



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

GUSTAVO JOSÉ DE ARAÚJO AGUIAR

**AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA APLICADA ÀS ATIVIDADES DE
LAVANDERIAS DE JEANS DO ARRANJO PRODUTIVO LOCAL DE
CONFECÇÕES DO AGRESTE DE PERNAMBUCO**

Caruaru
2024

GUSTAVO JOSÉ DE ARAÚJO AGUIAR

**AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA APLICADA ÀS ATIVIDADES DE
LAVANDERIAS DE JEANS DO ARRANJO PRODUTIVO LOCAL DE
CONFECÇÕES DO AGRESTE DE PERNAMBUCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental.
Área de concentração: Tecnologia Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Simone Machado Santos.

Coorientador: Prof. Dr. Gilson Lima da Silva.

Caruaru

2024

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Aguiar, Gustavo José de Araújo.

Avaliação de ciclo de vida aplicada às atividades de lavanderias de jeans do arranjo produtivo local de confecções do Agreste de Pernambuco / Gustavo José de Araújo Aguiar. - Caruaru/PE, 2024.

100f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2024.

Orientação: Simone Machado dos Santos.

Coorientação: Gilson Lima da Silva.

Inclui referências e apêndices.

1. Industria têxtil; 2. Lavanderia de jeans; 3. Análise de ciclo de vida. I. Santos, Simone Machado dos. II. Silva, Gilson Lima da. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

GUSTAVO JOSÉ DE ARAÚJO AGUIAR

**AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA APLICADA ÀS ATIVIDADES DE
LAVANDERIAS DE JEANS DO ARRANJO PRODUTIVO LOCAL DE
CONFECÇÕES DO AGRESTE DE PERNAMBUCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental.
Área de concentração: Tecnologia Ambiental.

Aprovada em: 28/ 02/ 2024.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Simone Machado Santos (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Prof. Dr. Romildo Morant de Holanda (Examinador Externo)
Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFPE

Profa. Dra. Bruna Soares Fernandes (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação a José Modesto Filho (in memoriam), que em vida foi meu maior exemplo de fortitude, simplicidade e bondade ao longo do meu percurso, e em morte tem sido minha luz em dias escuros e noites sem estrelas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelo dom da vida e por me dar a capacidade de colocar pessoas e acontecimentos em meu caminho para que resultaram no que sou hoje, como a realização deste trabalho.

À Selma Medeiros, por ser a mãe que também foi pai por incontáveis vezes, por me amar incondicionalmente apesar de todos os meus defeitos, sendo minha maior apoiadora em todos os aspectos desde o meu nascimento.

À Júlia Aguiar, por ser a irmã que mesmo tendo traços completamente opostos aos meus, tem me aconselhado a e me fornecido afeto e cuidado por praticamente 21 anos, me ensinando indiretamente a ser mais maduro e mais responsável.

À Kátia Dolores e à Avani Modesto, por serem minhas duas outras mães, que mesmo com os sacrifícios e atribulações da vida, nunca deixaram de me fornecer ajuda de todas as formas possíveis e em demasia, até mesmo quando acreditei não necessitar.

Aos meus eternos amigos e irmãos de consideração, Floro e Iálysson, por terem me acompanhado nessa jornada da graduação até o mestrado, entre tantas batalhas, eu não teria chegado tão longe sem vocês. Além de ter o privilégio através de Floro, de conhecer Amanda Albuquerque, que também foi essencial nessa caminhada.

À Ana Feitosa, por ter agregado tanto em minha jornada do mestrado, seja por ter me apresentado a tudo de laboratório, seja por ser a amiga tão próxima que você se tornou.

À Pedro Cunha, por ter compartilhado diversas repúblicas comigo, sendo parceiro durante a graduação até hoje, onde nossos caminhos se cruzam na engenharia.

