacto, mostra que a adição do processo bioquímico (cenário 4) ao sistema atual é a melhor solução em termos de desempenho ambiental do ciclo de vida (PAUSTA *et al.*, 2018).

Bai *et al.*(2017) buscaram realizar a comparação de dois métodos de AICV ao aplicar o estudo para avaliar a fase de operação de uma ETE doméstica na China. Os métodos adotados

foram CML (método genérico global) e e-Balance (método regional, específico para a China). Foram comparados 4 cenários de operação, variando de sem tratamento, tratamento básico (primário e secundário), intermediário (primário, secundário e remoção de fósforo) e avançado (primário, secundário, terciário e remoção de fósforo).

Resultados divergentes foram encontrados na comparação dos métodos. O cenário sem tratamento teve a pontuação agregada mais baixa para o CML, enquanto que na análise de impactos pelo e-Balance foi o cenário mais impactante. O contrário ocorreu para o cenário 4 (tratamento mais avançado), sendo o mais impactante no CML e menos no E-balance.

De acordo com os autores, o principal motivo de discrepância entre os métodos foi a utilização da demanda química de oxigênio (DQO) como uma categoria independente no e-Balance, sendo mais assertivo na avaliação de impactos relacionados à degradação/eutrofização de corpos hídricos da região. No entanto, carecia de fatores de caracterização relevantes para as categorias de impacto de toxicidade, que são abordadas de forma abrangente no CML, garantindo a esse método melhor avaliação de impactos do consumo de eletricidade, adição de produtos químicos e produção de lodo residual.

Por motivo da DQO ser o fator mais crítico na poluição de águas chinesas, o método e-Balance se mostrou mais apropriado. Dessa forma, os autores concluem que o desenvolvimento de métodos que considerem características regionais é de extrema importância, por permitirem uma avaliação mais precisa dos impactos.

O quadro 04 apresenta as informações dos 38 artigos identificados por meio da RSL, discorrendo de forma sucinta acerca da implementação do escopo de ACV, contendo o tipo de ETE analisada por cada estudo, etapas, fonte de dados e fluxos considerados, métodos de AICV e categorias de impacto utilizadas.

Observa-se que a unidade funcional mais utilizada para avaliação de ETE's é m³ de efluentes tratados sendo adotada em 68% dos estudos, 19 % adotaram a unidade de equivalente populacional (PE) e 13% demais unidades menos usuais como a própria ETE, kg de fosfato removido e kg de alimentos consumidos pela população atendida.

Em 100% dos estudos a fronteira do sistema considerou a etapa de operação, sendo 61% apenas operação, 26% construção e operação e 13% construção operação e fim de vida.

Em relação aos métodos de avaliação de impacto, os mais utilizados foram CML (50%) seguido do ReCiPe (47%). Em 3% dos estudos, foram abordados demais métodos como TRACI, USES, EPS, Stepwise, e-Balance, Impact World +, Impact 2002+, Escassez Ecológica e Eco-Indicator 99, sendo de forma individual ou associados.

Quanto às tecnologias de tratamento avaliadas, as principais foram reator (32%) e lodos ativados (29%). Ademais, 13% dos artigos analisaram outros sistemas, 18% realizaram comparação de duas ou mais tecnologias e 8% não informaram.

Quadro 04: Síntese dos estudos identificados .

Referência - Local	Tipo de ETE	Etapas consideradas	Unidade Funcional	Método de AICV	Categorias de impacto	Fonte de dados	Fluxos considerados
Halleux <i>et al.</i> (2006) – Bélgica	Lodos ativados com precipitação de fósforo	Construção e operação	1m ³	Eco-Indicator 99, CML e Impact 2002 +	<i>Ecoindicator 99:</i> EC, ER (inorgânicos), ER (orgânicos), EC, EU, AC, AG, CF <i>CML:</i> TH, EFR (orgânicos), EC (água doce), EC (marinha), ET, EU, AC, AG, CF. <i>Impact 2002+:</i> EC, ENC, ER (inorgânicos), ER (orgânicos), EC (aquática), EC (terrestre), EU (aquática), AC (terrestre), AC (aquática), AG, CF	Não informado	Consumo de energia, produção dos materiais de construção (cimento e aço), efluentes da estação, o transporte dos resíduos para seu destino final e a incineração de lodos
Lim, Park & Park (2008) – Coreia do Sul	Não informado	Operação e manutenção	Define como o próprio sistema de tratamento de águas residuais	CML 2001	AC, EU, AG, EA (água doce), EA (marinha), TH, ET, ER (abiótica), DCO, FOF, RI	Banco de dados Ecoinvent	Fabricação das tubulações e equipamentos (bombas e motores), transporte e tubulação, consumo de eletricidade, reciclagem de aço, ferro e cobre
Del Borghi <i>et al.</i> (2008) – Itália	Lodos ativados + tratamento de lodo + produção de biogás	Construção e operação	1m ³	USES-LCA	UR (renováveis e não renováveis), UA, CE, AG, AC, DCO, FOF, EU, AG (fontes renováveis), ES (marinha e de água doce), EA (marinha e de água doce)	Levantamento próprio e banco de dados Ecoinvent	Consumo de energia e recursos para construção e operação (concreto, tubos de aço e ferro gusa), lançamento de esgoto tratado em rios/mar, emissão atmosférica de desodorizantes e combustão do biogás, emissão e transporte de lodos e resíduos.
Hospido, Moreira & Feijoo (2008a) – Espanha	Lodos ativados + tratamento de lodo + produção de biogás	Operação	1 PE	CML 2002	EU, DO, AG, AC, FOF, TH, ET, EA (marinha e de água doce), ER (abióticos)	Levantamento próprio com empresa responsável pela gestão de efluentes e bancos de dados	Materiais, consumo de energia e água , lodo gerado

Referência - Local	Tipo de ETE	Etapas consideradas	Unidade Funcional	Método de AICV	Categorias de impacto	Fonte de dados	Fluxos considerados
Pasqualino <i>et al.</i> (2009) – Espanha	Reator aeróbico/anaeróbico + tratamento de lodo	Operação	1m ³	CML 2000	AC, AG, EU, FOF, ER (abiótico), DCO, EA (marinha e de água doce), ES (marinha e de água doce), TH, ET, CA (doce) e CE	Levantamento próprio (dados operacionais específicos do local coletados de relatórios internos) entrevistas pessoais e banco de dados Ecoinvent	Produtos químicos, consumo de energia, consumos de serviço, transporte, resíduos gerados, tratamento ou disposição final dos resíduos e material de manutenção
Lim e Park (2009) – Coreia do Sul	Coagulação, floculação e sedimentação	Construção, operação e manutenção	Define como o próprio sistema de tratamento de águas residuais	EPS 2000	ER (abiótico), AC, EU, EA (marinha e de água doce), AG, TH, DCO, FOF, RI e ET	Dados da literatura e bancos de dados Ecoinvent	Equipamentos (tubulações, bombas e motores), obras de transporte e tubagem associadas, consumo de eletricidade, reciclagem de aço, ferro e cobre
Meneses, Pasqualino e Castells (2010) – Espanha	Somente tratamento terciário de desinfecção: Cenário 1: Cloração + UV Cenário 2: Ozonização Cenário 3: Ozonização + peróxido de hidrogênio	Operação (apenas tratamento terciário da planta)	1m ³	CML 2000	AC, AG, EU, FOF, ER (abiótico) e DCO	Levantamento próprio (dados operacionais coletados de relatórios internos), entrevistas com operadores, dados da literatura e banco de dados Ecoinvent	Materiais, produtos químicos, transporte, resíduos gerados, tratamento ou disposição final dos resíduos e consumo energético
Pasqualino, Meneses e Castells (2011) – Espanha	Reator biológico com desinfecção (cloro e UV) + tratamento de lodo	Operação	1m ³	CML 2000	AC, AG, EU, FOF, ER (abiótico), DCO, EA (marinha e de água doce), ES (marinha e de água doce), TH, ET	Levantamento próprio e banco de dados Ecoinvent	Materiais, produtos químicos, transporte, resíduos gerados, tratamento e disposição final de resíduos
Rodriguez-Garcia <i>et al.</i> (2011) – Espanha	Lodos ativados	Operação	1 m ³ e 1kg de PO ₄ ³⁻ eq. removido	CML 2002	AG, EU	Levantamento próprio (dados da companhia responsável pelo tratamento de águas residuais) estudos anteriores e banco de dados	Eletricidade, consumo de produtos químicos, transporte, resíduos, fertilizantes evitados, emissões para água e disposição final do logo (fertilização de solo e aterro)

Referência - Local	Tipo de ETE	Etapas consideradas	Unidade Funcional	Método de AICV	Categorias de impacto	Fonte de dados	Fluxos considerados
Yi Li <i>et al.</i> (2013) – China	Comparação de sistemas: 1- Reator anaeróbio/anóxico/óxico (A ₂ O) com microfloculação + tratamento de lodo 2- Processo Bardenpho de 5 estágios 3- Parque úmido	Construção e operação	10 ⁵ m ³	CML 2000	ER (abiótico), AG, FOF , ET, AC, EU	Estudos anteriores, dados da companhia elétrica, bases de dados ELCD, CPM LCA	Consumo de material e energia, emissões para o ar, emissões para o solo, descarga de biossólidos, produção de materiais de construção, transporte, tratamento de lamas
O'Connor, Garnier e Batchelor (2014) – Austrália	Lodos ativados + clarificação + flotação por ar dissolvido (DAF) + reator UASB + ultrafiltração + osmose reversa	Construção, operação e desativação	114,4 m ³	CML- IA	EU, AG, TH, EA (água doce) e CA (doce)	Levantamento próprio, estudos anteriores e banco de dados Ecoinvent	Eficiência de tratamento (remoção de nutrientes), geração de lodo, consumo de eletricidade, consumo de materiais (aço e concreto), produtos químicos, geração de resíduos
Risch <i>et al.</i> (2014) – França, Espanha e Egito	Comparação de sistemas: 1º: Filtro de fluxo vertical 2º: Lodo ativado com precipitação de fosfato e floculação 3º: Lodo ativado com tanque de polimento	Construção e operação	1 PE	ReCiPe 2008	AG, DCO, AC (terrestre), FOF, MP, TH, ET, EC (marinha e de água doce), EU (marinha e de água doce), RI, UT (agrícola e urbana), TNT	Relatórios técnicos nacionais, diretrizes, recomendações de especialistas e banco de dados Ecoinvent	Consumo de eletricidade, produtos químicos, geração de lodo e resíduos
Niero <i>et al.</i> (2014)– Dinamarca	Sem informação	Operação	1 m ³	ReCiPe 2008	AG, ER (fóssil), TH, ET, EA (marinha e de água doce), EU (marinha e de água doce)	Bancos de dados Ecoinvent e ELCD	Consumo de gás natural , água e energia, produtos químicos, produção de calor e eletricidade.
Risch <i>et al.</i> (2015) – França	Lodo ativado com precipitação de fosfato + tratamento de lodo	Construção , operação e desativação	5200 PE	CML 2001 e ReCiPe 2008	DCO, TH, RI, FOF,MP, AG, ET, AC(terrestre), UT (agrícola),TNT, EU (marinha e de água doce), EU, E (marinha), ER (minerais e fóssil) e CA	Levantamento próprio (documentos de projeto detalhados e informações do fornecedor) e banco de dados Ecoinvent	Materiais, produtos químicos, insumos de energia necessários para construir / desmontar, operar e manter o sistema de esgoto e a ETAR, emissões para o ar e água, transporte

Referência - Local	Tipo de ETE	Etapas consideradas	Unidade Funcional	Método de AICV	Categorias de impacto	Fonte de dados	Fluxos considerados
Lorenzo-Toja <i>et al.</i> (2016) – Espanha	Lodo ativado + tratamento de lodo	Operação	1 m ³	CML- IA e ReCiPe 2008	AG e EU	Banco de dados Ecoinvent	Produtos químicos, eletricidade, resíduos, qualidade do efluente (entrada e saída) gestão do lodo e disposição final
Teodosiu <i>et al.</i> (2016) – Romênia	Comparação de sistemas: 1º Lodo ativado convencional 2º Lodo ativado de duas etapas + tratamento de lodo + produção de biogás	Operação	1 m ³	ReCiPe 2008 e Ecological Scarcity 2013	AG, DCO, TH, FOF, MP, RI, AC (terrestre), EU (água doce e marinha), ET, CA, ER (metais e fósseis), E (água doce e marinha), UT (agrícola e urbano), TNT	Levantamento próprio	Materiais, combustíveis, eletricidade, calor, emissões para o ar, água e solo
Padilla <i>et al.</i> (2017) – América latina e Caribe (total de 22 países)	Comparação de sistemas: 1º Lagoas de estabilização 2º Lodo ativado como variantes de aeração estendida	Construção e operação	1 m ³	Impact 2002 + Impact World + e ReCiPe 2008	<u>Impact 2002 + e Impact World +:</u> AG, EFR (inorgânicos), AC (marinha, água doce, terrestre), EU (marinha e de água doce), UT (biodiversidade), TNT, CA, E (água doce) e RI <u>ReCiPe 2008:</u> AG, AC (terrestre), EU (água doce), ET, E (marinha e de água doce), UT (agrícola e urbana), TNT, MP.	Levantamento próprio (dados operacionais específicos do local,) literatura e banco de dados Ecoinvent	Consumo de materiais, energia, combustível, produtos químicos, transporte e emissões
Bai <i>et al.</i> (2017) – China	Não informado	Operação	10 ⁴ m ³	CML 2002 e e-Balance	ER (metais e fósseis), AG, DCO, TH, EA (água doce), FOF, AC, EU, ER (abiótico fósseis) e DQO	Bancos de dados Ecoinvent e ELCD	Consumo de eletricidade e produtos químicos, emissões para o ar, água e solo,produção de eletricidade, transporte e tratamento de lodo

Referência - Local	Tipo de ETE	Etapas consideradas	Unidade Funcional	Método de AICV	Categorias de impacto	Fonte de dados	Fluxos considerados
De Feo e Ferrara(2017a) – Suíça	Lodo ativado com desinfecção +tratamento de lodo + produção de biogás	Operação	1 PE	IPCC GWP 100y 2007 Ecological footprint e ReCiPe 2008	<i>IPCC: AG;</i> <i>Ecological footprint:</i> Quantidade de terra e água biologicamente produtivas para consumo de recursos e geração de resíduos <i>ReCiPe 2008:</i> DCO, UT (agrícola), CA (doce) e ER (fóssil)	Banco de dados Ecoinvent	Coleta e tratamento de esgoto
De Feo e Ferrara(2017a) – Suíça	Lodo ativado com desinfecção +tratamento de lodo + produção de biogás	Operação	1 PE	IPCC GWP 100y 2007 Ecological footprint e ReCiPe 2008	<i>IPCC: AG</i> <i>Ecological footprint:</i> Quantidade de terra e água biologicamente produtivas para consumo de recursos e geração de resíduos <i>ReCiPe 2008:</i> DCO, UT (agrícola), CA (doce) e ER (fóssil)	Banco de dados Ecoinvent	Coleta e tratamento de esgoto
De Feo e Ferrara (2017b) – Itália	Comparação de sistemas: 1º Lodos ativados compacto 2º Pântanos construídos	Construção e operação	15 PE	IPCC GWP 100y 2007 Ecological footprint e ReCiPe 2008	<i>IPCC: AG</i> <i>Ecological footprint:</i> Quantidade de terra e água biologicamente produtivas para consumo de recursos e geração de resíduos <i>ReCiPe 2008:</i> AG, DCO, TH, FOF, MP, RI, AC (terrestre), EU (água doce) , E (terrestre, água doce e marinha) , ER (fósseis e metais), UT (agrícola e urbano), TNT	Levantamento próprio (documentos técnicos, entrevista com operadores) e banco de dados Ecoinvent	Consumo de materiais, processos de construção, escavação de solo, consumo de energia, consumo de materiais de manutenção, geração e descarte do lodo e resíduo em aterro, transporte
Singh <i>et al.</i> (2017) – India	Reator MBBR com floculação, decantação e filtragem por carvão ativado	Operação	1 m ³	CML 2001	ER (fóssil e de elementos), AC, EU, EA (água doce e marinha), AG, TH, DCO, FO, ET	Levantamento próprio (entrevista com operadores da usina) e banco de dados Gabi	Entradas: afluente, eletricidade, produtos químicos e diesel. Saídas: efluente, emissão gasosa e lodo disposto.

Referência - Local	Tipo de ETE	Etapas consideradas	Unidade Funcional	Método de AICV	Categorias de impacto	Fonte de dados	Fluxos considerados
Lopes, Queiroz e Kiperstok (2018) – Brasil	Reator UASB com sistema de pântanos construídos e desinfecção (cloro)	Construção e operação	1 m ³	CML 2000	ER (abiótico), AG, AC e EU	Levantamento próprio (informações de fabricantes, fornecedores de materiais, projetos) e banco de dados Ecoinvent	materiais de construção, uso de energia, consumo de produtos químicos, lançamento de efluente tratado, emissões gasosas
Pausta <i>et al.</i> (2018) – Filipinas	Lodos ativados	Operação	12.779 x10 ³ kg de alimentos consumidos pela população atendida	Impact 2002 +	EFR (orgânicos e inorgânicos), RI, DCO, E (aquática e terrestre), AC (aquática e terrestre), UT, EU (aquática), AG, CE (não renovável), ER (mineral), EC e ENC	Bancos de dados Ecoinvent e Agri-footprint	Fertilizantes, consumo/processamento de alimentos, consumo de energia, água e produtos químicos, geração de resíduos e lodo
Sabeen, Kamaruddin e Noor (2019) – Malásia	Não informa	Operação	1 m ³	ReCiPe 2016	AG, AC (terrestre), TH, E (terrestre e de água doce)	Levantamento próprio (coletas e experimentos) e banco de dados Ecoinvent	Consumo de materiais, energia e produtos químicos
Burchart-Korol e Zawartka (2019a) – Polônia	Fossas sépticas	Construção, operação e desativação	1 PE	ReCiPe 2008 e TRACI	AG, EU, ER (fóssil e metais)	Levantamento próprio (entrevista com operador da ETE, dados públicos, fabricantes e fornecedores) e banco de dados Ecoinvent	Consumo de materiais e recursos, transporte, emissões para o ar e água, consumo de energia, reciclagem de metais, terraplanagem
Burchart-Korol e Zawartka(2019b) – Polônia	Lixiviação subsuperficial	Construção, operação e desativação	1 PE	ReCiPe 2008 e TRACI	Emissões de gases de efeito estufa (GEE), PEU, ER (combustível fóssil), ER (metais)	Levantamento próprio (entrevista com operador da ETE, dados públicos, fabricantes e fornecedores), literatura e banco de dados Ecoinvent	Consumo de materiais, recursos e maquinários para construção, transporte, consumo de energia, emissões para o ar e água, tratamento de lodo

Referência - Local	Tipo de ETE	Etapas consideradas	Unidade Funcional	Método de AICV	Categorias de impacto	Fonte de dados	Fluxos considerados
Xue <i>et al.</i> (2019) – EUA	Lodos ativados com desinfecção + tratamento de lodo	Construção e operação	1 m ³	ReCiPe 2008 e TRACI 2.0	AG, CE, ER (fóssil e metais), AC, EU, CA, DCO, EC, ENC e E	Levantamento próprio (entrevistas com concessionárias) e dados laboratoriais	Consumo de material, energia, produtos químicos, transporte, geração de resíduos e emissões para água e ar
Kamble <i>et al.</i> (2019) – India	Comparação de sistemas: 1º Reator em batelada sequencial (RBS) 2º Biorreator de membrana (BRM) 3º Reator de biofilme de leito móvel (MBBR) 4º Lodos ativados 5º Biotecnologia do solo 6º Lagoas aeradas	Operação	1 m ³	CML 2001	ER (fóssil e metais), AC, EU, EA (água doce e marinha), AG, TH, ET, DCO, FOF	Levantamento próprio e banco de dados Ecoinvent	Eletricidade, produtos químicos, diesel, lodo gerado, emissões para o ar, água e solo, transporte, tratamento de lodo e resíduos em aterro sanitário
Mohammadi e Fataei (2019) – Irã	Comparação de sistemas: 1º Lagoas aeradas 2º Lodos ativados	Construção e operação	1 m ³	CML 2001	AG, TH, ET, AC, EA (água doce), EA (marinha), ER (abiótica), ER (fóssil), DCO, FOF	Cálculos e banco de dados Ecoinvent	Consumo para infraestrutura, matérias-primas, produtos químicos e energia (transporte foi excluído)
Singh <i>et al.</i> (2019) – India	Reator Anaeróbico com sedimentação + filtro anaeróbico	Operação	1 m ³	CML 2001	ER (fóssil e de metais), AC, EU, EA (marinha e de água doce) AG, TH, DCO, FOF e ET	Levantamento próprio (entrevista com operadores da planta), análises laboratoriais e banco de dados Gabi	Consumo de eletricidade, diesel, emissões para o ar, água e solo, água reciclada e lodo descartado
Rashid e Liu (2020) – Malásia e Reino Unido	Comparação de sistemas: 1º Reator de batelada sequencial + tratamento de lodo 2º Processo Bardenpho + tratamento de lodo + produção de biogás	Operação	1 m ³ e 1kg de PO ₄ ³⁻ eq. removido	CML- IA	EU, DCO, EA (água doce), TH, AG, ER (fóssil) e AC	Levantamento próprio (coleta e medição) e banco Ecoinvent	Consumo de energia e produtos químicos, transporte

Referência - Local	Tipo de ETE	Etapas consideradas	Unidade Funcional	Método de AICV	Categorias de impacto	Fonte de dados	Fluxos considerados
Talang, Sirivithayapakorn e Sucheela (2020)- Tailândia	Cenário 1: estabilização de contato Cenário 2: Lodos ativados com remoção de nutrientes Cenário 3: Lodos ativados cíclico Cenário 4: lodos ativados de dois estágios Cenário 5: Lodos ativados de loop vertical	Operação	1 m ³	Stepwise 2006	AG, EFR (orgânicos e inorgânicos), AC, EU (aquática e terrestre), ER (mineral) e ocupação da natureza	Banco de dados Ecoinvent e calculo pelos métodos do IPCC e USEPA	Eletricidade, transporte, produtos químicos , água, geração e tratamento de lodo, emissões para o ar e água
Mishra <i>et al.</i> (2021)- Índia	Reator de Batelada Sequencial (RBS) com branqueamento	Operação	7.697,37 m ³	CML 2001	ER (fóssil), AC, EU, EA (marinha e de água doce), AG, TH, DCO, FOF, ET	Levantamento próprio (visitas in loco) e banco de dados GaBi	eletricidade, insumos (óleo, graxa, pó descolorante), água, produtos químicos, geração de lodo
Teow <i>et al.</i> (2021) - Malásia	Reator MBBR com ultrafiltração, osmose reversa e filtro de carvão ativado	Operação	6 m ³	ReCiPe 2016	AG, AC (terrestre), TH e EU	Coleta de dados experimentais, literatura e bancos de dados	Consumo de eletricidade, produtos químicos e água de processo, emissões para o ar
Rebello, Gonçalves e Calmon (2021)- Brasil	Reator UASB com lagoa aeróbica de alta taxa + tratamento de lodo + queima de biogás.	Operação	1 m ³	ReCiPe 2008	AG, CE, AC (terrestre), TH, EU (marinha e de água doce), EC (terrestre, marinha e de água doce)	Levantamento próprio e banco de dados Ecoinvent	Energia, produtos químicos, transporte e emissões, recuperação de água (reuso) e energia, e linha de biogás (biossólidos).
Bui <i>et al.</i> (2022) - Vietnã	Flotação por ar dissolvido (FAD) + reator anaeróbico + reator de biofilme com leito móvel (MBBR)	Operação	1 m ³	ReCiPe 2016	AG, DCO, RI, FOF, MP, AC (terrestre), EU (água doce e marinha), EC (terrestre, água doce e marinha), TH (cancerígena e não cancerígena), UT, ER (minerais e fósseis), UA	Dados fornecidos pela empresa, análises laboratoriais e bancos de dados Ecoinvent e EMEP	Energia, materiais, produtos químicos, emissões, transporte

Referência - Local	Tipo de ETE	Etapas consideradas	Unidade Funcional	Método de AICV	Categorias de impacto	Fonte de dados	Fluxos considerados
Chu, Abbassi e Richard (2022) - Canadá	Cenário 1: lagoas aeradas Cenário 2: biorreator de membrana (BRM) Cenário 3: BRM + osmose reversa+ filtração ultravioleta (UV)	Construção e operação	1 m ³	ReCiPe 2016 e TRACI 2.1	AG, AC (terrestre), EU (marinha, de água doce e terrestre), EC (marinha e de água doce), CA, MP, DCO, ER (fósseis)	Levantamento próprio, banco de dados, literatura e estimativas	Consumo de materiais, transporte e geração de resíduos
Daskiran <i>et al.</i> (2022)- Turquia	Reator anaeróbico-anóxico-aeróbico (A2O) com depuração química	Operação	1 m ³	ReCiPe 2016	AG, AC (terrestre), EU (água doce e marinha), EC (terrestre, água doce e marinha), ER (fósseis)	Levantamento próprio (modelagem, entrevista com trabalhadores) e dados da literatura	Consumo de eletricidade, energia térmica e produtos químicos, transporte, emissões para água, ar e solo (geração de lodo e resíduos) tratamento de lodo (incineração)

Fonte: Autor.

AC- Acidificação ,AG- Aquecimento global, CA- Consumo de água, CE- Consumo de eletricidade, CF- Combustíveis fósseis, DCO- Destrução da camada de ozônio, DQO- Demanda química de oxigênio, E- Ecotoxicidade, EA- Ecotoxicidade aquática, EC- Efeitos cancerígenos, EFR- Efeitos respiratórios, ENC – Efeitos não cancerígenos, ER- Escassez de recursos, ES- Ecotoxicidade sedimentar, ET- Ecotoxicidade terrestre, EU- Eutrofização, FOF- Formação de ozônio fotoquímico, MP- Material particulado, RI- Radiação ionizante, TH- Toxicidade humana, UR- Uso de recursos, UT- Uso da terra, TNT- Transformação natural da terra.

5. METODOLOGIA DA PESQUISA

Neste capítulo está apresentado o aspecto metodológico, bem como a descrição de etapas e procedimentos adotados em sua execução. Também é detalhada a operação do estudo de caso, definidos os constituintes e fases da ACV e, a fim de situar o estudo ao estado da arte, determinados os parâmetros de comparação à literatura existente.

5.1. Delineamento da pesquisa

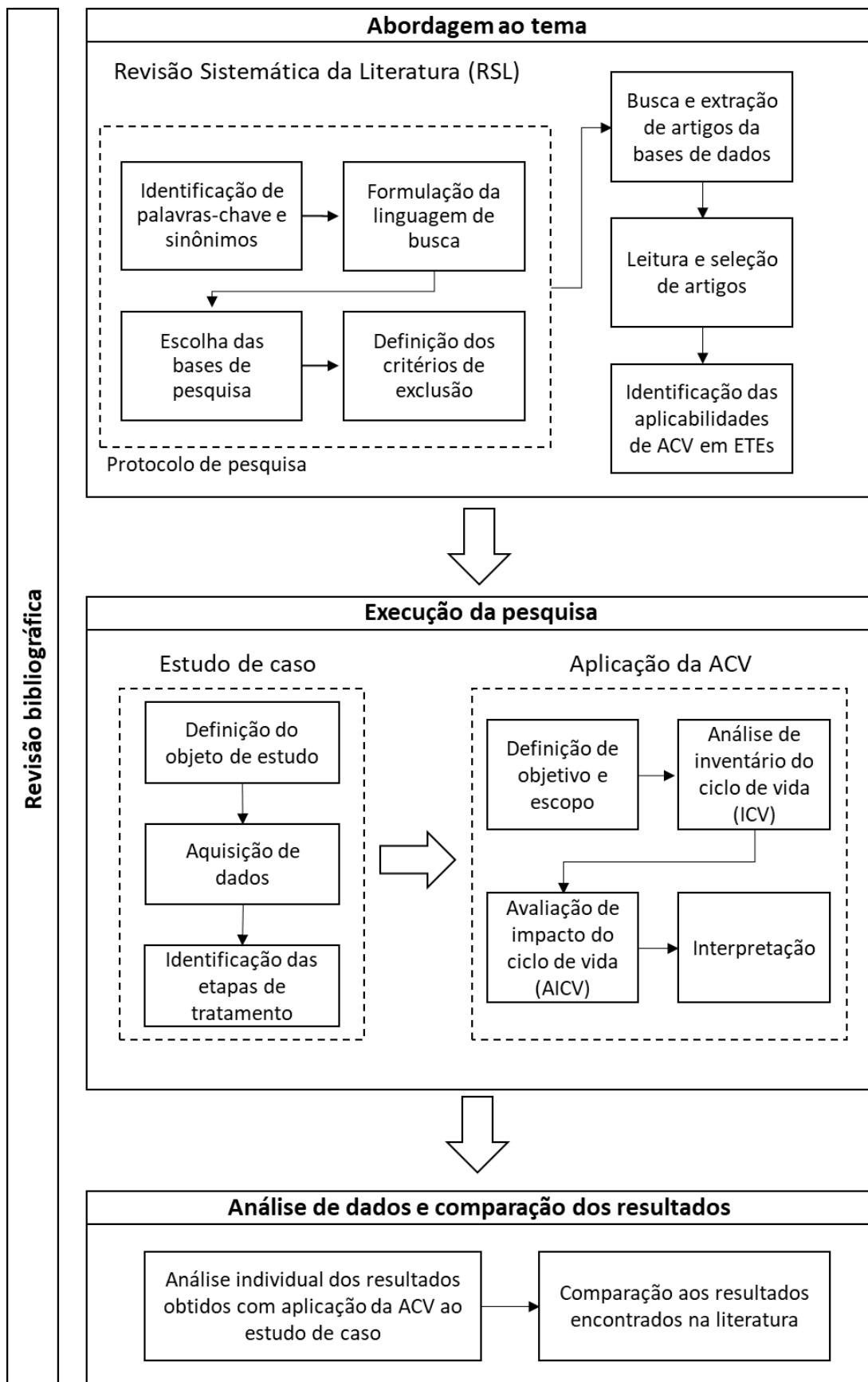
Esta pesquisa possui uma abordagem quantitativa, caracterizando-se quanto sua natureza como aplicada, exploratória quanto aos seus objetivos, com fins explicativos e tendo pesquisa bibliográfica e estudo de caso como estratégias adotadas (KAUARK; MANHÃES; MEDEIROS, 2010; PROVDANOV; FREITAS, 2013; SEVERINO, 2013).

Para realização da pesquisa, é imprescindível que seja desenvolvido o seu delineamento, que representa o planejamento, previsão de análise, coleta e interpretação de dados da pesquisa, considerando o ambiente em que são coletados e as formas de controle das variáveis envolvidas (PROVDANOV; FREITAS, 2013). Sendo fundamental para auxiliar o pesquisador na obtenção de respostas a determinado problema (RAUPP; BEUREN, 2006).

Neste estudo, o delineamento da pesquisa é estabelecido em 3 fases, conforme apresentado na figura 09. A primeira é a abordagem ao tema, voltada para o levantamento e identificação das aplicabilidades da ACV em ETE's, por meio da revisão sistemática da literatura (RSL). A segunda fase consiste no estudo de caso, compreendendo a definição do objeto de estudo e aplicação do método adotado, por fim, a terceira fase refere-se à análise e discussão dos resultados e comparação com estudos encontrados na literatura.

Simultaneamente a todas as fases, foi realizada a revisão bibliográfica, primeiramente abordando as temáticas ACV e ETE isoladamente para entendimento inicial e posteriormente para auxiliar na execução e tomada de decisão durante o desenvolvimento da pesquisa.

Figura 09: Delineamento da pesquisa.



Fonte: Autor.

5.2. Abordagem ao tema

Com o objetivo de mapear na literatura as abordagens sobre ACV aplicada ao tratamento de esgoto, tendo enfoque na fase de operação de uma ETE e nas metodologias de avaliação de impacto utilizadas, foi adotado o método de revisão sistemática da literatura (RSL).

De acordo com Moreira (2019), a RSL estrutura-se em 4 etapas:

(1^a) a definição dos parâmetros por meio do protocolo de pesquisa;

(2^a) a busca e importação das publicações, identificando duplicações e erros, os quais são removidos;

(3^a) a seleção, na qual são identificados os artigos aderentes à revisão por meio da leitura do título e resumo das publicações, bem como dos critérios de inclusão e exclusão (pré-determinados na etapa anterior); e

(4^a) a extração, na qual a publicação é lida integralmente, repete-se o procedimento inclusão/exclusão da etapa anterior e extraem-se dados dos trabalhos que foram incluídos.

Nesse sentido, primeiramente foram identificadas palavras chave e sinônimos mais utilizados em publicações sobre o tema, através de pesquisa inicial.

Em seguida, formaram-se linguagens de busca (*strings*) com os termos encontrados na etapa anterior (quadro 05). Devido sua vasta incorporação na pesquisa, sendo amplamente utilizado em publicações acadêmicas, o inglês foi o idioma adotado para formulação das palavras-chave, estando relacionadas a (1) avaliação do ciclo de vida e (2) estação de tratamento de esgoto. Por fim, para composição das “*strings*” de pesquisa, foram utilizados os operadores booleanos: AND (entre os grupos) e OR (entre os sinônimos de cada grupo).

Quadro 05: Formulação da linguagem de busca da RSL.

Termos de busca (palavras-chave)	
ACV	ETE
life cycle analysis	wastewater treatment system
life cycle assessment	wastewater treatment plant
life cycle inventory	effluent treatment system
	effluent treatment plant
String de pesquisa	
(“life cycle analysis” OR “life cycle assessment” OR “life cycle inventory”) AND (“wastewater treatment system” OR “effluent treatment system” OR ”wastewater treatment plant” OR “effluent treatment plant”)	

Fonte: Autor.

Na etapa de definição das bases de dados para busca de artigos, selecionaram-se 7, sendo: ScienceDirect, Web of Science, Scopus, Springer, Scielo, Engineering Village e Emerald. Os dados obtidos na pesquisa foram compilados e exportados para análise e seleção no software START 3.4 que possibilita a junção e organização dos resultados de busca de diversas bases, identificando automaticamente artigos duplicados e permite a seleção dos mesmos através da leitura de seus principais campos (título e resumo) e classificação como aceitos e rejeitados. Facilitando a seleção de publicações relevantes a pesquisa.

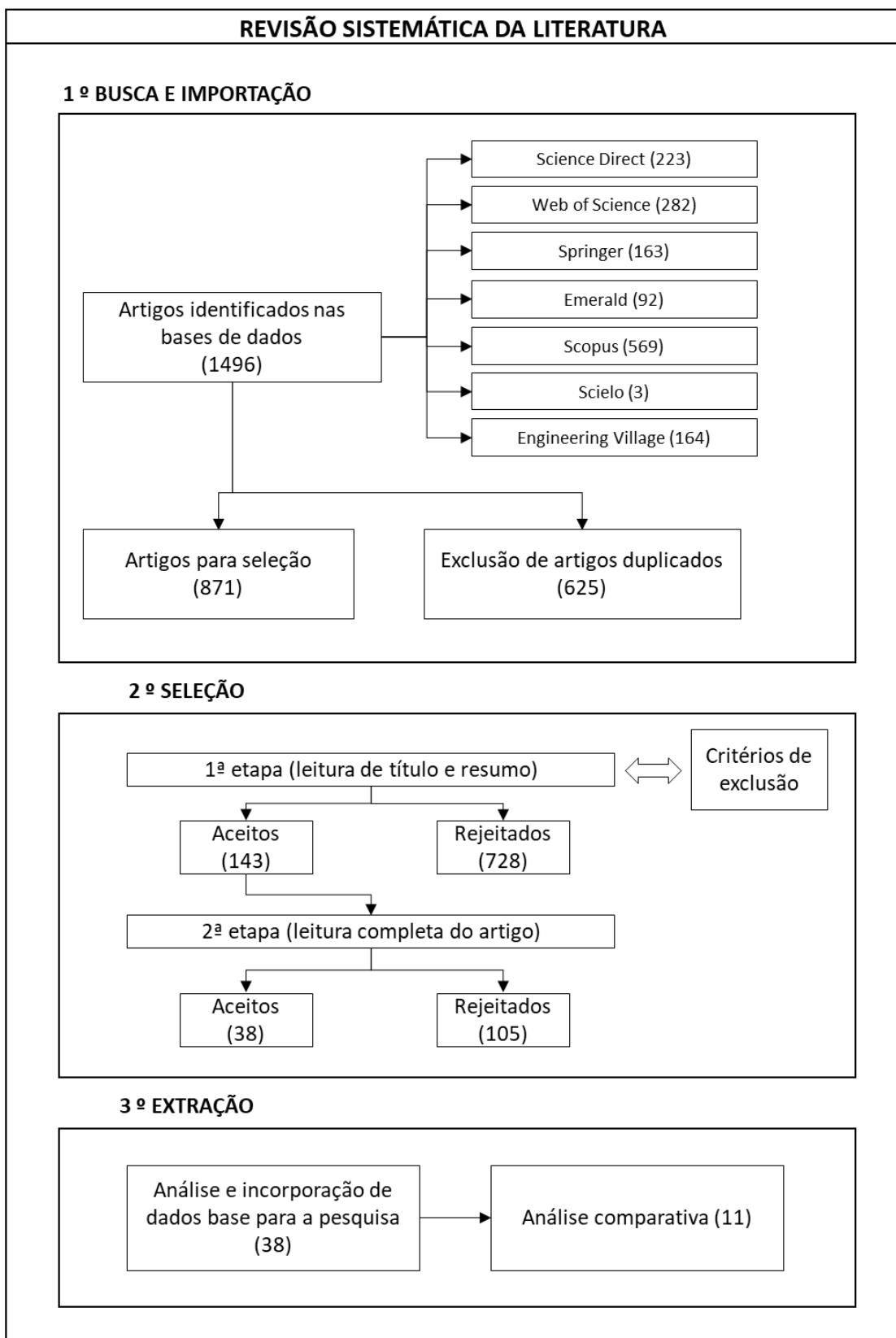
Os critérios de exclusão das publicações seguiram o padrão estabelecido por Moreira (2019), sendo: (a) configurar-se como editoriais, resumos ou chamadas de congressos, conferências ou de periódicos, (b) caracterizar-se como artigo de revisão de literatura, (c) não possuir estação de tratamento de esgoto como seu principal objeto de estudo, (d) não possuir como objetivo realizar ACV, (e) possuir 2 páginas ou menos e (f) ser um trabalho que não estão disponível para o pesquisador (por ser um trabalho antigo, ou de acesso restrito, por exemplo).

Caso a publicação não apresentasse nenhuma destas características abordadas pelos critérios de exclusão, a mesma foi aceita para a próxima etapa que consistiu na leitura completa do artigo, identificando a metodologia utilizada e principais resultados encontrados, estabelecendo nova seleção de artigos e escolha dos definitivos para embasar a pesquisa. Dentre os artigos finais selecionados, foi realizada nova triagem para qualificar estudos a serem incorporados de forma comparativa ao presente estudo.

A seleção dos estudos para análise comparativa teve como premissa o escopo de ACV mais adotado para avaliação de sistemas de tratamento, ou seja, realizou-se a princípio a identificação da unidade funcional e métodos de avaliação de impactos mais utilizados na literatura e a partir de então foram escolhidos os artigos que apresentassem essas características.

O Fluxograma a seguir apresenta a seleção de artigos seguindo esta metodologia:

Figura 10: Etapas da RSL.

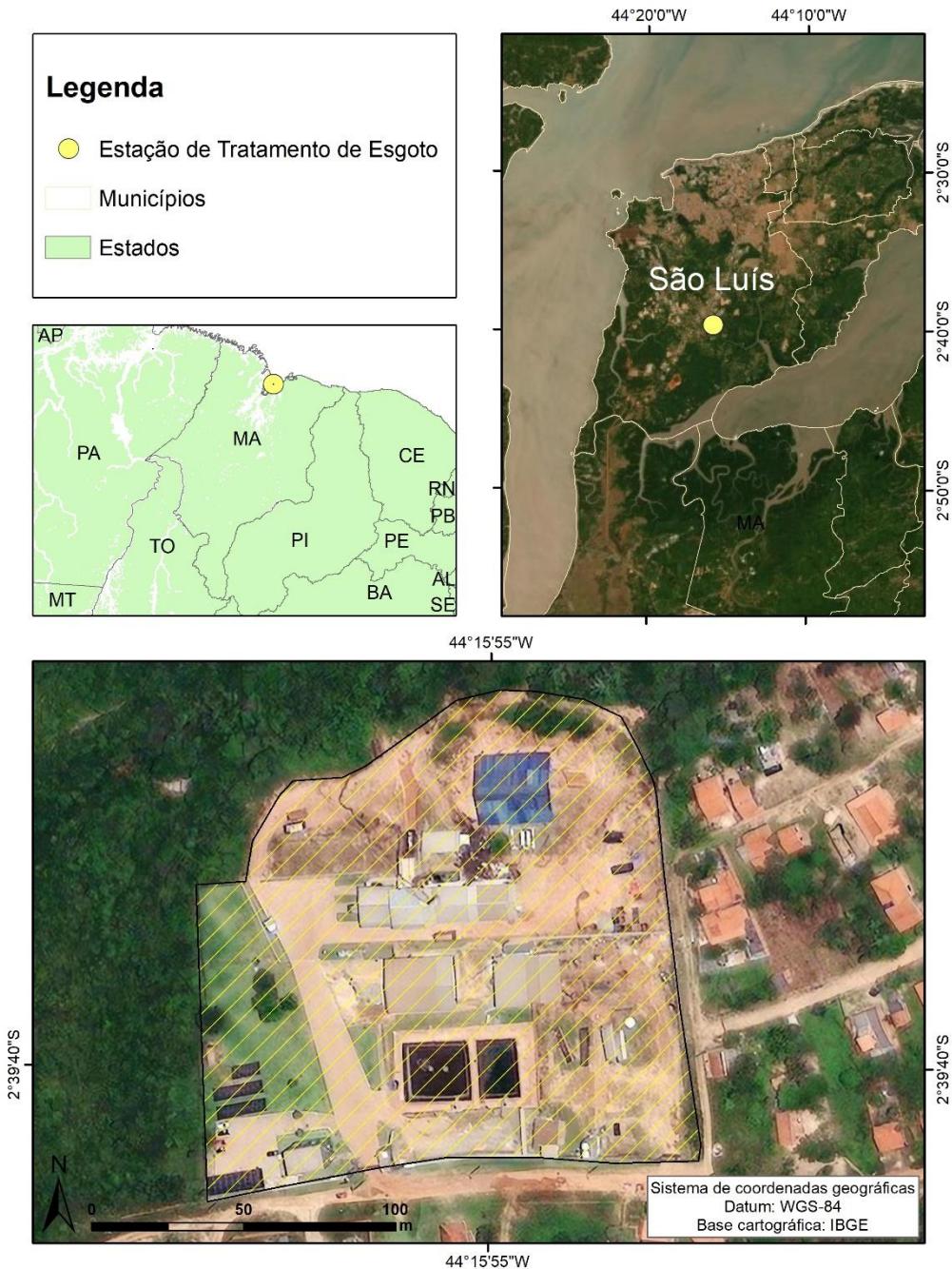


Fonte: Autor.