Aos demais integrantes do LEA, Thais Santos, Francisco Neto, Geowana Laurentino, professora Elizabeth e professora Kênia, por terem contribuído ao longo desse tempo tanto na minha formação acadêmica quanto pessoal, seja por discussões acaloradas quanto por conselhos preciosos.

Aos integrantes do GAMA, como José Vitor, por terem contribuído academicamente ao meu acervo, compartilhando conhecimentos e parceria em publicações acadêmicas.

À professora Simone Machado, por aceitar o desafio que foi este trabalho, e sempre ter me auxiliado em tudo que pode, devo grande parte das minhas capacidades acadêmicas à senhora.

Ao professor Gilson Lima, por ter me acompanhado desde o TCC até a dissertação, sendo impossível a realização deste trabalho e de tantos outros sem sua participação, grato por ter sempre acreditado em meu potencial.

À Banca, Romildo Morant e Bruna Fernandes, por suas contribuições a este trabalho antes, durante e depois da defesa.

Ao Professor Henrique Maranduba, por ter dado todo o apoio na etapa do *software* de Análise de Ciclo de Vida, sendo essencial na construção desta dissertação.

À Jacqueline Macêdo, por ter aberto as portas da indústria têxtil para mim, e ter dado todo a ajuda necessária nas etapas iniciais deste trabalho.

À Letícia Ramos, por ter sido minha fiel companheira acadêmica desde o berço deste projeto, me auxiliando desde as dezenas de litros de efluente da lavanderia, até à centena de tubos de ensaio titulados.

À Júnior, Jucélia, Miguel, Valentina e Emanuel, por serem a outra família que tenho, onde encontro apoio, afeto e amor.

RESUMO

As indústrias têxteis possuem o histórico de serem grandes geradoras de impacto ambiental, devido ao seu elevado consumo de água, produtos químicos e de energia. O Arranjo Produtivo Local de Confeccões do Agreste de Pernambuco (APLCAPE) representa parte considerável da produção de jeans do estado. O processo têxtil tem implicações ambientais e sociais com considerável impacto negativo, como a poluição da água e do ar e a exploração de recursos humanos, especialmente onde a produção é terceirizada em países de mão de obra barata. No caso do APLCAPE os impactos são potencializados pela escassez hídrica da região em que se encontra localizada as lavanderias de beneficiamento de jeans. Por outro lado, para a avaliação de impactos, são utilizados métodos que identificam passivos ambientais já existentes. No caso da Análise de Ciclo de Vida (ACV) os impactos ambientais mencionados anteriormente, podem ser avaliados desde a extração dos recursos naturais até a finalização do produto. Por conseguinte, esse trabalho teve como objetivo caracterizar as etapas do processo de beneficiamento de jeans no intuito de identificar seus aspectos e impactos ambientais. Para tal foi realizado um levantamento de dados, para proposição de um inventário para a atividade. Foi possível avaliar a aplicação dos dados do inventário na análise de ciclo de vida e identificar os níveis das principais categorias de impacto, através da quantificação de produtos químicos, consumo de água e a energia consumida pelos maquinários da lavanderia de jeans, podendo ainda ser identificadas, alternativas viáveis para a minimização desses impactos. Para a caracterização dos efluentes parciais gerados por um beneficiamento de jeans, foram mensurados com uma sonda multiparamétrica. Dentre os resultados encontrados, a bibliometria apresentou que grande parte dos trabalhos utilizou como método de análise de inventário o CML-IA e o ReCiPe, assim como apontou que a China é o país que mais tem estudado acerca do uso de ACV de efluentes têxteis. Também foi observado que a categoria de aquecimento global foi a que teve maior valor absoluto ao longo dos beneficiamentos estudados. Além disso, as etapas de tingimento e de amaciamento com fixador se apresentaram em sua maioria como as mais impactantes, devido ao seu consumo elevado de produtos químicos e alto consumo de energia elétrica. Em relação à comparação entre as metodologias de Avaliação de Inventário de Ciclo de vida, além de algumas flutuações nos valores, percebe-se que o método CML-IA tem maior sensibilidade em relação às categorias relacionadas com a eutrofização e a ecotoxicidade terrestre.