5.3. Estudo de caso

Como objeto de estudo, foi escolhida uma estação de tratamento de efluentes sanitários e industriais, localizada em São Luís-MA (figura 11). A apropriação dos dados realizou-se através do contato com a empresa responsável pela administração da ETE, que disponibilizou documentos e informações de projeto, permitindo a assimilação e conhecimento do seu processo de operação.

Figura 11: Mapa de localização da ETE.



Fonte: Autor.

A ETE opera com a tecnologia reator de biofilme de leito móvel (MBBR), sendo composta por etapas compreendendo os níveis de tratamento primário, secundário e terciário (figura 12).

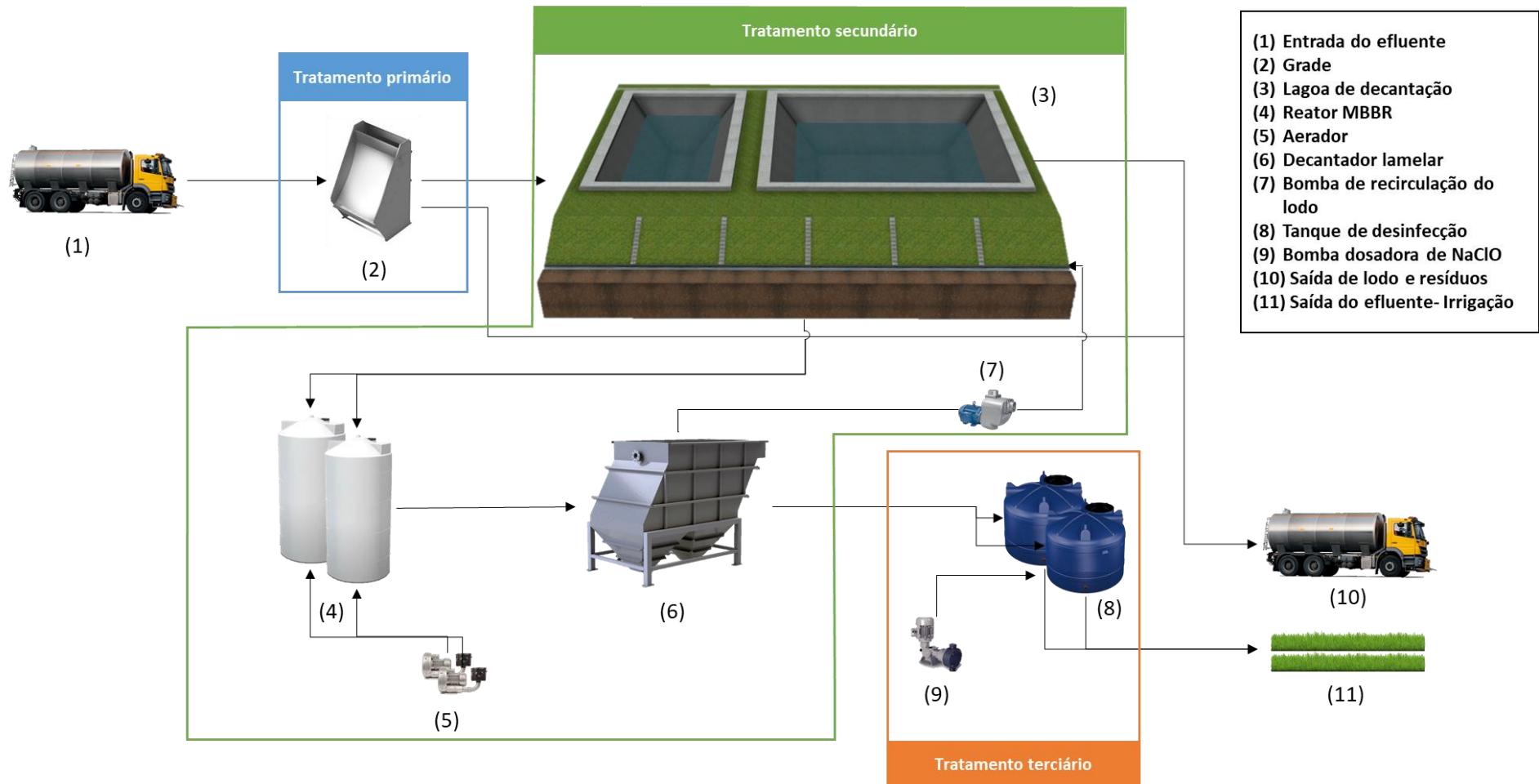
No tratamento primário o processo físico de remoção adotado é o gradeamento. A nível secundário, o sistema é composto por (1) Lagoa de equalização/decantação, onde ocorre simultaneamente os processos de fermentação anaeróbia, oxidação aeróbia e redução fotossintética, sendo também responsável por reter os picos de vazão do efluente ; (2) Reator de biofilme de leito móvel (MBBR) que realiza em maior grau a estabilização de matéria orgânica do efluente, por processo aeróbio e anaeróbio, sendo adotado em duas unidades no sistema, a fim de garantir a nitrificação do efluente no 2º estágio e, (3) Decantador lamelar utilizado para promover a clarificação, onde os sólidos em suspensão decantam pela ação da gravidade.

Por fim, o tratamento terciário é realizado mediante desinfecção do efluente pela dosagem de compostos químicos (hipoclorito de sódio-NaClO) em tanque, visando eliminação microrganismos patogênicos remanescentes. A estação ainda é composta de sopradores de ar para o sistema aeróbio e bombas dosadoras.

O sistema de tratamento foi dimensionado para atender uma vazão de 200 m³ de águas residuais por dia (com remoção de DBO entre 90 e 95%), sendo coletados através de caminhões hidrovácuo.

As águas residuais tratadas na ETE consistem em esgotos oriundos principalmente de dependências sanitárias de instituições e de processos industriais das empresas atendidas. Após passar por todos os processos de tratamento, o efluente é destinado ao sistema de irrigação das áreas verdes adjacentes à estação de tratamento e os resíduos sólidos gerados têm sua disposição final em aterro sanitário.

Figura 12: Etapas do sistema de tratamento.



Fonte: Autor.

5.4. Avaliação do Ciclo de Vida

A metodologia escolhida para avaliação do processo de operação da ETE foi a ACV por apresentar uma estrutura de análise holística dos impactos ambientais de processos ou produtos, sendo uma metodologia importante para gestão ambiental (GUINÉE *et al.*, 2011; LOFGREN; TILLMAN; RINDE, 2011), sendo estruturada da seguinte forma, nesta pesquisa:

1^a Definição de objetivo e escopo:

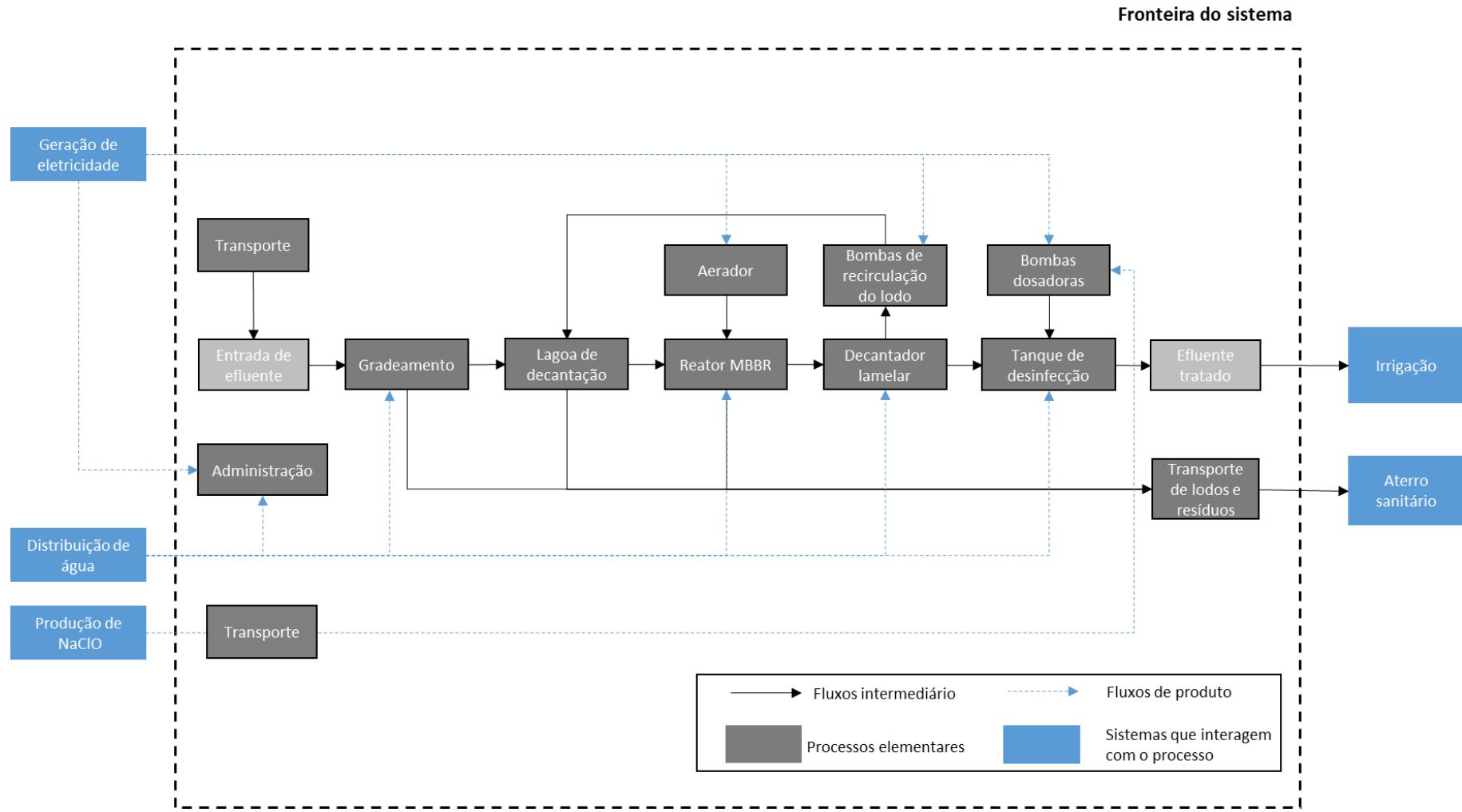
O objetivo da ACV foi avaliar o desempenho ambiental de uma estação de tratamento de efluentes através de dois métodos de AICV de modo a identificar os seus pontos críticos.

O escopo abrange a fase de operação da ETE em questão. Para o levantamento de informações relacionadas ao processo, foram analisados documentos e dados de monitoramento disponibilizados pela empresa responsável e, considerados dados provenientes da base Ecoinvent 3.0.

De forma a permitir estabelecer comparações com outros estudos, a unidade funcional adotada foi 1 m³ (metro cúbico) de efluente tratado, visto que se trata de uma unidade encontrada em diversos de estudos de mesma abordagem, conforme os resultados da RSL realizada no presente estudo.

O sistema e seus limites estão representados de forma geral na figura 13. A abordagem utilizada no estudo foi a de “portão ao portão” (*gate-to-gate*), visto que foram analisados os potenciais impactos ambientais gerados apenas durante a fase de operação da ETE. O limite do sistema compreende os fluxos de materiais e processos necessários para a fase de operação da ETE.

Figura 13: Limites do sistema com base na NBR ISO 14.040.



Fonte: Autor.

2^a Análise de inventário do ciclo de vida (ICV):

Nesta etapa foram identificados os fluxos considerados no sistema em questão (quadro 06). Os itens que compõem o inventário do ciclo de vida da operação da estação de tratamento são:

- Eletricidade: O consumo energético durante a operação ocorre em equipamentos como bombas, aeradores e em menor quantidade nas funções administrativas. As informações relacionadas a esta entrada no processo foram provenientes de dados disponibilizados pela empresa administradora da ETE. Conforme memorial descritivo, a planta opera com 380 V, classificando- se como consumo em baixa voltagem (ANEEL, 2015). Dessa forma, considerando sua localização e classificação de consumo, o módulo de inventário adotado para representação desta entrada foi “*Electricity, low voltage {BR-North-eastern grid}/ market for electricity, low voltage | APOS, U*”; Este conjunto de dados representa transmissão de 1 kWh de eletricidade disponível no nível de baixa tensão no Brasil, rede do Nordeste.
- Transporte: Os dados desta entrada foram obtidos através de estimativas e cálculos, visto que a empresa forneceu informações da frota de caminhões utilizadas (ano, modelo e marca), periodicidade mensal de coleta e destinação, bem como a localização das empresas atendidas, fornecedores de insumos e do aterro de disposição final.

Os caminhões utilizados são dos anos de 2013 e 2014, compreendendo a fase P7 do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores- PROCONVE (BRASIL, 2018), correspondente ao padrão de emissões europeu “Euro 5”, sendo também divididos em médios e semipesados. Dessa forma, para representação foram adotados os módulos:

- Médio: *Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro5 {RoW}| market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | APOS, U.*
- Semipesado: *Transport, freight, lorry >32 metric ton, euro5 {RoW}| market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 | APOS, U.*

Estes módulos representam o transporte de 1 tonelada métrica em uma distância de 1 km na geografia global, considerando apenas o transporte de produtos através de veículos movidos a diesel.

Para determinação do tkm, as rotas e distâncias percorridas foram extraídas do software Google Earth Pro versão 7.3.4., bem como, foi estimada a carga transportada em cada percurso através da divisão entre a quantidade total de efluente tratado por mês na ETE e rotas mensais realizadas.

Em um dos trechos de coleta há necessidade de travessia em balsa (anexo 2), sendo assim, considerou-se também para este percurso o módulo “*Transport, freight, inland waterways, barge {GLO}/ market group for transport, freight, inland waterways, barge / APOS, U*” que representa o transporte por barcaça de 1 tonelada métrica em uma distância de 1 km em vias navegáveis interiores, na geografia global. Este serviço considera apenas o transporte de produtos em veículo de funcionamento a diesel.

- Produtos químicos: No processo de tratamento é utilizado apenas um produto, sendo o hipoclorito de sódio (NaClO), durante a etapa de desinfecção do efluente (tratamento terciário) para eliminação dos microrganismos, principalmente patogênicos. As informações relacionadas a esta entrada no processo analisado foram provenientes de dados disponibilizados pela empresa administradora da ETE. Para representar a entrada deste insumo, o módulo “*Sodium hypochlorite, without water, in 15% solution state {RoW}/ market for sodium hypochlorite, without water, in 15% solution state | APOS, U*” foi considerado, visto ser o único disponível no Ecoinvent. Este conjunto de dados representa o fornecimento de 1 kg de hipoclorito de sódio, sem água, em estado de solução de 15% das atividades que o produzem dentro da geografia deste conjunto de dados.
- Água: A entrada desse insumo no sistema tem dois principais destinos, uso na área administrativa e no processo de tratamento para eventuais manutenções e limpezas no sistema. As informações relacionadas a esta entrada no processo analisado foram provenientes de dados disponibilizados pela empresa administradora da ETE. A fonte de consumo é através do fornecimento pela concessionária de água da região, dessa forma, adotou-se como módulo “*Tap*

water {BR}| market for tap water | APOS, U” que representa o abastecimento de 1 kg de água ao consumidor (industrial ou doméstico), incluindo a rede de distribuição e perdas de água durante a transmissão.

A amplitude temporal das informações disponibilizadas pela empresa foi de 24 meses de operação, compreendendo o período de janeiro de 2020 a dezembro de 2021, os dados obtidos constam na tabela 01.

Tabela 01: Dados fornecidos pela empresa.

Mês	Volume de esgoto tratado (m ³)	Consumo de hipoclorito (kg)	Consumo de energia na ETE (kWh)	Consumo de água (m ³)
janeiro/20	870	360	1569	3,1
fevereiro/20	680	240	1500	3,3
março/20	1010	360	1385	2,9
abril/20	1235	420	1337	3,7
maio/20	1210	360	1594	3,4
junho/20	1536	480	1516	4,1
julho/20	1654	480	1951	3,6
agosto/20	1190	360	1891	2,5
setembro/20	1080	360	2097	2,8
outubro/20	1326	420	2184	3,5
novembro/20	1690	480	2013	3,8
dezembro/20	1950	540	2230	3,6
janeiro/21	2690	660	1548	4,2
fevereiro/21	2760	660	1848	4,8
março/21	1405	480	1899	4,1
abril/21	1287	360	2050	2,7
maio/21	1140,5	360	2431	2,9
junho/21	1698	480	3933	4,5
julho/21	1085	360	2295	3
agosto/21	1005	360	2549	2,8
setembro/21	1140	360	3845	2,9
outubro/21	1240	360	4643	3,2
novembro/21	1470	420	3348	3,9
dezembro/21	1325	420	3596	4,2

Fonte: Autor.

Para correlação à unidade funcional (1m^3), os dados totais de eletricidade, produtos químicos e água foram divididos pelo volume total de esgoto tratado no mesmo período (equação 1) e os dados de transporte submetido às equações 02 e 03, onde a distância mensal percorrida em cada trecho (anexo 02) e as cargas transportadas foram multiplicadas, obtendo-se a unidade de transporte que foi multiplicada pelo período de coleta de dados (em meses) e dividida pelo volume de esgoto tratado no mesmo período.

$$Q = \frac{Qt}{Vt} \quad (\text{equação 01})$$

Sendo:

Q = Quantidade por m^3

Qt = Quantidade total

Vt = Volume total de esgoto tratado (m^3)

$$UT = D \times CT \quad (\text{equação 02})$$

Sendo:

UT : Unidade de transporte (tkm);

D : distância (km);

CT : carga transportada (ton);

$$Q = \frac{UT \times 24}{Vt} \quad (\text{equação 03})$$

Sendo:

Q = Quantidade por m^3

UT : Unidade de transporte (tkm);

Vt = Volume total de esgoto tratado (m^3)

Quadro 06: Fluxos considerados no estudo.

Entrada	Unidade	Quantidade por m³	Fonte	Módulo do Ecoinvent
Eletricidade	kWh	1,64	Secundária*	Electricity, low voltage {BR-North-eastern grid} market for electricity, low voltage APOS, U
Transporte	Caminhão-Porte médio	tkm	8,85	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro5 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 APOS, U
	Caminhão-Porte semi pesado	tkm	13,37	Transport, freight, lorry >32 metric ton, euro5 {RoW} market for transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 APOS, U
	Balsa	tkm	0,161	Transport, freight, inland waterways, barge {GLO} market group for transport, freight, inland waterways, barge APOS, U
Produtos químicos	Hipoclorito de sódio (NaClO)	kg	0,3	Sodium hypochlorite, without water, in 15% solution state {RoW} market for sodium hypochlorite, without water, in 15% solution state APOS, U
Água	kg	2,48	Secundária*	Tap water {BR} market for tap water APOS, U

* dados coletados na empresa e com emissões calculadas utilizando processos do Ecoinvent.

** dados coletados na empresa e estimados, com emissões calculadas utilizando processos do Ecoinvent.

Fonte: Autor.

3^a Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV):

De posse dos dados do sistema inventariados, estes foram submetidos a análise por meio da aplicação dos métodos de AICV com o objetivo de contabilizar os impactos ambientais associados. Para isso, os dados foram processados com a utilização do software SimaPro 9.1.1., o qual já realiza a classificação e caracterização dos dados.

Para isso, foram escolhidos os métodos ReCiPe midpoint (H) versão 2016 e CML versão 2001, por serem os mais utilizados em estudos de ACV aplicados em ETEs de acordo com achados da revisão sistemática da literatura. As categorias de impacto adotadas para cada método são apresentadas em detalhe no quadro 07.

Quadro 07: Métodos e categorias de avaliação de impacto.