Palavras-chave: indústria têxtil; lavanderia de jeans; análise de ciclo de vida.

ABSTRACT

The textile industries have a history of generating major environmental impacts, due to their high consumption of water, chemical products and energy. The Local Production Arrangement for Clothing in the Agreste of Pernambuco (LPACAP) represents a specific part of the state's jeans production. Despite this, textile processing generates wastewater that is difficult to treat. The textile process has environmental and social implications with specific negative impacts, such as water and air pollution and the exploitation of human resources, especially where production is outsourced in countries with cheap labor. In the case of LPACAP, the impacts are heightened by the water scarcity of the region where the jeans processing laundries are located. On the other hand, to assess impacts, methods are used that identify existing environmental liabilities. In the case of Life Cycle Analysis (LCA), the environmental impacts mentioned above can be assessed from the extraction of natural resources to the finalization of the product. Therefore, this work aimed to characterize the stages of the jeans processing process in order to identify their environmental aspects and impacts. To this end, a data collection was carried out to propose an inventory for the activity. It was possible to evaluate the application of inventory data in life cycle analysis and identify the levels of the main impact categories, through the quantification of chemical products, water consumption and energy consumed by the jeans laundry machinery, which can also be identified, viable alternatives to minimize these impacts. To characterize the partial effluents generated by jeans processing, they were measured with a multiparametric probe. Among the results found, bibliometrics showed that most of the works used CML-IA and ReCiPe as inventory analysis methods, as well as pointing out that China is the country that has studied the most about the use of LCA from textile effluents. It was also observed that the global warming category was the one with the highest absolute value throughout the benefits studied. Furthermore, the dyeing and softening stages with fixative were mostly the most impactful, due to their high consumption of chemical products and high consumption of electricity. Regarding the comparison between Life Cycle Inventory Assessment methodologies, in addition to some fluctuations in values, it is clear that the CML-IA method has greater sensitivity in relation to categories related to eutrophication and terrestrial ecotoxicity.

Keywords: textile industry; jeans laundry; life cycle assessment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Municípios pertencentes ao APLCAPE.	21
Figura 2 – Etapas do ciclo de vida de um produto.	22
Figura 3 – Etapas de uma ACV.	24
Figura 4 – Fluxograma das entradas e saídas de um sistema na análise de inventário de ciclo de vida.	25
Figura 5 – Diferença entre as abordagens de análise midpoint e endpoint	27
Figura 6 – Categorias de impacto e caminhos abordados pela metodologia de CML.	30
Figura 7 – Categorias de impacto e caminhos de dano da metodologia ReCiPe 2016.	32
Figura 8 – Esquema da lavagem por tingimento direto em uma determinada lavanderia de jeans com máquinas por batelada.	34
Figura 9 – Calha do reservatório a montante do tanque de equalização	35
Figura 10 – Lançamento do efluente tratado pelo tanque de decantação após o tempo de retenção.	35
Figura 11 – Preparação dos tubos de ensaio para inserção no bloco digestor.	37
Figura 12 – Cones de Imhoff com efluente em processo de decantação.	38
Figura 13 – Sólidos decantados após o fim do tempo da Análise de Sólidos Sedimentáveis.	38
Figura 14 – Rede de coautoria entre os países de origem dos autores	41
Figura 15 – Rede de citação entre os artigos encontrados nas bases de dados.	42
Figura 16 – Rede de co-ocorrências entre as palavras-chaves usadas pelos autores dos artigos	43
Figura 17 – Categorias de impacto do CML-IA do Tingimento Direto Mostarda.	62
Figura 18 – Categorias de impacto do ReCiPe 2016 <i>Midpoint</i> do Tingimento Direto Mostarda.	63
Figura 19 – Categorias de impacto do CML-IA do Tingimento Direto Preto.	64
Figura 20 – Categorias de impacto do ReCiPe 2016 <i>Midpoint</i> do Tingimento Direto Preto.	64
Figura 21 – Categorias de impacto do CML-IA do Tingimento Direto Verde-militar.	65
Figura 22 – Categorias de impacto do ReCiPe 2016 <i>Midpoint</i> do Tingimento Direto Verde-militar.	66
Figura 23 – Categorias de impacto do CML-IA do Tingimento Reativo Panthone.	69
Figura 24 – Categorias de impacto do ReCiPe 2016 <i>Midpoint</i> do Tingimento Reativo Panthone.	70
Figura 25 – Categorias de impacto do CML-IA da lavagem do Amaciado Simples.	71