ReCiPe		CML	
Aquecimento global (AG)	kg CO ₂ eq	Aquecimento global (AG) ¹	kg CO ₂ eq
Acidificação terrestre (AC.T)	kg SO ₂ eq	Acidificação (AC)	kg SO ₂ eq
Radiação ionizante (RI)	kBq Co-60 eq	Radiação ionizante (RI) ¹	DALYs
Ecotoxicidade terrestre (EC.T)	kg 1,4-DCB eq	Ecotoxicidade terrestre (EC.T)	kg 1,4- DB eq
Ecotoxicidade marinha (EC.M)	kg 1,4-DCB eq	Ecotoxicidade marinha (EC.M)	kg 1,4- DB eq
Ecotoxicidade de água doce (EC.AD)	kg 1,4-DCB eq	Ecotoxicidade de água doce (EC.AD)	kg 1,4- DB eq
Destruição da camada de ozônio (DCO)	kg CFC- 11 eq	Destruição da camada de ozônio (DCO) ¹	kg CFC- 11 eq
Uso da terra (UT)	m ² a crop eq	Uso da terra (UT)	m ² a
Formação de ozônio (FO)	kg NO _x eq	Oxidação fotoquímica (OF)	kg C ₂ H ₄ eq
Escassez de recursos minerais (ERM)	kg Cu eq	Depleção abiótica (DA)	kg Sb eq
Escassez de recursos fósseis (ERF)	kg oil eq	Toxicidade humana (TH) ¹	kg 1,4- DCB eq
Toxicidade humana cancerígena (THC)	kg 1,4-DCB eq	Eutrofização (EU)	kg PO ₄ ---eq
Toxicidade humana não cancerígena (THNC)	kg 1,4-DCB eq		
Consumo de água (CA)	m ³		
Formação de partículas finas (FPF)	kg PM 2.5 eq		
Eutrofização de água doce (EU.AD)	kg P eq		
Eutrofização marinha (EU.M)	kg N eq		

Fonte: (IES, 2016; NIPHE, 2017).

¹ Para comparação, a unidade temporal adotada nestas categorias foi de 100 anos, visto que o ReCiPe considera esse período.

Como critério de seleção dos métodos, também considerou-se a abrangência de aplicação global, visto que o Brasil ainda não possui um método de AICV específico.

4^a Interpretação:

Nesta etapa foi realizada a análise dos resultados obtidos nas fases de ICV e AICV, possibilitando a identificação de informações relevantes sobre o sistema de produto analisado, além de verificar a correlação de cada componente com as categorias de impacto ambiental consideradas.

De acordo com a NBR ISO 14.044 (ABNT, 2009b), a análise deve ser seguida de verificação dos dados que tem o intuito de estabelecer e aumentar o grau de certeza e confiabilidade dos resultados obtidos.

Nesse sentido, foi realizada a análise de qualidade através da avaliação pela matriz Pedigree (WEIDEMA, 1998) durante a etapa de interpretação. A tabela 01 apresenta os dados associados à sua classificação de qualidade.

Tabela 02: Representação da qualidade dos dados ponderados.

Indicador	Confiabilidade	Integridade	Correlação temporal	Correlação geográfica	Correlação tecnológica adicional
Eletricidade	2	1	1	1	1
Produto químico	2	1	1	1	1
Água	2	1	1	1	1
Transporte	2	4	1	1	1

Fonte: Autor.

Para o indicador confiabilidade, a pontuação atribuída às informações dos parâmetros foi 2, pois, adotaram-se os dados fornecidos pela empresa, sem verificação dos mesmo por medição.

Quanto à integridade, a pontuação foi 1 os dados de eletricidade, produtos químicos e água, visto que as incluíam informações suficientes para o período analisado. Entretanto, nesse indicador o transporte foi classificado com valor 4, pois, os dados repassados pela empresa tinham abrangência temporal para um mês, sendo necessário cálculo de extrapolação para dois anos, que foi o período de análise do estudo, não possuindo, dessa forma, boa representatividade estatística.

Em relação à correlação temporal, geográfica e tecnológica, foi atribuída pontuação 1 a todos parâmetros, visto que, os dados foram obtidos por levantamento recente, diretamente da empresa, sendo e representativos da região e dos processos em estudo.

6. RESULTADOS

Neste capítulo estão expostos os resultados obtidos pela presente pesquisa, sendo estruturado da seguinte forma para melhor apresentação das informações: (1) Resultados do estudo de caso, compreendendo os achados individuais obtidos com a aplicação de cada método de AICV; (2) Comparação com resultados obtidos por demais trabalhos que utilizaram o mesmo escopo de ACV para avaliação de ETES, dissociando-os entre estudos com análise de mesma tecnologia de tratamento avaliada na presente pesquisa (MBBR) e estudos que abordaram outras tecnologias no geral.

6.1. Análise do estudo de caso

Cabe ressaltar que a companhia de tratamento opera em atendimento a empresas locais, encarregando-se da logística necessária para transporte dos efluentes, insumos e resíduos, utilizando caminhões hidrovácuo para essa finalidade.

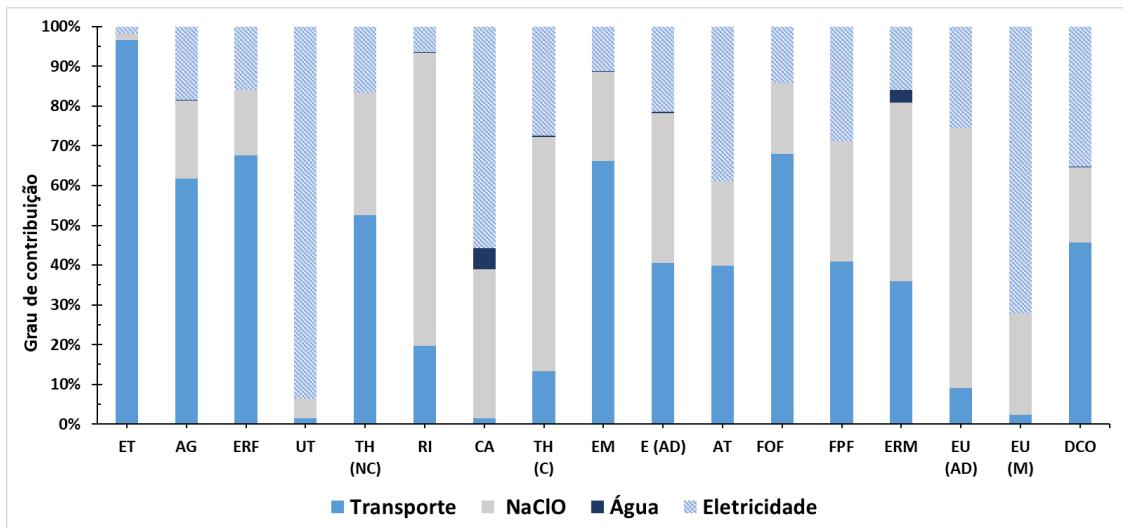
6.1.1. Método ReCiPe

De forma geral, os resultados obtidos através da utilização do método ReCiPe, (figura 14), demonstraram que dentre os fluxos considerados, o transporte foi o fator de maior peso nos impactos ambientais da etapa de operação da ETE em 7 das 18 categorias. Por outro lado, o consumo de água foi a causa que menos impactou em todas as categorias, sem exceção. Sendo, transporte > consumo de NaClO > eletricidade > consumo de água, a ordem de contribuição de impacto ao meio ambiente.

Avaliando-se de forma mais detalhada a influência dos processos em cada categoria, o transporte contribuiu em 96,5% para ecotoxicidade terrestre e em torno de 60% à 70% para aquecimento global, escassez de recursos fósseis, toxicidade humana (não cancerígena), ecotoxicidade marinha e formação de ozônio; o consumo de eletricidade influenciou em 93,5% no uso da terra e em 72% na eutrofização marinha; o consumo de NaClO em 74%, 65% e 59%, nas categorias radiação ionizante, eutrofização de água doce e toxicidade humana (cancerígena), respectivamente, enquanto que a contribuição do uso da água foi inferior a 1% na maioria das categorias de impacto, com exceção para escassez de recursos minerais (3,2%) e uso da água (5,4%).

Para as categorias ecotoxicidade de água doce, formação de partículas finas e escassez de recursos minerais, o transporte e consumo de NaClO apresentaram padrão de contribuição semelhante, sendo em torno de 30 % a 45%. Já para acidificação terrestre e destruição do ozônio estratosférico, a contribuição do transporte assemelhou-se a do consumo de eletricidade, com enfoque para acidificação terrestre com apenas 1% de diferença.

Figura 14: Resultados da avaliação de impacto através do método ReCiPe.



ET- ecotoxicidade terrestre, AG- aquecimento global, ERF- escassez de recursos fósseis, UT- uso da terra, TH (NC) toxicidade humana (não cancerígena), RI- radiação ionizante, CA- consumo de água, TH (C) -toxicidade humana (cancerígena), EM- ecotoxicidade marinha, , E(AD)- ecotoxicidade de água doce, AT-acidificação terrestre, FOF-formação de ozônio fotoquímico, PPF-formação de partículas finas, ERM- escassez de recursos minerais, EU (AD)-eutrofização (água doce), EU (M)- eutrofização marinha, DCO-estruição da camada de ozônio.

6.1.2. Método CML

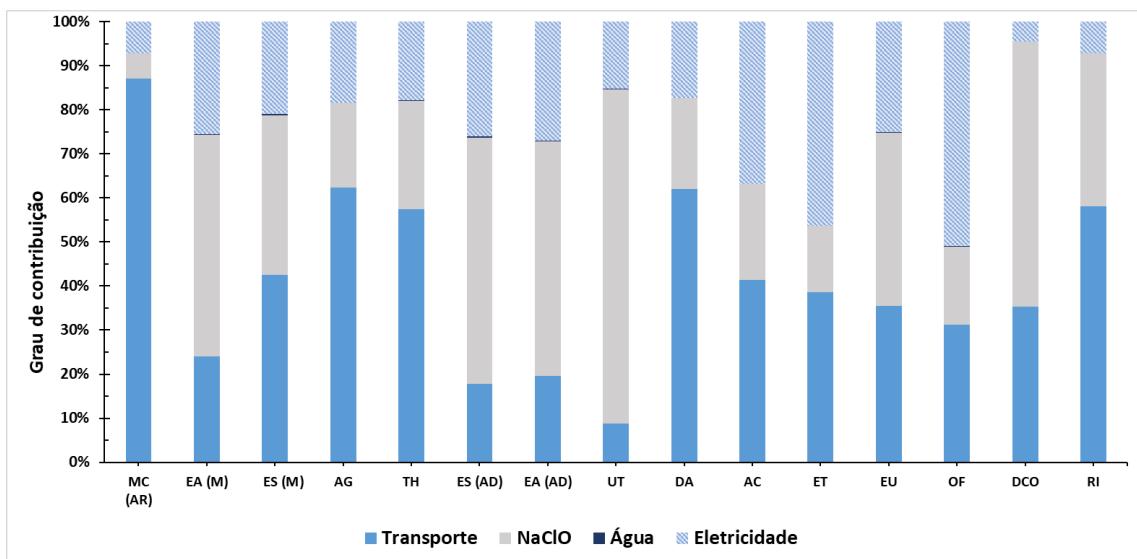
A avaliação de impacto através do método CML (figura 15) indicou o mesmo padrão em relação aos resultados obtidos com o ReCiPe, quando analisado de forma geral, possuindo maior peso o transporte adotado no processo e menor o consumo de água. Seguindo o mesmo comportamento de contribuição: transporte > consumo de NaClO > eletricidade > água.

Quanto análise mais profunda dos dados, o transporte contribuiu com 87% do total de impacto da ETE para categoria de mau cheiro do ar, 62% para as categorias de aquecimento global e depleção abiótica, 58% em radiação ionizante e 57% para toxicidade humana; o consumo de NaClO 76% para uso da terra, 60% para destruição da camada de ozônio, 53% e 56% para ecotoxicidade de água doce (aquática e sedimentar,

respectivamente); consumo de eletricidade 51% para oxidação fotoquímica e 46% para ecotoxicidade terrestre e consumo de água inferior a 0,35% para todas as categorias.

Os processos de transporte e consumo de NaClO apresentaram influência semelhante para ecotoxicidade marinha (sedimentar e aquática) e eutrofização com diferenças de no máximo 7%. Na categoria de acidificação, as semelhanças de contribuição foram encontradas para transporte e consumo de eletricidade com diferença de apenas 5%.

Figura 15: Resultados da avaliação de impacto através do método CML.

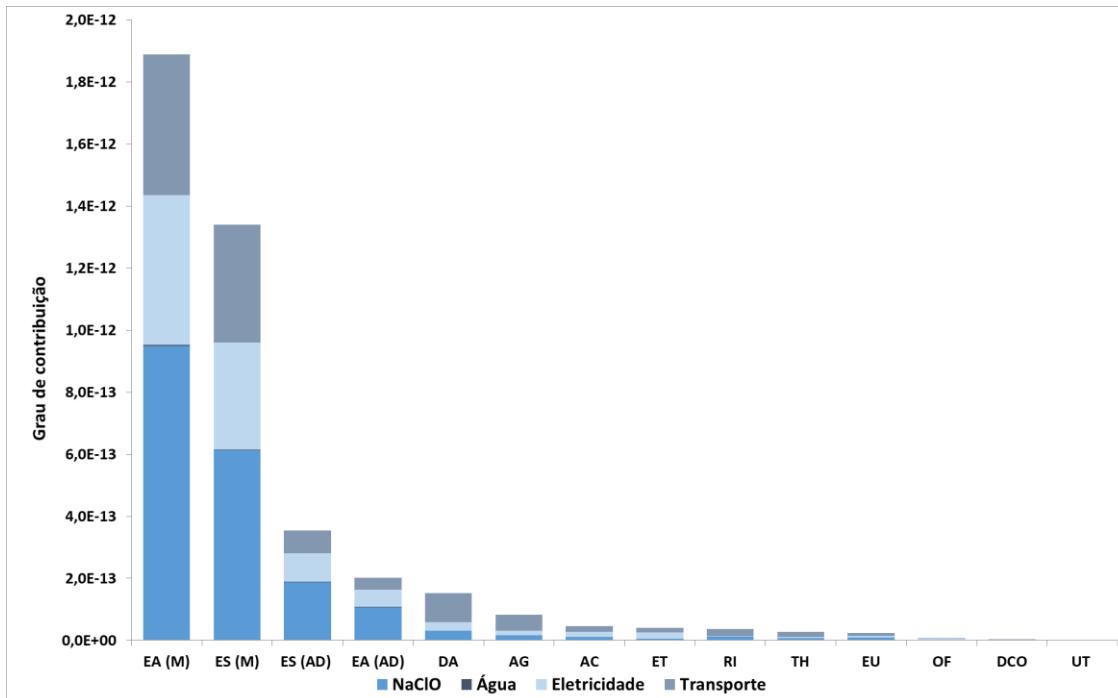


MC (AR)- Mau cheiro do ar, EA (M)- ecotoxicidade aquática marinha, ES (M)- ecotoxicidade sedimentar marinha, AG- aquecimento global, TH- toxicidade humana, ES (AD)- ecotoxicidade sedimentar de água doce, EA (AD)- ecotoxicidade aquática de água doce, UT- uso da terra, DA- depleção abiótica, AC- acidificação, ET- ecotoxicidade terrestre, EU- eutrofização, OF- oxidação fotoquímica, DCO- destruição da camada de ozônio, RI- radiação ionizante.

6.1.3. Normalização

Para melhor compreender a magnitude de impacto da etapa de operação da ETE em estudo, identificando seus principais efeitos/consequências ao meio ambiente, foi realizada a normalização dos resultados obtidos em cada método, sendo apresentados nas Figuras 16 e 17.

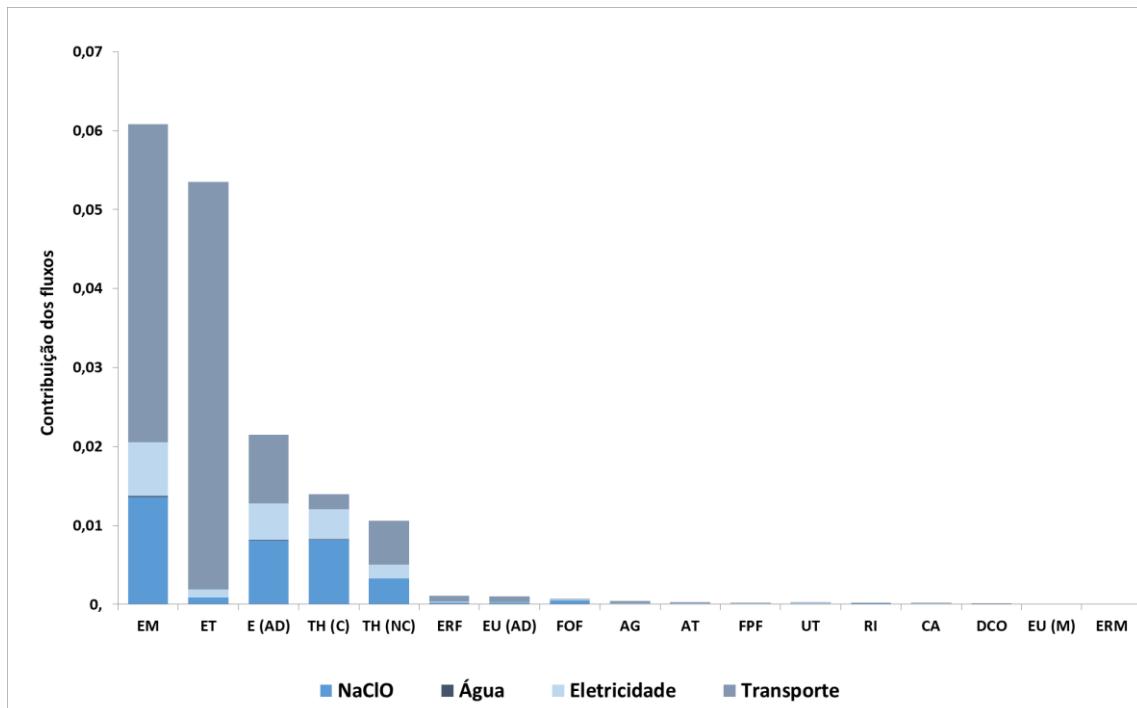
Figura 16: Resultados normalizados (CML).



EA (M)- ecotoxicidade aquática marinha, ES (M)- ecotoxicidade sedimentar marinha, ES (AD)- ecotoxicidade sedimentar de água doce, EA (AD)- ecotoxicidade aquática de água doce, DA- depleção abiótica, AG- aquecimento global, AC- acidificação, ET- ecotoxicidade terrestre, RI- radiação ionizante, TH- toxicidade humana, EU- eutrofização, OF- oxidação fotoquímica, DCO- destruição da camada de ozônio, UT- uso da terra.

Nos resultados do método CML, a categoria de impacto mau cheiro do ar não está apresentada, pois não havia fator de normalização, não sendo calculada pelo software SimaPro.

Figura 17: Resultados normalizados (ReCiPe).



EM- ecotoxicidade marinha, ET- ecotoxicidade terrestre, E(AD)- ecotoxicidade de água doce, TH (C) -toxicidade humana (cancerígena), TH (NC) toxicidade humana (não cancerígena), ERF- escassez de recursos fósseis, EU (AD)- eutrofização (água doce), FOF-formação de ozônio fotoquímico, AG- aquecimento global, AT-acidificação terrestre, FPF-formação de partículas finas, UT- uso da terra, RI- radiação ionizante, CA- consumo de água, DCO- destruição da camada de ozônio, EU (M)- eutrofização marinha, ERM- escassez de recursos minerais.

Há concordância entre os métodos de AICV de que os impactos ambientais do processo interferem principalmente na ecotoxicidade marinha. Entretanto, para as demais categorias, com enfoque para ecotoxicidade terrestre, os métodos diferiram nos resultados. Os dados normalizados indicam que a estação de tratamento apresentou alta interferência nessa categoria quando analisada pelo ReCiPe, enquanto foi baixa na análise através do CML.

Além disso, no método CML, a principal causa dos impactos gerados pela ETE está no uso de hipoclorito de sódio (NaClO) durante o processo de desinfecção, já no ReCiPe observa-se que além do consumo de NaClO, o transporte assume alta influência nos impactos gerados. Essas divergências se justificam pela abordagem de cada método, que dissociam quanto a análises, cálculos e substâncias consideradas.

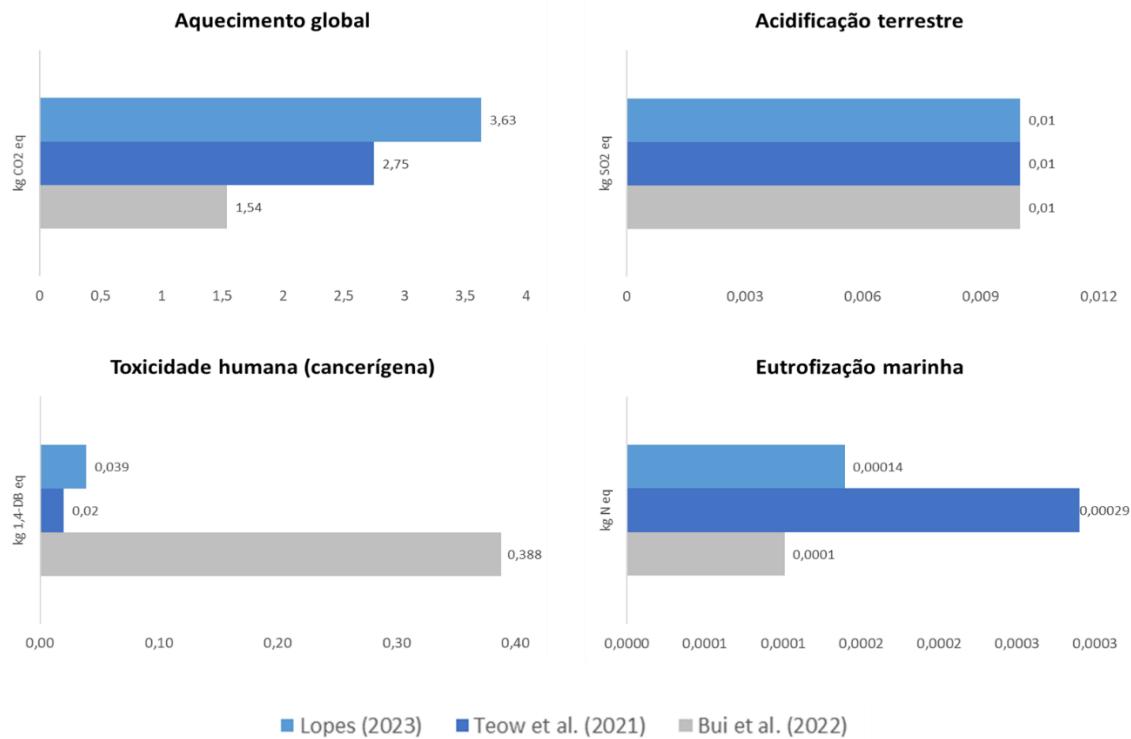
6.2. Análise comparativa

6.2.1. Estudos com avaliação de mesma tecnologia (MBBR)

6.2.1.1. Método Recipe

Teow *et al.* (2021) e Bui *et al.* (2022) foram os estudos identificados na literatura que avaliaram tecnologia de tratamento de esgoto semelhante à da presente pesquisa através do método ReCiPe. As figuras 18 e 19 exibem a comparação dos resultados obtidos. Teow *et al.* (2021), considerou apenas 4 categorias de impacto em sua avaliação, desse modo, foram apresentadas apenas na figura 18.

Figura 18: Comparação entre os resultados de Lopes (2023), Teow *et al.* (2021) e Bui *et al.* (2022).



Pode-se observar que os três estudos obtiveram o mesmo valor para acidificação terrestre. Em relação à categoria de eutrofização marinha, Bui *et al.* (2022) apresentou resultados semelhantes ao do presente estudo, enquanto que Teow *et al.* (2021) assemelhou-se na categoria toxicidade humana (não cancerígena).

O valor mais elevado, obtido em Teow *et al.* (2021) para eutrofização marinha, tem como principal causa o consumo de eletricidade no tratamento. De acordo com o

autor, a matriz energética da Malásia é composta pela queima de combustíveis fósseis, o que está associada a alta emissão de óxidos nitrogênio.

Quanto ao resultado de toxicidade humana cancerígena encontrada em Bui *et al.* (2021), que foi em torno de 10 vezes superior aos demais estudos, decorre da inclusão da tecnologia de flotação por ar dissolvido (FAD) no processo. Segundo o autor, este item responde por uma proporção relativamente grande de fatores que afetam o meio ambiente na ETE, principalmente pela utilização de produtos químicos, com enfoque ao cloreto de polialumínio por dispor de altas emissões em sua produção.

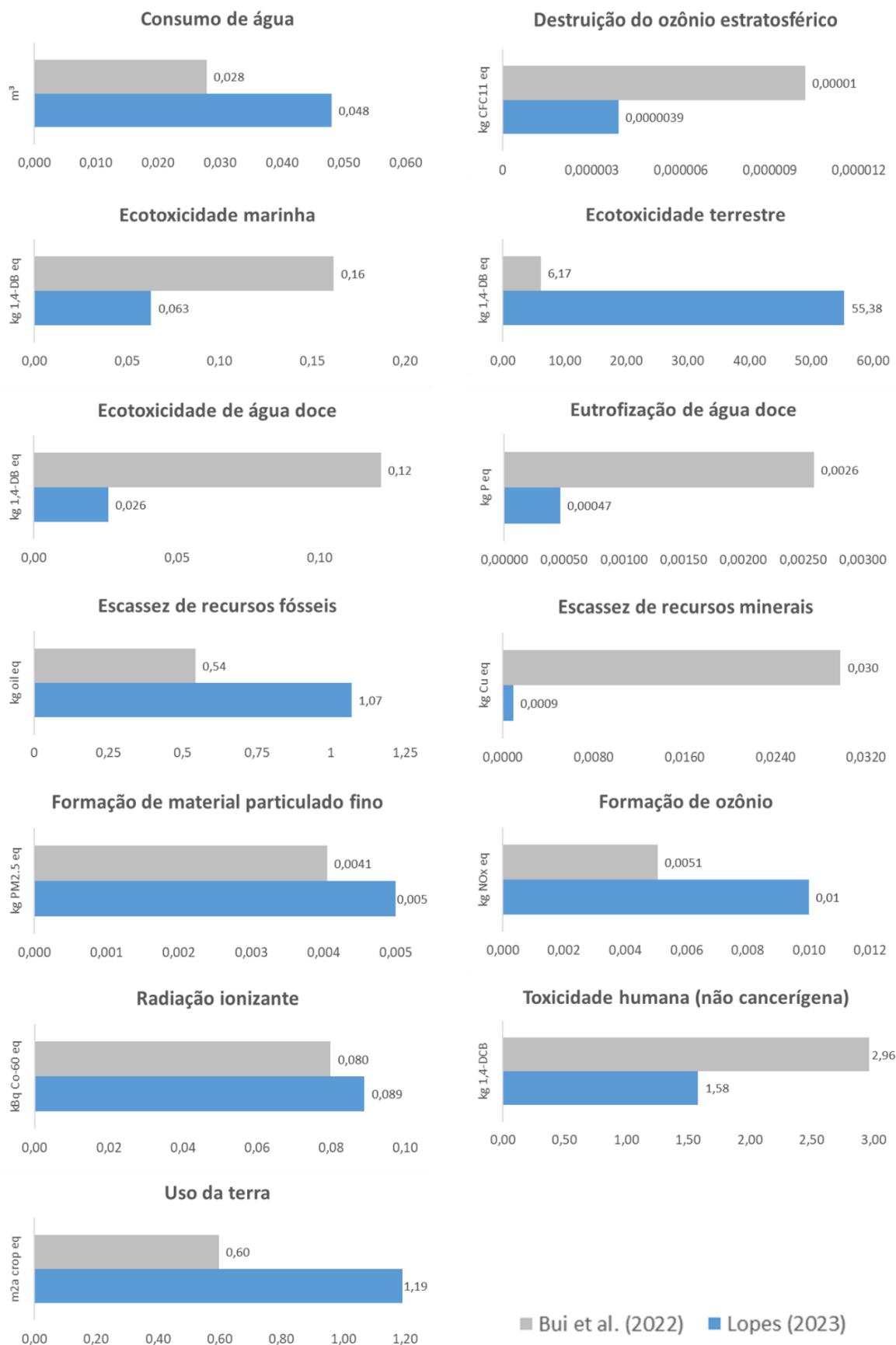
Para a categoria de aquecimento global o sistema avaliado no presente trabalho obteve maiores valores. Este resultado associa-se ao transporte de efluente realizado por caminhão tanque, visto que, o consumo e a queima de diesel é inerente a esse processo, estando estreitamente associado a emissão de gases do efeito estufa.

Dentre as demais categorias comparadas apenas com Bui *et al* (2022), apresentadas na figura 19, radiação ionizante e formação de material particulado apresentaram valores semelhantes em ambos os estudos.

Bui et al (2022) obteve valores maiores em 6 de 14 categorias, sendo mais evidente nos resultados de escassez de recursos minerais, associado também a adoção de flotação por ar dissolvido (FAD) no tratamento, dado o processo produtivo de cloreto de polialumínio.

O presente trabalho obteve maiores valores nas seguintes categorias: consumo de água, ecotoxicidade terrestre, escassez de recursos fósseis, formação de ozônio e uso da terra, sendo mais expressivo na ecotoxicidade terrestre em virtude do padrão de coleta e transporte de efluentes adotado no sistema, interferindo diretamente nessa categoria.

Figura 19: Comparação entre os resultados de Lopes (2023) e Bui *et al.* (2022).



6.2.1.2.Método CML

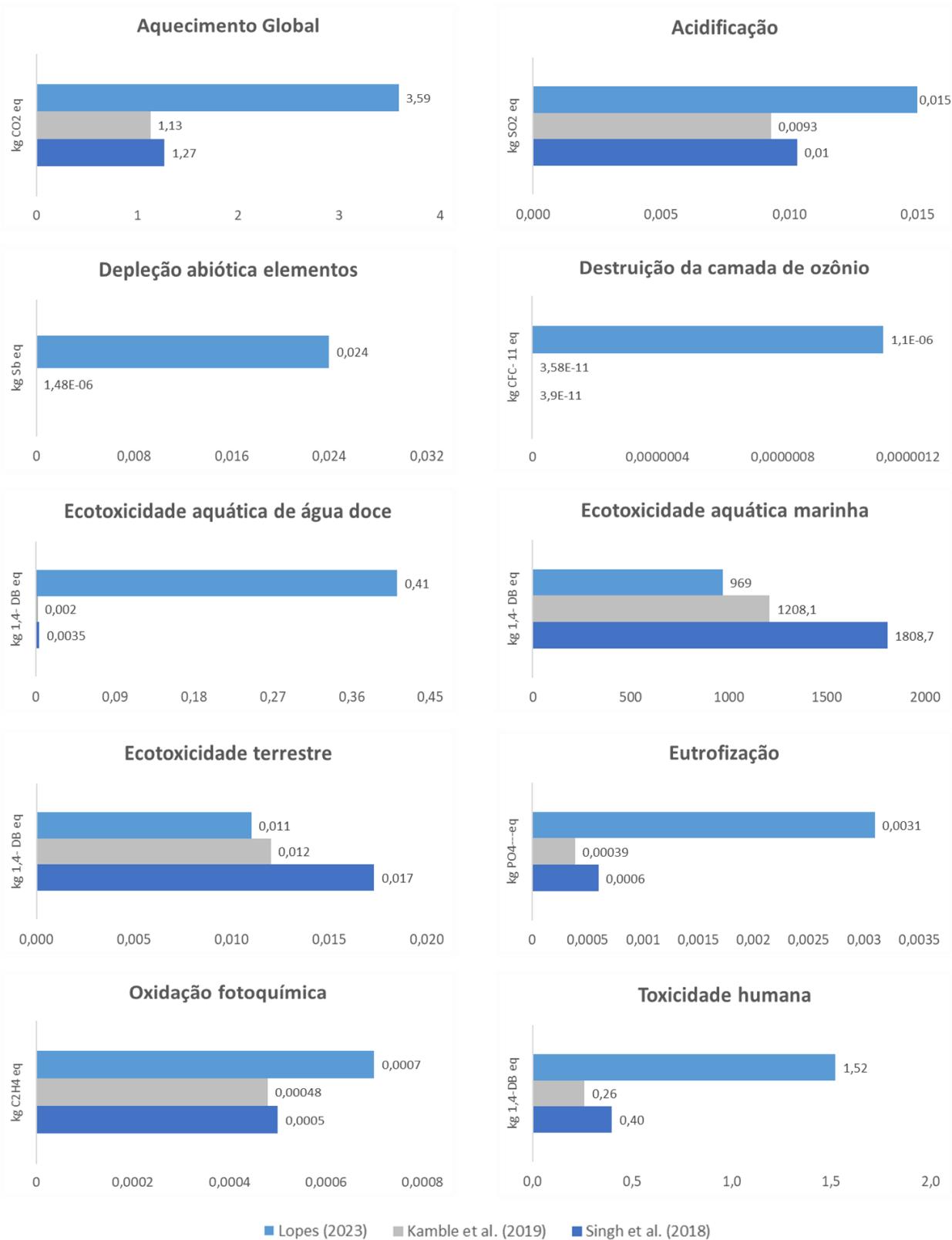
Quanto ao CML, também foram identificados 2 estudos que apresentaram o mesmo escopo de ACV aplicado a ETEs de mesma tecnologia, utilizando este método, sendo Shing *et al.* (2018) e Kamble *et al.* (2019).

Em 80% das categorias, o presente estudo apresentou valores superiores aos achados pelos demais autores, tendo o consumo de hipoclorito de sódio no tratamento a principal causa para EA (água doce), DCO e EU, ressalta-se que o valor demandado deste produto químico na estação de tratamento avaliada foi de 0,3 kg/m³ em comparação com 0,000026 kg/m³ em Shing *et al.* (2018) e 0,052 kg/m³ em Kamble *et al.* (2019). Para as categorias aquecimento global, depleção abiótica e toxicidade humana o resultado tem alta correlação ao transporte de efluente adotado que está diretamente associado à queima de combustíveis fósseis.

Diante dos resultados de depleção abiótica, destruição da camada de ozônio e ecotoxicidade aquática de água doce deste estudo de ACV em questão, que atingiram proporções de 10^2 a 10^5 acima dos valores encontrados nos demais estudos, pode-se considerar as causas que mais contribuíram para essas categorias como um ponto crítico deste sistema, sendo estes o transporte utilizado e consumo de NaClO no processo, como mencionado anteriormente.

Shing *et al.* (2018), apresentou alto valor para categoria de ecotoxicidade aquática marinha. Segundo o autor, isso ocorre, pois, a matriz energética local é proveniente da queima de carvão, biomassa e derivados de petróleo.

Figura 20: Comparação entre os resultados de Lopes (2023), Kamble *et al.* (2019) e Singh *et al.* (2018).



6.2.2. Estudos com avaliação de tecnologia diferente

6.2.2.1. Método Recipe

Os resultados estão dispostos no quadro 08, a qual apresenta as categorias de impacto consideradas no método ReciPe, bem como as diferentes tecnologias abordadas e seus respectivos estudos e achados. Quanto às células vazias, representam dados não abordados nos estudos ou que estão representadas por outra unidade, impossibilitando sua comparação.

Com base nos resultados, pode-se observar que o presente estudo de caso obteve valores superiores em 7 das 12 categorias de impacto analisadas (ecotoxicidade terrestre, marinha, de água doce, aquecimento global, consumo de água, destruição do ozônio estratosférico e escassez de recursos fósseis), quando comparada a tecnologias avaliadas por outros autores.

A maior discrepância é vista na categoria ecotoxicidade terrestre, alcançando valor superior aos demais estudos em torno de 10^5 , tendo o transporte o fator de principal influência. Por outro lado, apresentou menor valor para eutrofização marinha e radiação ionizante em relação às demais configurações de tratamento abordadas em outros estudos.

Em segundo lugar, a tecnologia de lodos ativados avaliada no estudo de Chu, Abbassi e Richard (2022), apresentou maiores impactos em 4 das 12 categorias (formação de material particulado, acidificação terrestre e eutrofização marinha). De acordo com o autor, resulta do consumo de energia elétrica e descarga de contaminantes residuais.

Tabela 03: Resultados de AICV em estudos que utilizaram o método ReCiPe.

RECIPE	Autor	Lopes (2023)	Rebello, Gonçalves e Calmon (2021)	Chu, Abbassi e Richard (2022)		Daskiran <i>et al.</i> (2022)		
	Tecnologia	MBBR	UASB + LAAT	LA	BRM	BRM		
	Etapas	Operação	Operação	Construção e operação	Construção e operação	Construção e operação		
	Fluxos	Transporte Eletricidade Produtos químicos Água	Transporte Eletricidade Produtos químicos Emissões	Transporte Eletricidade Materiais Resíduos	Transporte Eletricidade Materiais Resíduos	Transporte Eletricidade Produtos químicos Emissões Resíduos		
Categoria de impacto	Aquecimento global	kg CO ₂ eq	3,6	-	2,8	2,5	1,8	1,06
	Acidificação terrestre	kg SO ₂ eq	0,012	0,0056	0,014	1,3E-09	0,0086	0,0015
	Eutrofização (marinha)	kg N eq	0,00014	0,00033	0,0054	0,0016	0,00067	0,00037
	Eutrofização de água doce	kg P eq	0,00047	0,0011	0,00049	0,00042	0,000038	0,00067
	Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DCB eq	55,4	0,00031	0,00074	0,00027	0,00021	0,065
	Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DCB eq	0,063	0,0046	0,0062	0,003	0,0025	-
	Ecotoxicidade de água doce	kg 1,4-DCB eq	0,026	0,0032	0,0029	0,0023	0,0018	-
	Consumo de água	m ³	0,048	-	0,032	0,027	-0,97	-
	Radiação ionizante	kBq Co-60 eq	0,089	-	0,56	0,44	0,41	-
	Formação de material particulado fino	kg PM 2.5 eq	0,005	-	0,0057	0,0046	0,0029	-
	Escassez de recursos fósseis	kg oil eq	1,1	-	0,64	0,34	0,16	0,0633
	Destrução do ozônio estratosférico	kg CFC-11 eq	0,0000039	-	0,0000005	0,00000037	0,0000001	-

*BRM- biorreator de membrana, MBBR- biorreator de membrana de leito móvel, UASB- reator anaeróbio de fluxo ascendente , LA- Lagoas aeradas, LAAT- Lagoas aeróbicas de alta taxa, RA- Reator anaeróbico- anóxico-aeróbico.

6.2.2.2.Método CML

Os resultados estão estruturados de forma semelhante ao do ReCiPe e dispostos no quadro 09, a qual apresenta as categorias de impacto consideradas no método CML, bem como as diferentes tecnologias abordadas e seus respectivos estudos e resultados. As células vazias, representam dados não abordados nos estudos ou que estão representadas por outra unidade, impossibilitando sua comparação.

Quanto ao método CML, o presente estudo apresentou maiores valores em 4 das 10 categorias, em comparação às outras metodologias. Isso se deve ao consumo de diesel no processo que resulta da configuração de transporte de efluente em todo sistema que é realizada pelo modal rodoviário.

Em segundo lugar, as tecnologias abordadas no estudo de O'connor, Garnier e Batchelor (2014) foram as que contribuíram com maiores impactos nas categorias aquecimento global, eutrofização e ecotoxicidade aquática (água doce). De acordo com o autor, isso ocorre devido ao alto consumo de eletricidade característicos das tecnologias avançadas combinadas para tratamento e ao metano biogênico liberado no tratamento dado ao lodo (aterro).

A tecnologia Reator de Batelada Sequencial (RBS) abordada no estudo de Mishra *et al.* (2020), foi a mais impactante para acidificação e ecotoxicidade aquática marinha.

De acordo com o autor, no que diz respeito a acidificação, a justificativa para tal comportamento está relacionada à utilização ineficiente de sopradores e bombas no sistema, resultando em alto consumo de eletricidade para operação, visto que os impactos a esta categoria estão diretamente ligados a emissão de SOX e NOX que são abundantes na produção da eletricidade utilizada na ETE, proveniente de usinas termelétricas a carvão.

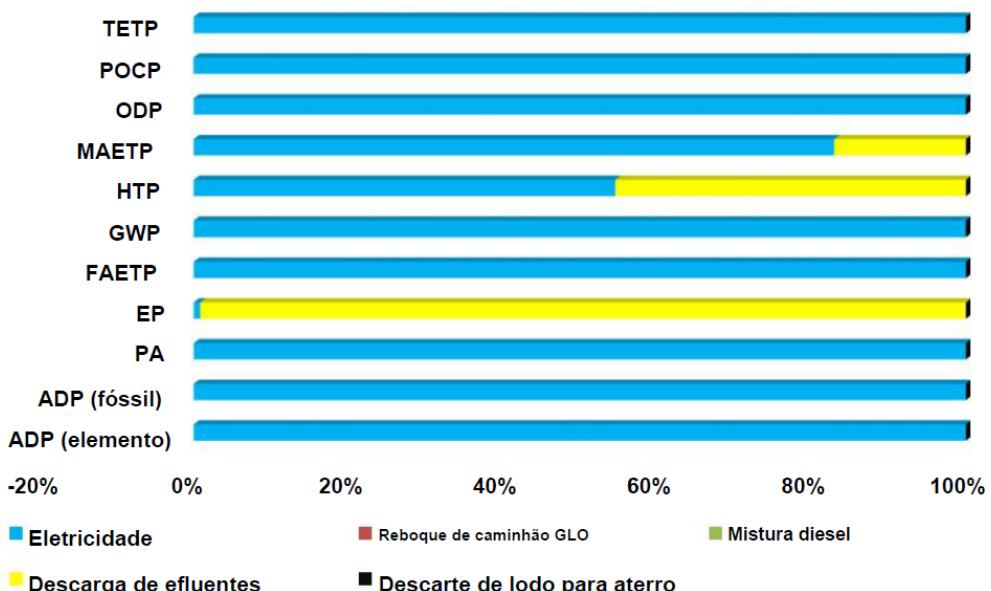
Em relação a ecotoxicidade aquática marinha, os impactos são decorrentes da presença de nutrientes e metais pesados no efluente, mesmo após tratamento, sendo liberados para o meio ambiente, resultando na elevação dos danos ambientais relativos a essa categoria.

A tecnologia de lagoas aeradas abordada no estudo de Kamble *et al.* (2019), apresentou maior valor em ecotoxicidade terrestre. Os autores associam este resultado ao alto consumo de energia elétrica do sistema.

A tecnologia Reator anaeróbico abordada em Singh *et al.* (2019) foi a menos impactante para 9 das 10 categorias em estudo. Este resultado é justificado por seu processo demandar energia apenas para bombeamento do efluente, sendo o consumo quase nulo para sua operação.

A figura 21 mostra os resultados obtidos pelos autores e como pode ser visto, maior parte das categorias de impacto (com exceção apenas para eutrofização) sofrem grande influência do consumo de eletricidade. Dessa forma, devido sua demanda energética ser menor em comparação com os outros sistemas analisados, essa tecnologia se configurou com melhor desempenho ambiental, indo de acordo com os resultados expressos no trabalho, que indicam a forte correlação do consumo energético aos impactos.

Figura 21: Categorias de impacto e seus fatores de influência.



Fonte: Singh *et al.*, (2019).