Figura 26 – Categorias de impacto do ReCiPe 2016 Midpoint da lavagem do Amaciado Simples.	71
Figura 27 – Categorias de impacto do CML-IA da lavagem Superfashion.	72
Figura 28 – Categorias de impacto do ReCiPe 2016 <i>Midpoint</i> da lavagem Superfashion.....	73
Figura 29 – Comparativo de processos de beneficiamento pelo método CML-IA.	74
Figura 30 – Comparativo de processos de beneficiamento pelo método ReCiPe 2016 <i>Midpoint</i>	74
Figura 31 – Comparativo de ETes pelo método CML-IA.	75
Figura 32 – Comparativo de ETes pelo método ReCiPe 2016 <i>Midpoint</i>	75

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Metodologias de AICV mais utilizadas.....	27
------------------------------------------------------	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Artigos selecionados	45
Tabela 2 – Artigos com maiores citações normalizadas pelos VOSviewer.	55
Tabela 3 – Parâmetros físico-químicos dos efluentes da lavanderia do município de Caruaru/PE.	61
Tabela 4 – Subprocessos do beneficiamento Superfashion.....	67
Tabela 5 – Subprocessos do beneficiamento de Tingimento Reativo.	68
Tabela 6 – Subprocessos do beneficiamento do Amaciado Simples.	68
Tabela 7 – Entrada e saída da ETE e água mista.....	68
Tabela 8 – ICV do processo de tingimento direto mostarda de 1000 kg de tecido.	85
Tabela 9 – ICV do processo de tingimento direto preto de 1000 kg de tecido.	86
Tabela 10 – ICV do processo de tingimento direto verde-militar de 1000 kg de tecido.....	87
Tabela 11 – ICV do processo da ETE durante 30 anos.	88

LISTA DE SIGLAS

AACT	Agência Alemã de Cooperação Técnica
ABIT	Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção
ABNT	Associação Brasileiras de Normas Técnicas
ABRAVEST	Associação Brasileira De Vestuário
ACV	Análise de Ciclo de Vida
AICV	Análise de Inventário de Ciclo de Vida
APLCAPE	Arranjo Produtivo Local de Confecções do Agreste de Pernambuco
CDA	Consumo Diário Aceitável
CE	Condutividade Elétrica
CML	<i>Centrum voor Milieukunde Leiden</i>
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EC-JRC	<i>European Comission – Joint Research Centre</i>
ECNO	Efeito de Concentração Não Observada
ICV	Inventário de Ciclo de Vida
IPCC	<i>Intergovernmental Panel On Climate Change</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
PAC	Potencial de Aquecimento Global
REPA	Resource and Environmental Profile Analysis
SINDILAV	Sindicato Intermunicipal de Lavanderias no Estado de São Paulo
SDT	Sólidos Dissolvidos Totais
SS	Sólidos Sedimentáveis