A categoria de potencial de eutrofização teve menor valor no estudo de Kamble *et al.* (2019) para a tecnologia biorreator de membrana (BRM) associada a cloração. De acordo com o autor , este resultado foi atingido por esta ser uma tecnologia sofisticada e de alta eficiência de remoção de nutrientes.

Tabela 04: Resultados de AICV em estudos que utilizaram o método CML.

	Autor	Lopes (2023)	Mishra <i>et al.</i> (2020)	Pasqualino <i>et al.</i> (2009)	Pasqualino , Meneses e Castells (2011)	O'connor, Garnier e Batchelor (2014)	Singh <i>et al.</i> (2019)	Kamble <i>et al.</i> (2019)						
		Tecnologia	MBBR	RBS	RA/ aeróbico	RA	UASB + LOA	FAD+ UASB + LOA	RA	RBS	BRM	LOA	BTS	LA
CML	Etapas	Operação	Operação	Operação	Operação	Construção operação e desativação	Construção operação e desativação	Operação	Operação	Operação	Operação	Operação	Operação	
	Fluxos	Transporte Energia Produtos químicos Água	Energia Produtos químicos Água	Transporte Energia Produtos químicos Materiais Água	Transporte Energia Produtos químicos Materiais Água	Energia Produtos químicos Materiais Resíduos	Energia Produtos químicos Materiais Resíduos	Energia Produtos químicos Materiais Resíduos	Energia Produtos químicos Materiais Resíduos	Energia Produtos químicos Materiais Resíduos	Transporte Energia Produtos químicos Combustível Eficiência de tratamento	Transporte Energia Produtos químicos Combustível Eficiência de tratamento	Transporte Energia Produtos químicos Combustível Resíduos	Transporte Energia Produtos químicos Combustível Resíduos
Categoria de impacto	Mudança climática/ Aquecimento global	kg CO ₂ eq	3,59	3,1	0,12	0,85	5,12	5,12	0,016	0,45	0,73	0,294	0,056	1,53
	Potencial de Acidificação	kg SO ₂ eq	1,30E-02	1,48E-02	1,70E-03	7,30E-03	-	-	1,40E-04	3,60E-03	6,50E-03	2,60E-03	5,10E-04	1,40E-02
	Potencial de Eutrofização	kg PO ₄ --- eq	2,50E-03	3,16E-03	1,40E-03	1,10E-03	3,46E-03	3,55E-03	9,90E-04	1,60E-04	2,91E-05	8,20E-04	2,20E-04	5,80E-04
	Destrução da camada de ozônio	kg CFC- 11 eq	1,12E-06	5,51E-13	4,82E-08	3,62E-08	-	-	3,66E-13	1,32E-11	1,70E-11	6,87E-12	1,32E-12	4,21E-11
	Oxidação fotoquímica	kg C ₂ H ₄ eq	6,96E-04	-	-	-	-	-	6,98E-06	1,90E-04	3,20E-04	1,30E-04	2,51E-05	6,80E-04

Tabela 04: Resultados de AICV em estudos que utilizaram o método CML (continuação).

CML	Autor	Lopes (2023)	Mishra <i>et al.</i> (2020)	Pasqualino <i>et al.</i> (2009)	Pasqualino , Meneses e Castells (2011)	O'connor, Garnier e Batchelor (2014)	Singh <i>et al.</i> (2019)	Kamble <i>et al.</i> (2019)					
	Tecnologia	MBBR	RBS	RA/ aeróbico	RA	UASB + LOA	FAD+ UASB + LOA	RA	RBS	BRM	LOA	BTS	LA
	Depleção abiótica elementos	kg Sb eq	2,39E-02	-	1,80E-03	4,90E-03	-	-	5,72E-10	-	-	-	-
Categoria de impacto	Toxicidade humana	kg 1,4- DCB eq	1,52	1,02	-	-	0,68	0,72	0,01	0,143	0,11	0,36	0,02
	Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4- DCB eq	1,1E-02	8,40E-03	-	-	-	-	2,47E-04	4,60E-03	6,30E-03	1,56E-02	8,90E-04
	Potencial de ecotoxicidade aquática de água doce	kg 1,4- DB eq	4,12E-01	7,40E-03	-	-	4,60E-01	4,80E-01	4,30E-05	8,10E-04	1,20E-03	4,30E-03	1,60E-04
	Potencial de ecotoxicidade aquática marinha	kg 1,4- DB eq	9,69E+02	4,42E+03	-	-	-	-	3,14E+01	4,88E+02	6,51E+02	1,62E+03	9,35E+01
													2,43E+03

* BRM- biorreatore de membrana, BTS- Biotecnologia do solo, FAD- Flotação por ar dissolvido, LA- Lagoas aeradas, LAAT- Lagoas aeróbicas de alta taxa, LOA- Lodos ativado, MBBR- biorreatore de leito móvel, RA- Reator anaeróbico, RBS- Reator de batelada sequencial, UASB- reator anaeróbio de fluxo ascendente

7. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Com base no presente estudo foi possível identificar que para operação do sistema de tratamento analisado, o transporte de efluentes (através de caminhão tanque) foi o fator que mais derivou impactos associados, em contrapartida, o consumo de água foi o componente de menor impacto do processo. Esse resultado foi encontrado tanto pelo método ReCiPe quanto pelo CML.

Embora os resultados dos métodos mostrassem o mesmo padrão em uma avaliação geral, divergiram nos resultados de algumas categorias de impacto quando estas foram avaliadas individualmente, como ecotoxicidade terrestre, uso da terra e destruição da camada de ozônio que tiveram maior influência de transporte e eletricidade nos cálculos pelo ReCiPe e de NaClO e eletricidade no método CML.

Observa-se também que há grande disparidade entre os resultados de categorias que tratam ecotoxicidade quando comparados seus resultados absolutos, com atenção para categoria de ecotoxicidade marinha que no ReCiPe teve valor de 0,063 kg 1,4- DB eq, enquanto que no CML foi de 969 kg 1,4-DB eq por m³. O que pode ser justificado pela diferença de cálculo e considerações realizadas por cada método na contabilização dessa categoria.

Quanto aos dados normalizados, conclusões dos dois métodos apontam que o sistema analisado contribui principalmente para impactos de ecotoxicidade marinha, porém, com características de influência distintas, tendo maior indução do consumo de NaClO no CML e de transporte no ReCiPe. Sendo, dessa forma, uma categoria de impactos significativa na ACV do sistema, demandando atenção de medidas para atenuar suas causas.

A comparação a outros estudos que analisaram a mesma tecnologia de tratamento (MBBR) evidenciou que independente do processo ser similar, os resultados foram divergentes demonstrando que sistemas que utilizam mesma tecnologia de tratamento podem apresentar desempenho ambiental diferenciado quando associados a fatores distintos como matriz energética e transporte de efluentes utilizado.

No caso da comparação com pesquisas que abordaram de tecnologias distintas, o presente estudo de caso se configurou como a tecnologia de maior impacto em relação às demais, tanto pela avaliação com o método ReCiPe quanto com o CML. A principal

influência desse resultado é o alto consumo e queima de diesel associado ao tipo de transporte adotado no processo.

Ademais, realizando uma abordagem geral, o consumo energético se mostrou relevante na contribuição de impacto, sendo apontado como o principal fator de danos ambientais durante a operação de ETE's pela maioria dos estudos utilizados para comparação, no entanto, isso associa-se a matriz energética dos países em que foram realizadas as pesquisas, sendo substancialmente a base da queima de combustíveis fósseis.

Dessa forma, é necessário implementar melhorias quanto a dosagem de produtos químicos e tipo de transporte utilizados no sistema analisado neste estudo, enquanto que para os abordados nas demais pesquisas, as melhorias devem ser voltadas para o consumo de energia.

Nesse sentido, durante o processo de seleção de tecnologias para tratamento de esgoto, devem-se priorizar as soluções com melhor eficiência energética e ao mesmo tempo econômicas e suficientes para atender aos padrões de lançamento. Além disso, projetar adequadamente esses sistemas e optar por alternativas de transporte, materiais e insumos de menor impacto é essencial para garantir desempenho ambiental satisfatório na sua implantação, operação e fim de vida.

8. RECOMENDAÇÕES

Para melhor representar o desempenho ambiental de sistemas de tratamento de esgoto, sugere-se para pesquisas futuras a realização do levantamento das características físico-químicas do efluente antes e após tratamento, em paralelo à ACV, de modo identificar os impactos gerados por um cenário sem tratamento (com o lançamento do efluente bruto ao ambiente) e os impactos evitados com a implementação do sistema de tratamento. Possibilitando, dessa forma, avaliar sua viabilidade, através do contraste entre suas implicações positivas e negativas (verificadas por meio da ACV) ao meio ambiente.

O presente estudo limitou-se à avaliação da fase de operação de uma ETE, considerando seus fluxos de entrada em um período de 2 anos. Nesse sentido, é recomendado que haja continuidade no monitoramento de dados durante a vida útil do sistema e que em estudos subsequentes também sejam avaliados aspectos adicionais relacionados às saídas do processo (resíduos e lodo destinados a aterro) e consideradas as fases de construção e fim de vida, para melhor representação dos impactos.

REFERÊNCIAS

- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040. Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida : Princípios e estrutura.** Rio de Janeiro, 2009a.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14044. Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida: Requisitos e orientações.** Rio de Janeiro, 2009b.
- ALVES, D. A. Avaliação do Ciclo de Vida - ACV de um sistema Wetland construído de fluxo vertical para o tratamento de esgoto doméstico.** [s.l.] Universidade Federal de Santa Maria, 2016.
- AMOATEY, P.; BANI, R.** Wastewater Management. In: **Waste Water - Evaluation and Management.** Ghana: [s.n.], v. 130p. 20.
- ANA. Agência Nacional de Águas (ANA) - Atlas Esgotos - Despoluição de bacias hidrográficas,** 2017. Disponível em:
http://arquivos.ana.gov.br/impressa/publicacoes/ATLASesGOTOSDespoluicaodeBaciasHidrograficas-ResumoExecutivo_livro.pdf
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS.** Atlas Esgotos: Atualização da base de dados de estações de tratamento de esgotos no Brasil. p. 44, 2020.
- ANEEL. Regulação dos Serviços de Distribuição - ANEEL.** Disponível em:
<https://antigo.aneel.gov.br/web/guest/regulacao-dos-servicos-de-distribuicao>. Acesso em: 22 nov. 2022.
- ARAUJO, M. G. Modelo de avaliação do ciclo de vida para a gestão de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos no Brasil.** [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.
- ARIAS, A. et al.** Unravelling the environmental and economic impacts of innovative technologies for the enhancement of biogas production and sludge management in wastewater systems. **Journal of Environmental Management**, v. 270, p. 110965, 15 set. 2020.
- BAI, S. et al.** Using site-specific life cycle assessment methodology to evaluate Chinese wastewater treatment scenarios: A comparative study of site-generic and site-specific methods. **Journal of Cleaner Production**, v. 144, p. 1–7, 15 fev. 2017.
- BELART, M. S. V. C. O enfoque de ciclo de vida como estratégia para a gestão sustentável: um estudo de caso sobre pneus.** Rio de Janeiro : Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.
- BENEDET, G.** **Avaliação de incerteza em inventários do ciclo de vida.** Florianópolis : Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.
- BICUDO, B. R. Análise de ETARs Compactas no Concelho de Bragança** Análise de ETARs Compactas no Concelho de Bragança. [s.l.] Instituto Politécnico de Bragança, 2017.
- BILEC, M. M.; RIES, R. J.; MATTHEWS, H. S.** Life-Cycle Assessment Modeling of Construction Processes for Buildings. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 16, n. 3, p.

- 199–205, out. 2010.
- BNDES. Perspectivas do investimento 2015-2018 e panoramas setoriais. p. 196, 2014.
- BONTON, A. et al. Comparative life cycle assessment of water treatment plants. *Desalination*, v. 284, p. 42–54, 4 jan. 2012.
- BORGES, N. B. **Aproveitamento dos resíduos gerados no tratamento preliminar de estações de tratamento de esgoto**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2014.
- BRASIL. RESOLUÇÃO N. 492, DE 20 DE DEZEMBRO DE 2018. . 2018.
- BRASIL. LEI N° 14.026, DE 15 DE JULHO DE 2020. . 2020.
- BUENO, C. Avaliação de Ciclo de Vida na Construção Civil : Análise de Sensibilidade. p. 266, 2014.
- BUI, H. N. et al. Life cycle assessment of paper mill wastewater: a case study in Viet Nam. **Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research**, v. 85, n. 5, p. 1522–1537, 1 mar. 2022.
- BURCHART-KOROL, D.; ZAWARTKA, P. Environmental life cycle assessment of septic tanks in urban wastewater system – a case study for Poland. **Archives of Environmental Protection**, v. 45, n. 4, p. 68–77, 2019a.
- BURCHART-KOROL, D.; ZAWARTKA, P. Determinants of environmental assessment of Polish individual wastewater treatment plants in a life cycle perspective. **Archives of Environmental Protection**, v. 45, n. 3, p. 44–54, 2019b.
- CARMINATI, H. B. et al. Modeling and dynamic simulation of a two-stage pre-denitrification MBBR system under increasing organic loading rates. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, v. 41, n. 11, p. 1573–1587, 1 nov. 2018.
- CARVALHO, N. L. et al. Reutilização de águas residuárias. **Revista Monografias Ambientais**, v. 13, n. 2, p. 3164–3171, 2014.
- CHERUBINI, E. **Incertezas na avaliação do ciclo de vida: um estudo de caso na suinocultura**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.
- CHU, T.; ABBASSI, B. E.; ZYTNER, R. G. Life-cycle assessment of full-scale membrane bioreactor and tertiary treatment technologies in the fruit processing industry. **Water Environment Research**, v. 94, n. 1, 1 jan. 2022.
- CLAVREUL, J. et al. Stochastic and epistemic uncertainty propagation in LCA. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 2013.
- COLTRO, L. et al. **Avaliação do Ciclo de Vida - ACV**. Campinas, SP: [s.n.].
- COROMINAS, L. et al. **Life cycle assessment applied to wastewater treatment: State of the art**. Water Research Elsevier Ltd, , 1 out. 2013.
- DASKIRAN, F. et al. Comparative evaluation of different operation scenarios for a full-scale wastewater treatment plant: Modeling coupled with life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 341, p. 130864, 20 mar. 2022.
- DE FEO, G.; FERRARA, C. Investigation of the environmental impacts of municipal wastewater treatment plants through a Life Cycle Assessment software tool.

<http://dx.doi.org/10.1080/09593330.2016.1241306>, v. 38, n. 15, p. 1943–1948, 3 ago. 2017a.

DE FEO, G.; FERRARA, C. A procedure for evaluating the most environmentally sound alternative between two on-site small-scale wastewater treatment systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 164, p. 124–136, 15 out. 2017b.

DEL BORGHI, A. et al. Development of PCR for WWTP based on a case study. **The International Journal of Life Cycle Assessment 2008 13:6**, v. 13, n. 6, p. 512–521, 13 ago. 2008.

DIXON, A.; SIMON, M.; BURKITT, T. Assessing the environmental impact of two options for small-scale wastewater treatment: comparing a reedbed and an aerated biological filter using a life cycle approach. **Ecological Engineering**, v. 20, n. 4, p. 297–308, 1 set. 2003.

DUAN, N. et al. Evaluating the environmental impacts of an urban wetland park based on emergy accounting and life cycle assessment: A case study in Beijing. **Ecological Modelling**, v. 222, n. 2, p. 351–359, 24 jan. 2011.

EUROPEAN COMMISSION. **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance**. [s.l: s.n.].

FARIAS, M. M. Y. L. **Avaliação do desempenho ambiental de uma estação de tratamento de águas residuais utilizando a metodologia de análise de ciclo de vida**. [s.l.] Escola superior agrária de Bragança, 2020.

FEHRENBACH, H. et al. Hemeroby as an impact category indicator for the integration of land use into life cycle (impact) assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 20, n. 11, p. 1511–1527, 23 set. 2015.

FERREIRA, C. D. **Participação de grupos de interesse na formulação de políticas públicas: Alinhamento dos objetivos de desenvolvimento sustentável ambiental com o planejamento orçamentário do governo federal do Brasil**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2021.

FINNVEDEN, G. et al. Recent developments in Life Cycle Assessment. **Journal of Environmental Management**, v. 91, n. 1, p. 1–21, 1 out. 2009.

FOLEY, J. et al. Comprehensive life cycle inventories of alternative wastewater treatment systems. **Water Research**, v. 44, n. 5, p. 1654–1666, 1 mar. 2010.

GALLEGO-SCHMID, A.; TARPAÑI, R. R. Z. **Life cycle assessment of wastewater treatment in developing countries: A review** Water Research Elsevier Ltd, , 15 abr. 2019.

GARFÍ, M.; FLORES, L.; FERRER, I. Life Cycle Assessment of wastewater treatment systems for small communities: Activated sludge, constructed wetlands and high rate algal ponds. **Journal of Cleaner Production**, v. 161, p. 211–219, 10 set. 2017.

GOEDKOOP, M. et al. ReCiPe 2008. p. 1–44, 2009.

GUIMARÃES, G. D. **INCERTEZAS DE CENÁRIO NO INVENTÁRIO DE AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA DE EDIFICAÇÕES**. [s.l: s.n.]. Disponível em:

- <<http://orcid.org/http://orcid.org/00>>. Acesso em: 17 jun. 2021.
- GUINÉE, J. Handbook on Life Cycle Assessment-Operational Guide to the ISO Standards. **The international journal of life cycle assessment**, 2001.
- GUINÉE, J. B. et al. Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future. **ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY**, v. 45, n. 1, p. 90–96, 2011.
- GUTIERREZ, K. G. **Análise e gerenciamento de impactos ambientais no tratamento de esgoto doméstico mediante avaliação de ciclo de vida**. Belo Horizonte: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, 2014.
- HALLEUX, H.; LASSAUX, S.; GERMAIN, A. Comparison of life cycle assessment methods, application to a wastewater treatment plant. 2006.
- HANAFY, R. et al. Upgrading Conventional Activated Sludge System Using Bio-media: A Case Study of Zenin Wastewater Treatment Plant, Egypt. v. 11, n. 1, 2019.
- HEIJUNGS, R.; HUIJBREGTS, M. A. J. A Review of Approaches to Treat Uncertainty in LCA. **International Congress on Environmental Modelling and Software**, 1 jul. 2004.
- HERNÁNDEZ-PADILLA, F. et al. Assessing wastewater treatment in Latin America and the Caribbean: Enhancing life cycle assessment interpretation by regionalization and impact assessment sensibility. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 2140–2153, 20 jan. 2017.
- HOSPIDO, A.; MOREIRA, M. T.; FEIJOO, G. A comparison of municipal wastewater treatment plants for big centres of population in Galicia (Spain). **The International Journal of Life Cycle Assessment 2008 13:1**, v. 13, n. 1, p. 57–64, 20 mar. 2008a.
- HOSPIDO, A.; MOREIRA, T.; FEIJOO, G. LCA Case Studies Wastewater Treatment Plants 57 A Comparison of Municipal Wastewater Treatment Plants for Big Centres of Population in Galicia (Spain). **Int J LCA**, v. 13, n. 1, p. 57–64, 2008b.
- HUIJBREGTS, M. A. J. et al. Evaluating Uncertainty in Environmental Life-Cycle Assessment. A Case Study Comparing Two Insulation Options for a Dutch One-Family Dwelling. **ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY**, v. 37, n. 11, 2003.
- IBGE. **Pesquisa nacional de saneamento básico 2017: abastecimento de água e esgotamento sanitário** Rio de Janeiro, 2020.
- IBICT. **Guia Geral para Avaliações do Ciclo de Vida Orientações Detalhadas**. [s.l: s.n.].
- IFU HAMBURG GMBH. **Umberto NTX LCA** Hamburgo, 2016. Disponível em: <<https://dl-manual.com/doc/umberto-life-cycle-assessment-user-manual-en-2o29qe88gnv0>>. Acesso em: 17 nov. 2021
- INSTITUTE OF ENVIRONMENTAL SCIENCES. CML- IA database. 2016.
- IZQUIERDO, B. K. . Estudo Do Comportamento De Um Sistema De Lodos Ativados Com Reator De Leito Móvel (Mbbr). p. 116, 2016.
- JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 8^a edição ed. Rio de Janeiro: [s.n.].

- KALBAR, P. P.; KARMAKAR, S.; ASOLEKAR, S. R. Life cycle-based decision support tool for selection of wastewater treatment alternatives. **Journal of Cleaner Production**, v. 117, p. 64–72, 20 mar. 2016.
- 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.
- KAUARK, F. DA S.; MANHÃES, F. C.; MEDEIROS, C. H. **METODOLOGIA DA PESQUISA: UM GUIA PRÁTICO**. [s.l: s.n.]. v. 53
- LIM, S. R.; PARK, D.; PARK, J. M. Environmental and economic feasibility study of a total wastewater treatment network system. **Journal of Environmental Management**, v. 88, n. 3, p. 564–575, 1 ago. 2008.
- LIM, S. R.; PARK, J. M. Environmental impact minimization of a total wastewater treatment network system from a life cycle perspective. **Journal of Environmental Management**, v. 90, n. 3, p. 1454–1462, 1 mar. 2009.
- LLOYD, S. M.; RIES, R. Characterizing, Propagating, and Analyzing Uncertainty in Life-Cycle Assessment A Survey of Quantitative Approaches. **Journal of Industrial Ecology**, v. 11, n. 1, p. 161–179, 2007.
- LÖFGREN, B.; TILLMAN, A. M.; RINDE, B. Manufacturing actor's LCA. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 17–18, p. 2025–2033, 1 nov. 2011.
- LOPES, T. A. DE S. et al. Revisão crítica da literatura sobre aplicação da Avaliação de Ciclo de Vida ao tratamento de esgotos. **Revista DAE**, v. 65, n. 208, p. 47–55, 2017.
- 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 & Água**, v. 13, n. 4, 9 ago. 2018.
- LOPSIK, K. Life cycle assessment of small-scale constructed wetland and extended aeration activated sludge wastewater treatment system. **International Journal of Environmental Science and Technology 2013 10:6**, v. 10, n. 6, p. 1295–1308, 15 fev. 2013.
- LORENZO-TOJA, Y. et al. Benchmarking wastewater treatment plants under an eco-efficiency perspective. **Science of The Total Environment**, v. 566–567, p. 468–479, 1 out. 2016.
- LORENZO-TOJA, Y. et al. Dynamic environmental efficiency assessment for wastewater treatment plants. **The International Journal of Life Cycle Assessment 2017 23:2**, v. 23, n. 2, p. 357–367, 5 abr. 2017.
- LUNDIN, M.; BENGTSSON, M.; MOLANDER, S. Life Cycle Assessment of Wastewater Systems: Influence of System Boundaries and Scale on Calculated Environmental Loads. **Environmental Science and Technology**, v. 34, n. 1, p. 180–186, 1 jan. 2000.
- LUZ, L. M. DA. **INTEGRAÇÃO DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA AO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO: UMA PROPOSTA METODOLÓGICA**. [s.l.] UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, 2017.

- MACEDO, D. B. G. **Metodologia de avaliação do ciclo de vida de sistemas construtivos- aplicação em um sistema estruturado em aço.** [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.
- MACHADO, A. P. et al. Life cycle assessment of wastewater treatment options for small and decentralized communities. **Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research**, v. 56, n. 3, p. 15–22, 2007.
- MATTHEWS, H. S.; HENDRICKSON, C.; MATTHEWS, D. H. **Life Cycle Assessment: Quantitative Approaches for Decisions That Matter.** [s.l: s.n.].
- MENESES, M.; PASQUALINO, J. C.; CASTELLS, F. Environmental assessment of urban wastewater reuse: Treatment alternatives and applications. 2010.
- METCALF, L.; EDDY, H. P. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse.** [s.l.] McGraw-Hill Education, 2015.
- MISHRA, H. et al. Environmental assessment of an Indian municipal wastewater treatment plant in Rajasthan. **International Journal of Sustainable Engineering**, 2021.
- MOHAMMADI, M.; FATAEI, E. Comparative life cycle assessment of municipal wastewater treatment systems: lagoon and activated sludge. **Caspian Journal of Environmental Sciences**, v. 17, n. 4, p. 327–336, 1 dez. 2019.
- MOLINOS-SEANTE, M.; HERNÁNDEZ-SANCHO, F.; SALA-GARRIDO, R. Cost-benefit analysis of water-reuse projects for environmental purposes: A case study for spanish wastewater treatment plants. **Journal of Environmental Management**, v. 92, n. 12, p. 3091–3097, 1 dez. 2011.
- MOREIRA, F. DE S. **Bem-estar no Trabalho – Proposta de uma Escala para Operários da Construção.** [s.l: s.n.].
- MORERA, S. et al. Using a detailed inventory of a large wastewater treatment plant to estimate the relative importance of construction to the overall environmental impacts. **Water Research**, v. 122, p. 614–623, 1 out. 2017.
- MORSY, K. M. et al. Life Cycle Assessment of Upgrading Primary Wastewater Treatment Plants to Secondary Treatment Including a Circular Economy Approach. **Air, Soil and Water Research**, v. 13, n. 1, 17 jul. 2020.
- MOURA, A. E. DE. **Avaliação do Diagrama de Fluxo de Esgoto baseado em um estudo de caso realizado na Zona Leste do município de São Paulo.** São Paulo: Universidade de São Paulo, 2019.
- MULLER, S. et al. The application of the pedigree approach to the distributions foreseen in ecoinvent v3. **eThe International Journal of Life Cycle Assessment**, p. 11, 2014.
- NETO, V. F. DE M.; MELO, J. H. DA S.; SANTOS, A. F. DE M. S. Eficiência do tratamento de esgotos sanitários no município de Garanhuns, PE, Brasil, após melhorias na estação de tratamento de efluentes. v. 7, n. 1, p. 73–83, 2021.
- NGUYEN, T. K. L. et al. Environmental impacts and greenhouse gas emissions assessment for energy recovery and material recycle of the wastewater treatment plant. **Science of The Total Environment**, v. 784, p. 147135, 25 ago. 2021.
- NIERO, M. et al. Comparative life cycle assessment of wastewater treatment in Denmark

including sensitivity and uncertainty analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 68, p. 25–35, 1 abr. 2014.

NIPHE, N. I. FOR P. H. AND THE E. ReCiPe 2016 v1.1. **RIVM Report 2016-0104**, p. 201, 2017.

NUNES, J. A. **Tratamento Biológico de Águas Residuárias**. 5^a edição ed. São Paulo: [s.n.].

O'CONNOR, M.; GARNIER, G.; BATCHELOR, W. Life cycle assessment comparison of industrial effluent management strategies. **Journal of Cleaner Production**, v. 79, p. 168–181, 15 set. 2014.

ØDEGAARD, H. Innovations in wastewater treatment: –the moving bed biofilm process. **Water Science and Technology**, v. 53, n. 9, p. 17–33, 1 maio 2006.

ØDEGAARD, H.; GISVOLD, B.; STRICKLAND, J. The influence of carrier size and shape in the moving bed biofilm process. **Water Science and Technology**, v. 41, n. 4–5, p. 383–391, 1 fev. 2000.

PADRÓN PÁEZ, J. I. et al. Assessment of sustainable wastewater treatment networks design applying LCA. **Computer Aided Chemical Engineering**, v. 40, p. 2707–2712, 1 jan. 2017.

PASQUALINO, J. C. et al. LCA as a decision support tool for the environmental improvement of the operation of a municipal wastewater treatment plant. **Environmental Science and Technology**, v. 43, n. 9, p. 3300–3307, 1 maio 2009.

PASQUALINO, J. C.; MENESES, M.; CASTELLS, F. Life Cycle Assessment of Urban Wastewater Reclamation and Reuse Alternatives. **Journal of Industrial Ecology**, v. 15, n. 1, p. 49–63, 1 fev. 2011.

PAUSTA, C. M. J. et al. Life Cycle Assessment of a Retrofit Wastewater Nutrient Recovery System in Metro Manila . **CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS**, v. 70, 2018.

PIEKARSKI, C. M. **Modelo multicritério para apoio à tomada de decisão baseado em avaliação do ciclo de vida e indicadores corporativos**. Ponta Grossa: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.

PITUO, M. M. **Sustentabilidade Ambiental de um Sistema de Tratamento de Águas Residuais Urbanas: Uma Avaliação do Ciclo de Vida**. [s.l.] Instituto politécnico de Bragança, 2017.

PROVDANOV, C. C.; FREITAS, E. C. DE. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. [s.l: s.n.].

QIQI, Y.; QIANG, H.; IBRAHIM, H. T. Review on moving bed biofilm processes. **Pakistan Journal of Nutrition**, v. 11, n. 9, p. 706–713, 2012.

RASHID, S. S.; LIU, Y. Q. Assessing environmental impacts of large centralized wastewater treatment plants with combined or separate sewer systems in dry/wet seasons by using LCA. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 13, p. 15674–15690, 1 maio 2020.

RAUPP, F. M.; BEUREN, I. M. Metodologia da pesquisa aplicável às ciências sociais.

In: BEUREN, I. M. (Ed.). . **Como Elaborar Trabalhos Monográficos em Contabilidade: Teoria e Prática.** 3. ed. [s.l: s.n.]. p. 76–97.

REAP, J. et al. A survey of unresolved problems in life cycle assessment Part 1: goal and scope and inventory analysis. 2008.

REBELLO, T. A.; GONÇALVES, R. F.; CALMON, J. L. Mitigation of environmental impacts in warm-weather wastewater treatment plants using the life cycle assessment tool. **International Journal of Environmental Science and Technology** 2021 19:6, v. 19, n. 6, p. 4763–4778, 9 jun. 2021.

RISCH, E. et al. How environmentally significant is water consumption during wastewater treatment?: Application of recent developments in LCA to WWT technologies used at 3 contrasted geographical locations. **Water Research**, v. 57, p. 20–30, 15 jun. 2014.

RISCH, E. et al. Life cycle assessment of urban wastewater systems: Quantifying the relative contribution of sewer systems. **Water Research**, v. 77, p. 35–48, 5 jun. 2015.

RODRIGUEZ-GARCIA, G. et al. Environmental and economic profile of six typologies of wastewater treatment plants. **Water Research**, v. 45, n. 18, p. 5997–6010, 15 nov. 2011.

ROSSI, E. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA BRITA PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL: ESTUDO DE CASO. [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, 2013.

SABEEN, A. H. et al. Quantification of environmental impacts of domestic wastewater treatment using life cycle assessment: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 190, p. 221–233, 20 jul. 2018.

SABEEN, A. H.; KAMARUDDIN, · S N B; NOOR, · Z Z. Environmental impacts assessment of industrial wastewater treatment system using electroless nickel plating and life cycle assessment approaches. **International Journal of Environmental Science and Technology**, 2019.

SEVERINO, A. J. **Metodologia do trabalho científico.** [s.l: s.n.]. v. 53

SINGH, A. et al. Technical, hygiene, economic, and life cycle assessment of full-scale moving bed biofilm reactors for wastewater treatment in India. **Environmental Science and Pollution Research** 2017 25:3, v. 25, n. 3, p. 2552–2569, 10 nov. 2017.

SINGH, A. et al. Performance evaluation of a decentralized wastewater treatment system in India. **Environmental Science and Pollution Research** 2019 26:21, v. 26, n. 21, p. 21172–21188, 22 maio 2019.

TALANG, R. P. N.; 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, 20 maio 2020.

TEODOSIU, C. et al. Environmental assessment of municipal wastewater discharges: a comparative study of evaluation methods. **The International Journal of Life Cycle Assessment** 2016 21:3, v. 21, n. 3, p. 395–411, 15 jan. 2016.

TEOW, Y. H. et al. Comparative environmental impact evaluation using life cycle assessment approach: a case study of integrated membrane-filtration system for the treatment of aerobically-digested palm oil mill effluent. **Sustainable Environment Research**, v. 31, n. 1, p. 1–14, 1 dez. 2021.

TONETTI, A. L. et al. **Tratamento de esgoto doméstico em comunidades isoladas:: referencial para a escolha de soluções**. Campinas, SP: [s.n.].

TOURINHO, T. C. DE O. **AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO CICLO DE VIDA DE PROCESSOS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DOMÉSTICOS**. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

VON SPERLING, M. **Princípio do Tratamento Biológico de Águas Residuárias - Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4^a edição ed. Belo Horizonte: [s.n.].

WEF. **MOP No 35 - Biofilm Reactors**. [s.l]: s.n.].

WEIDEMA, B. P. LCA Data Quality Multi-User Test LCA Data Quality Multi-User Test of the Data Quality Matrix for Product Life Cycle Inventory Data. 1998.

XUE, X. et al. Holistic analysis of urban water systems in the Greater Cincinnati region: (1) life cycle assessment and cost implications. **Water Research** X, v. 2, 1 fev. 2019.

YI, L. et al. Life Cycle Assessment of a municipal wastewater treatment plant: a case study in Suzhou, China. **Journal of Cleaner Production**, v. 57, p. 221–227, 15 out. 2013.

ZENG, S.; CHEN, J. **Forecasting the Allocation Ratio of Carbon Emission Allowance Currency for 2020 and 2030 in ChinaSustainability (Switzerland)**, 2016.

ANEXOS

ANEXO 1- MEMORIAL DE CÁLCULO



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



CONSUMO DE ÁGUA

Consumo total de água (m³)	Volume total de esgoto tratado (m³)	Consumo de água por m³ de esgoto tratado (m³)	Consumo de água por m³ de esgoto tratado (kg)
83,5	33676,5	0,002479474	2,48

CONSUMO DE ENERGIA

Consumo total de energia (kWh)	Volume total de esgoto tratado (m³)	Consumo de energia por m³ de esgoto tratado (kWh)
55252	33676,5	1,64

CONSUMO DE NACLO

Consumo total de hipoclorito (kg)	Volume total de esgoto tratado (m³)	Consumo de energia por m³ de esgoto tratado (kg)
10140	33676,5	0,3

TRANSPORTE- ATENDIMENTO (CAMINHÃO)

Empresa atendida	Coletas por mês	Distância ida (km)	Carga ida	tkm ida	tkm/m³ ida	Distância volta (km)	Carga volta	tkm volta	tkm/m³ volta
Empresa A	26	25	0,001	0,65	0,00046	25,1	10	6526	4,65
Empresa B	26	17,5	0,001	0,455	0,00032	18,3	10	4758	3,39
Empresa C	1	77,3	0,001	0,0773	0,000055	75,9	10	759	0,54
Empresa D	2	17,5	0,001	0,035	0,000025	18,5	10	370	0,26
Empresa E	26	24,7	0,001	0,6422	0,00046	24,1	15	9399	6,7
Empresa F	26	20,1	0,001	0,5226	0,00037	20,2	17,81	9354	6,67

ANEXO 1- MEMORIAL DE CÁLCULO



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**TRANSPORTE- ATENDIMENTO (FERRY BOAT)**

Empresa atendida	Coletas por mês	Distância ida (km)	Carga ida	tkm ida	tkm/m³ ida	Distância volta (km)	Carga volta	tkm volta	tkm/m³ volta
Empresa C	1	22,6	0,001	0,0226	1,6106E-05	22,6	10	226	0,16106

TRANSPORTE- FORNECIMENTO

Insumo	Compras por mês	Distância ida (km)	Carga ida	tkm ida	tkm/m³ ida	Distância volta (km)	Carga volta	tkm volta	tkm/m³ volta
Fornecedor de NaClO	2	12,4	0,001	0,0248	0,00002	12,8	0,211	5,4016	0,0038

TRANSPORTE- DESTINAÇÃO FINAL

Destino	Rota mensal	Distância ida (km)	Carga ida	tkm ida	tkm/m³ ida	Distância volta (km)	Carga volta	tkm volta	tkm/m³ volta
Aterro sanitário	1	49,2	1,38	67,896	0,04839	47,2	0,001	0,0472	0,000034

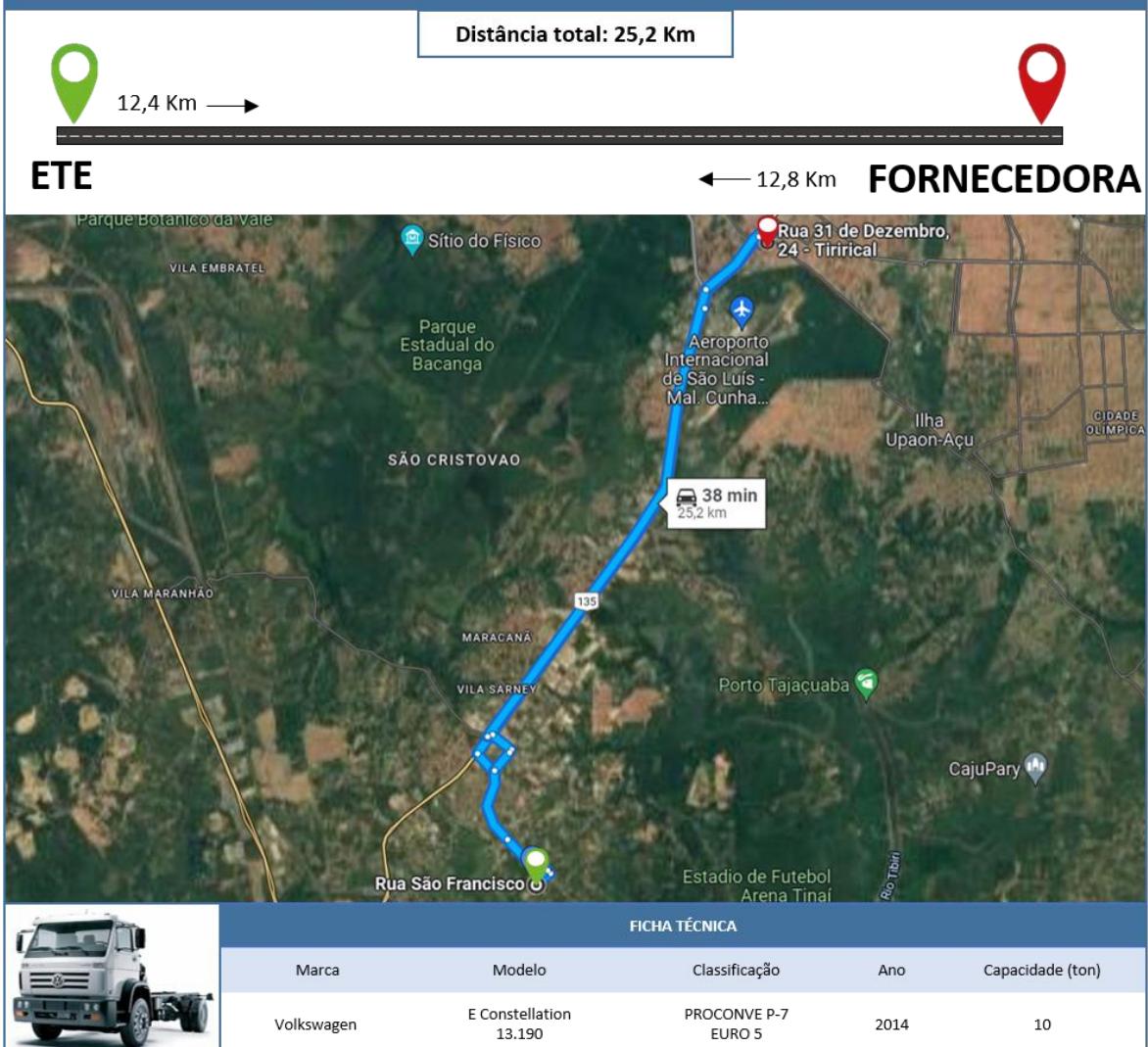
ANEXO 2- ROTAS DE TRANSPORTE



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



ABASTECIMENTO DE NACLO



ANEXO 2- ROTAS DE TRANSPORTE



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



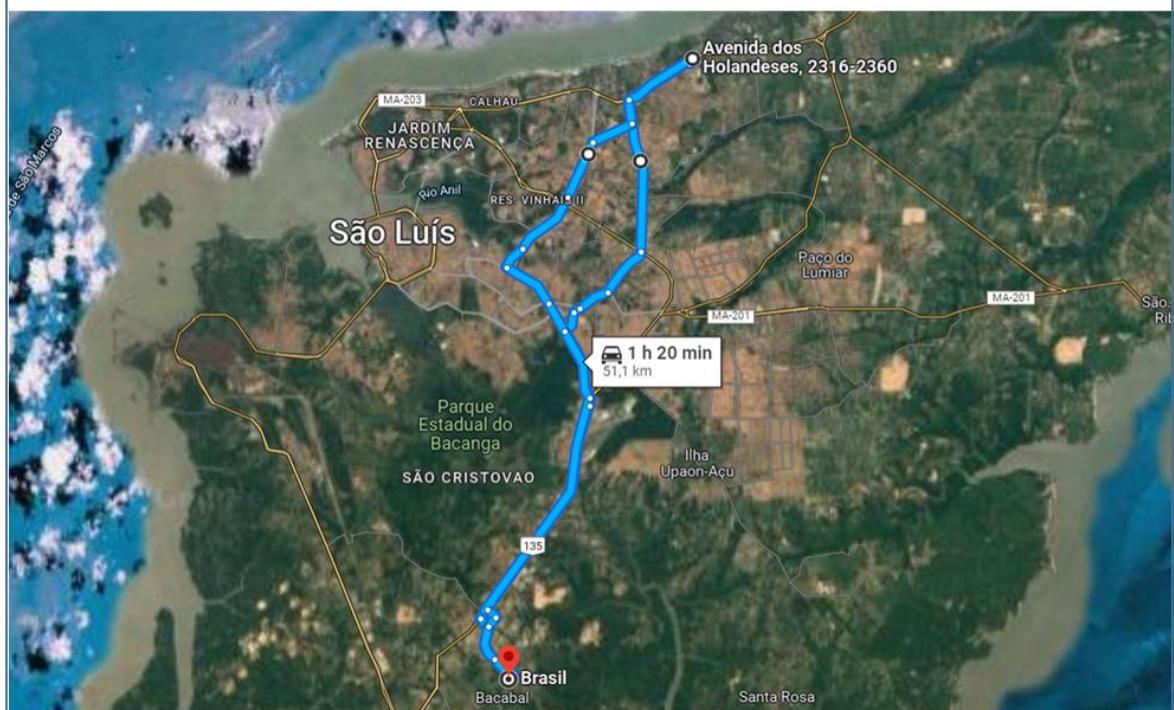
COLETA DE EFLUENTE

Distância total: 50,1 Km



ETE

← 25,1 Km EMPRESA A



FICHA TÉCNICA

Marca	Modelo	Classificação	Ano	Capacidade (ton)
Volkswagen	E Constellation 13.190	PROCONVE P-7 EURO 5	2014	10