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	18
2.1	Geral	18
2.2	Específicos	19
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
3.1	Caracterização da tipologia das lavanderias de jeans no contexto brasileiro	19
3.2	Fundamentos da Análise de Ciclo de Vida.....	22
3.3	Estrutura geral da Análise de Ciclo de Vida	24
3.3.1	Definição do objetivo e escopo	24
3.3.2	Análise de inventário.....	24
3.3.3	Avaliação de impacto	25
3.3.4	Interpretação de resultados.....	26
3.4	Metodologias de Avaliação de Inventário de Ciclo de Vida.....	26
3.4.1	CML	28
3.4.2	Eco Indicator 99	31
3.4.3	ReCiPe 2016	31
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
4.1	Estado da arte sobre aplicação de ACV voltada para os efluentes têxteis.....	32
4.2	Escolha das lavanderias de jeans e aplicação dos questionários.....	33
4.3	Roteiro de coleta nas lavanderias	33
4.4	Parâmetros avaliados na caracterização.....	35
4.5	Objetivo e Escopo da Análise de Ciclo de vida.....	38
4.5.1	Unidade funcional	38
4.5.2	Contornos do sistema	39
4.5.3	Categorias de impacto ambiental	39
4.5.4	Limitações, considerações e incertezas.....	39

5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
5.1	Revisão bibliográfica dos artigos com uso do <i>software VOSviewer</i>	40
5.2	Revisão Sistemática sobre análise de ciclo de vida em efluentes gerados pela indústria têxtil	44
5.2.1	Artigos voltados para o tratamento de efluentes têxteis	57
5.2.2	Artigos voltados para a otimização dos processos têxteis	58
5.2.3	Artigos voltados para pegada hídrica na cadeia têxtil	59
5.3	Resultados da lavanderia de jeans do município de Caruaru/PE	60
5.3.1	Parâmetros físico-químicos	61
5.3.1	Análise de ciclo de Vida dos processos da lavanderia de Caruaru/PE	62
5.4	Resultados da lavanderia de jeans do município de Toritama/PE	66
5.4.1	Parâmetros físico-químicos	66
5.4.2	Análise de ciclo de Vida dos processos da lavanderia de Toritama/PE	69
5.5	Comparativos entre as duas lavanderias	73
5.5.1	Impactos totais dos beneficiamentos	73
5.5.2	Comparação de ETEs	74
6	CONCLUSÃO	75
	REFERÊNCIAS	76
	APÊNDICE A - ROTEIRO DE ENTREVISTA PARA AS VISITAS NAS LAVANDERIAS DO APLCAPE	83
	APÊNDICE B – INVENTÁRIOS DE CICLO DE VIDA DAS LAVAGENS PERTENCENTES À LAVANDERIA DE CARUARU/PE	85

1 INTRODUÇÃO

A indústria têxtil é considerada uma das indústrias que mais polui no mundo (Dicuonzo *et al.*, 2020; Garvent, 2017; Shen, 2014; IPCC, 2014). Os processos têxteis causam a degradação do meio ambiente, desde a extração das matérias primas até o acabamento de seus produtos, à medida que consomem elevadas quantidades de energia, água e produtos químicos (Zamani, 2011; Saxena, Raja & Arputharaj, 2017). Shen *et al.* (2017) apontam que a indústria têxtil causa implicações ambientais e sociais negativas consideráveis, como a poluição da água e do ar e a exploração de mão de obra, principalmente em países desenvolvimento e onde a produção é terceirizada. Behera *et al.* (2021) destacam que para a produção de 8.000 kg de produtos têxteis, são necessários em média 16.000 m³ de água durante o processo, o que evidencia o grande consumo de água na indústria têxtil. Devido a esse grande consumo de água, estima-se que cerca de 280 mil toneladas de corantes têxteis sejam descarregadas mundialmente por ano através das águas residuárias (Zainith *et al.*, 2016), sendo esses produtos alguns dos principais contaminantes presentes no efluente têxtil (Nor *et al.*, 2021). Essas águas residuárias, sem o seu devido tratamento, podem causar grandes impactos no meio ambiente (Holkar *et al.*, 2016).