ANEXO 2- ROTAS DE TRANSPORTE

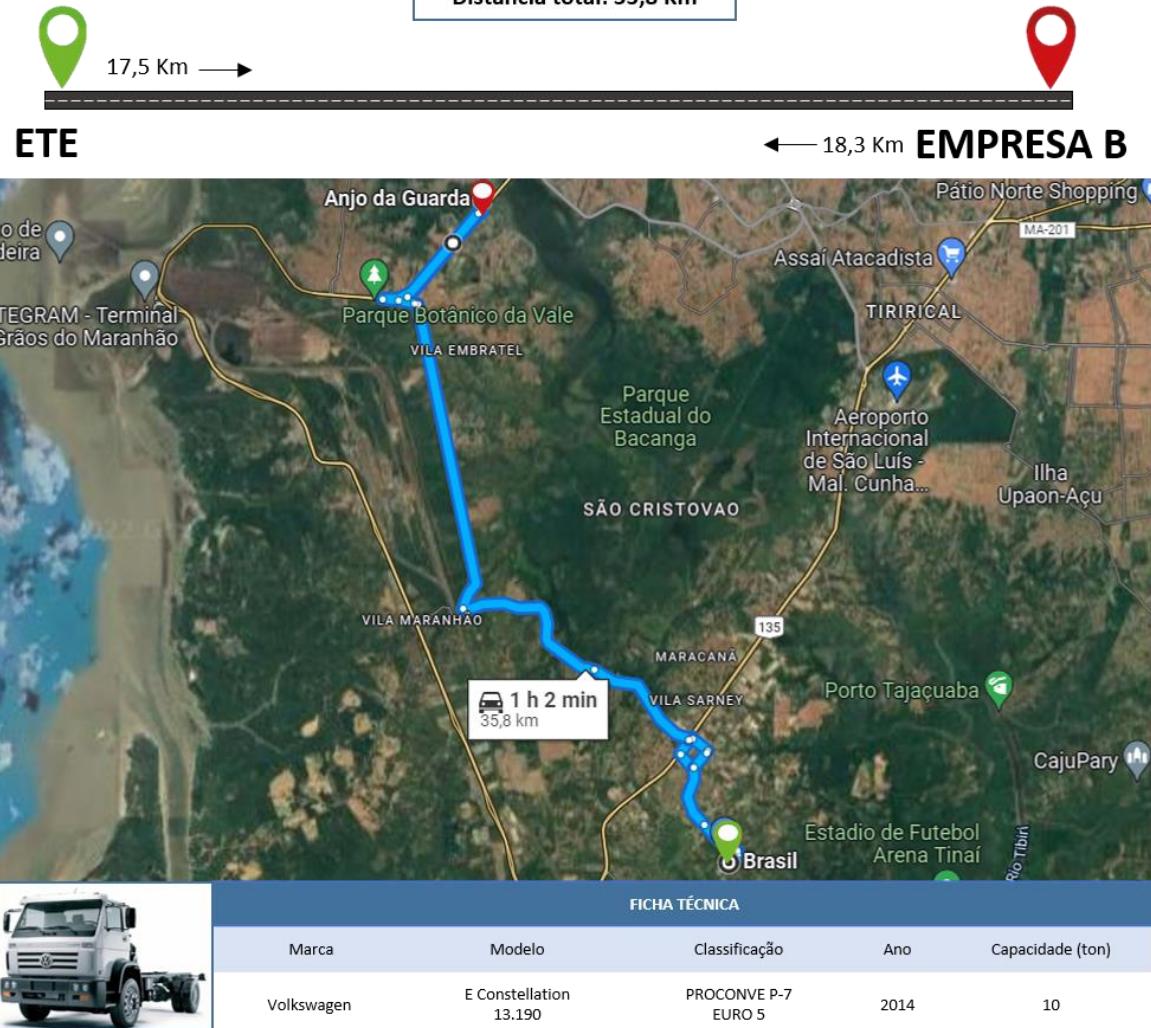


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



COLETA DE EFLUENTE

Distância total: 35,8 Km



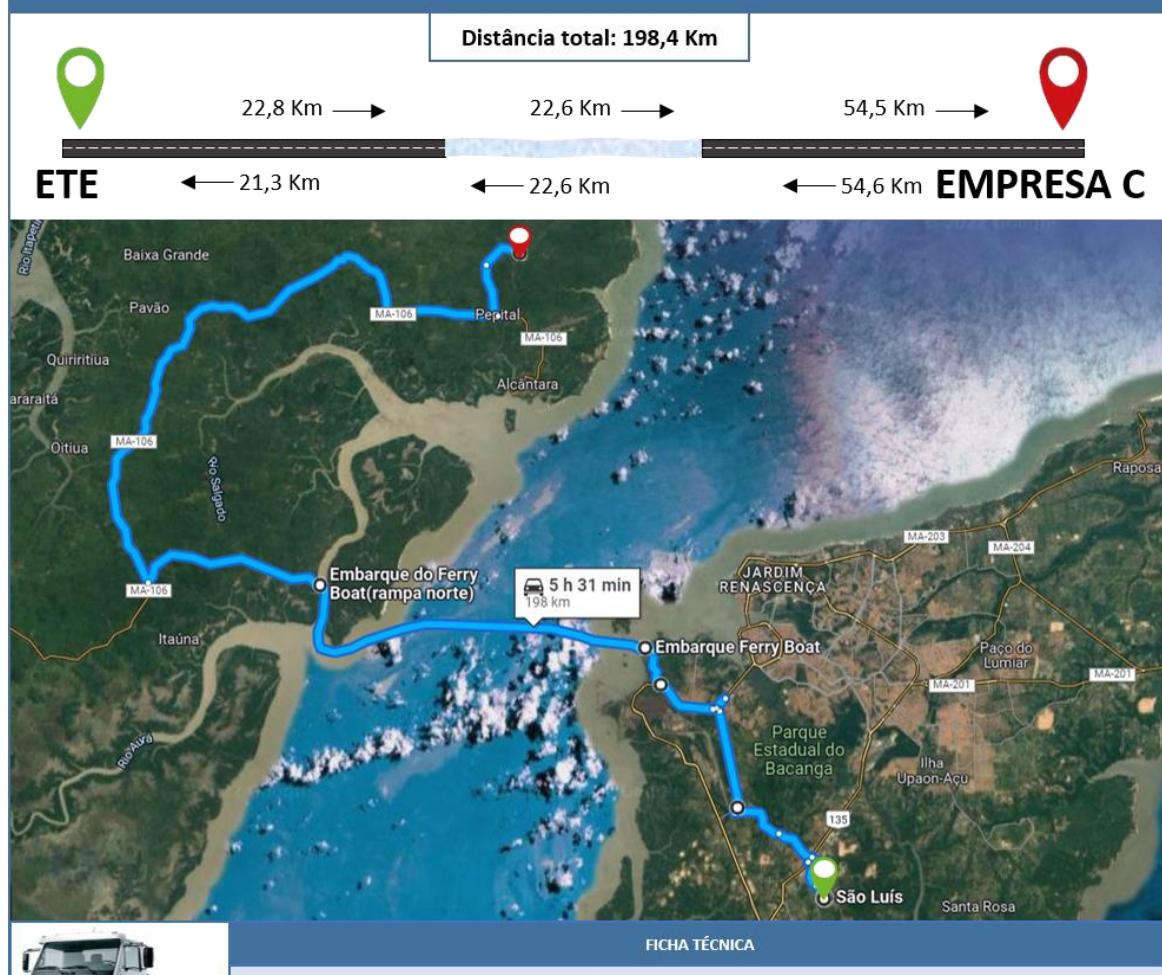
ANEXO 2- ROTAS DE TRANSPORTE



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



COLETA DE EFLUENTE



FICHA TÉCNICA

Marca	Modelo	Classificação	Ano	Capacidade (ton)
Volkswagen	E Constellation 13.190	PROCONVE P-7 EURO 5	2014	10



FICHA TÉCNICA

Tipo	Especificações	Dimensões	Ano	Capacidade (ton)
Ferry Boat	Dupla propulsão 2 motores de 75 HP de potência cada.	Comprimento: 42 m Boca: 12 m Pontal: 2,05 m Calado: 1,86 m	2014	10

ANEXO 2- ROTAS DE TRANSPORTE



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



COLETA DE EFLUENTE

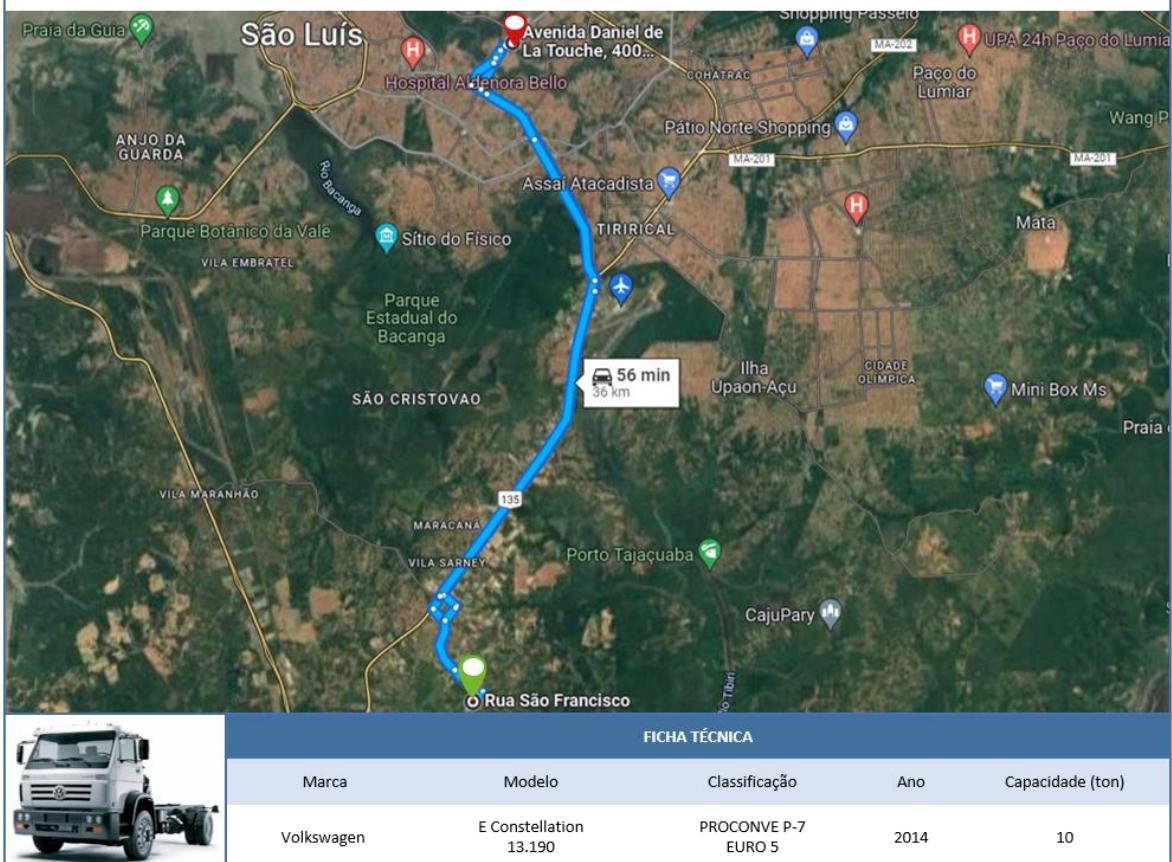
Distância total: 36 Km



17,5 Km →



← 18,5 Km EMPRESA D



ANEXO 2- ROTAS DE TRANSPORTE



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



COLETA DE EFLUENTE

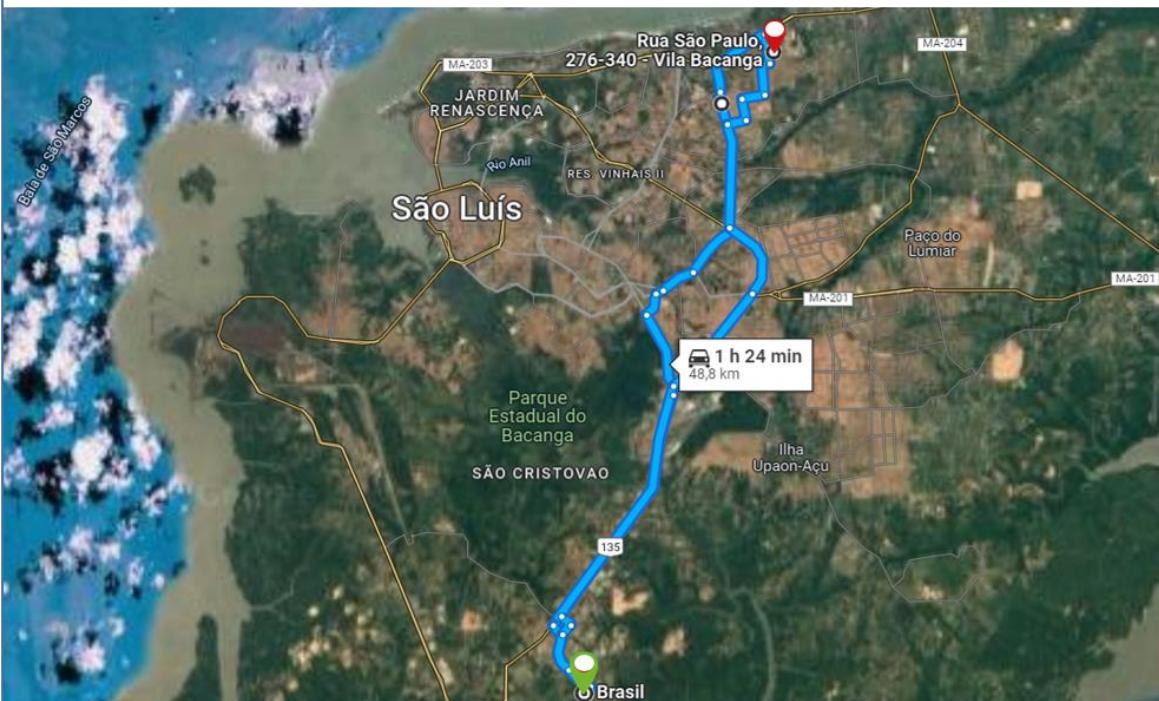
Distância total: 48,8 Km

24,7 Km →

← 24,1 Km EMPRESA E

ETE

EMPRESA E



FICHA TÉCNICA

Marca	Modelo	Classificação	Ano	Capacidade (ton)
Volkswagen	E Constellation 24.280	PROCONVE P-7 EURO 5	20143	20

ANEXO 2- ROTAS DE TRANSPORTE

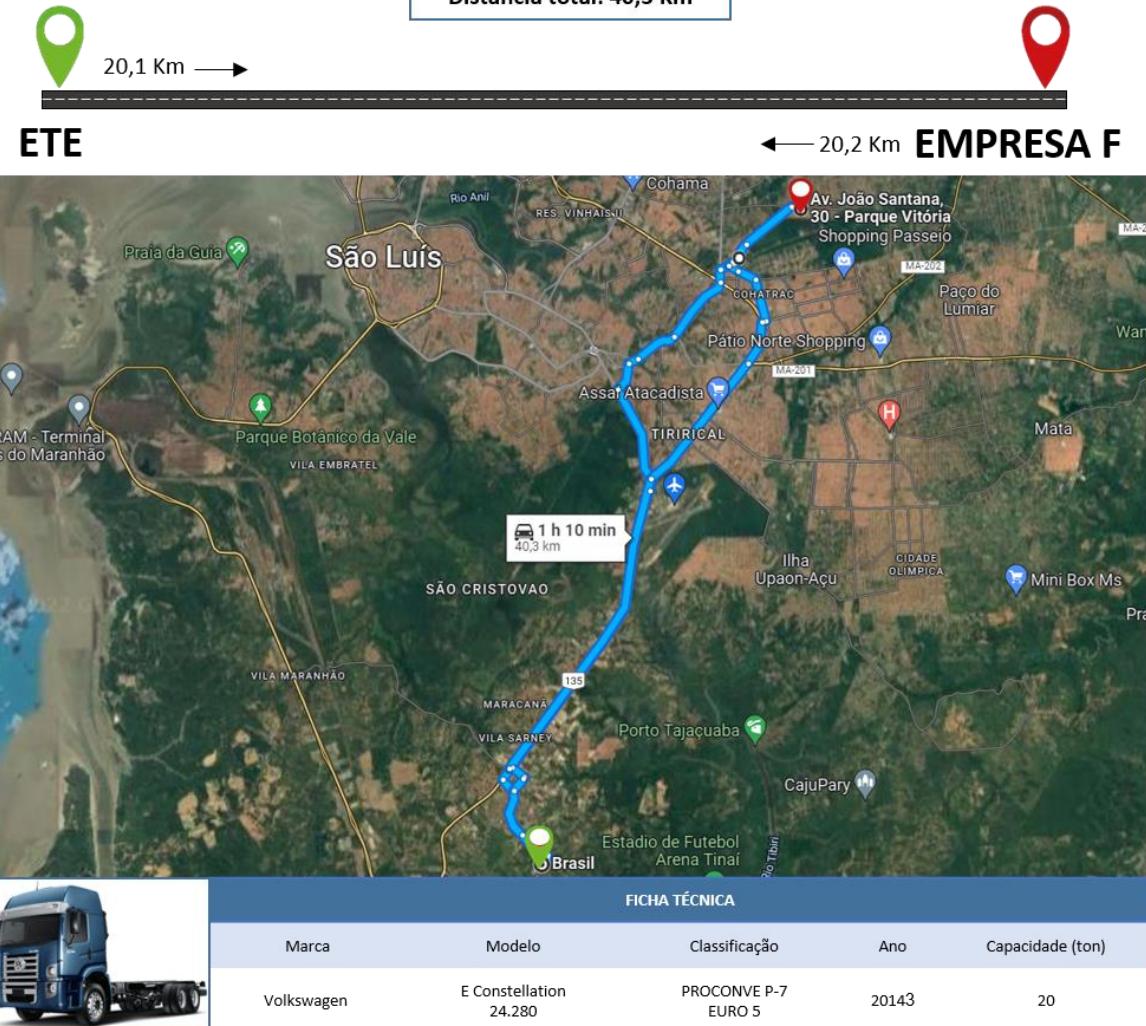


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



COLETA DE EFLUENTE

Distância total: 40,3 Km



ANEXO 2- ROTAS DE TRANSPORTE



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

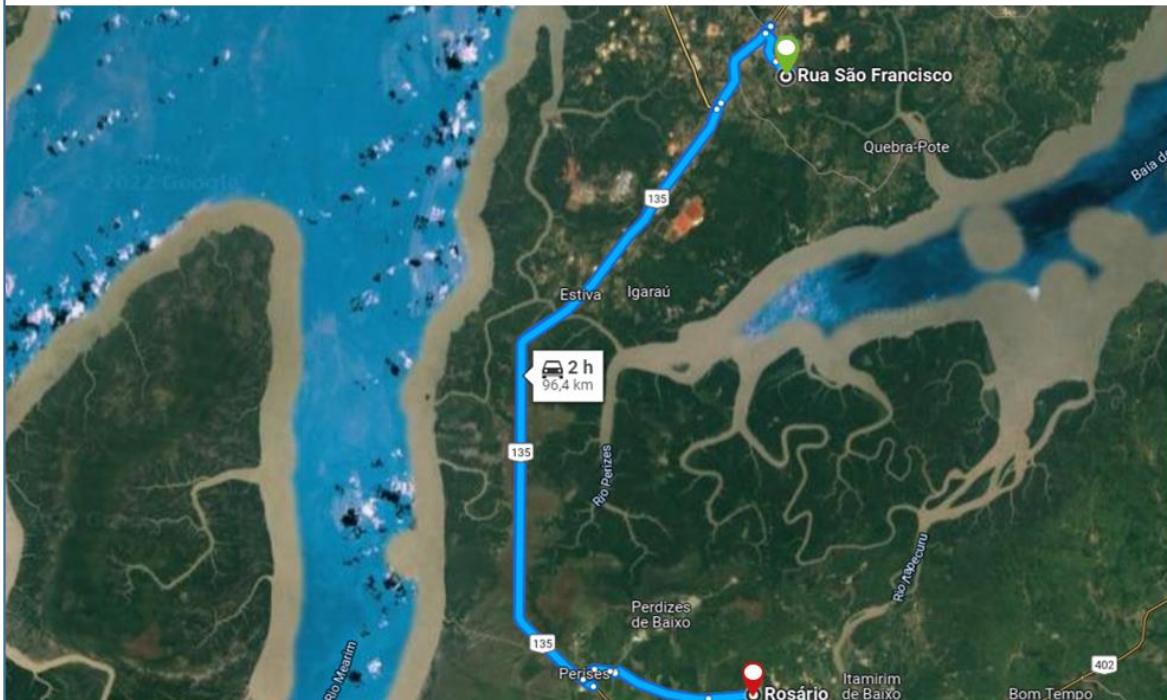


DESTINAÇÃO FINAL

Distância total: 96,4 Km



49,2 Km →

ETE← 47,2 Km **ATERRO**

FICHA TÉCNICA

Marca	Modelo	Classificação	Ano	Capacidade (ton)
Volkswagen	E Constellation 13.190	PROCONVE P-7 EURO 5	2014	10