As águas residuárias originárias da atividade têxtil possuem elevadas concentrações de Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO). A etapa de tingimento, particularmente, é um dos processos de maior impacto negativo, devido à presença de cor no efluente que implica em um impacto visual nas estações de tratamento de esgoto e nos corpos d'água receptores (Bell *et al.*, 2000; Lee & Pavlostathis, 2004; Novotny *et al.*, 2006; Saini, 2017). A ação dos corantes têxteis em corpos receptores impede a atividade fotossintética do meio, o que resulta em um impacto na qualidade da água devido à redução do oxigênio dissolvido, além de gerarem efeitos nocivos sobre a vida aquática (Lalnunhlimi & Krishnaswamy, 2016).

Ao observar o Arranjo Produtivo Local de Confecções de Pernambuco (APLCAPE), é notável a importância do conjunto por constituir 17% do total de peças de jeans produzidas no Brasil no ano de 2019, o que resultou em cerca de 60 milhões de produtos naquele ano (ABRAVEST, 2020), tornando Pernambuco o estado que mais produziu jeans no país. A Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (ABIT), em 2019, mostrou um estudo em que o Brasil se encontra em quarto lugar entre os maiores produtores e consumidores de denim do mundo, o que evidencia a importância do APLCAPE para a economia do estado e para o país (ABIT, 2019).

O fato do APLCAPE se encontrar no Nordeste que é uma região com escassez hídrica, acaba por agravar seu impacto no meio ambiente. O fato do APLCAPE se encontrar no Nordeste que é uma região com escassez hídrica, acaba por agravar seu impacto no meio ambiente. Mesmo com a Agência Estadual de Meio Ambiente (CPRH) regulamentando o funcionamento das lavanderias de jeans via licença ambiental e padrões de lançamento de efluentes em corpos hídricos, seguindo a instrução normativa N°003/2022 (CPRH, 2022), existe uma parcela de lavanderias que funcionam de forma irregular. Isso é constatado no trabalho de Silva Filho (2021), onde apenas 27% das lavanderias levantadas na cidade de Caruaru/PE possuem licenciamento ambiental fornecido pela CPRH. Isso resulta em um lançamento inadequado de efluentes nos corpos hídricos da região, que são usados como mananciais de abastecimento de água para a população local.

Uma das ferramentas que podem ser utilizadas para mensurar os impactos ambientais mencionados é a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), que é um método eficaz para a avaliação de impacto e que tem o intuito de compreender os ciclos e determinar medidas de interação entre os processos de um produto (Gianetti e Almeida, 2006; Hauschild, Rosenbaum & Olsen, 2018). O uso da ACV permite avaliar o impacto ambiental desde a extração da matéria prima, no processo de manufatura, uso e destinação final de um produto (ABNT, 2009a).

Diversos estudos de ACV apontam como principais fontes de impacto ambiental o consumo e a geração de energia (Van Der Werf e Turunen, 2008; Shen e Patel, 2008; Steinberg *et al.*, 2009; Shen *et al.*, 2010). Entretanto, não há muitos estudos que avaliaram os impactos ambientais dos processos parciais de uma lavagem de jeans (Luo, Wu e Ding, 2022; Gonzalez, Lou e Chi, 2023; Jamshaid *et al.*, 2023) O que permitiria um estudo mais detalhado dos impactos ambientais ocasionados pelo processo de beneficiamento. Dessa forma, o intuito deste trabalho é realizar a análise de ciclo de vida dos efluentes parciais das lavagens mais utilizadas de duas lavanderias jeans do APLCAPE, a fim de identificar formas de minimização dos impactos ambientais resultantes.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Elaborar um inventário para proposição de ACV em lavanderias de jeans, como ferramenta integradora de processos, visando apoiar o desenvolvimento tecnológico, econômico e ambiental para o setor.

2.2 Específicos

- Caracterizar os subprocessos do beneficiamento de jeans pré-definidos das lavanderias;
- Levantar dados para proposição de um inventário para a atividade;
- Avaliar a aplicação dos dados do inventário na análise de ciclo de vida;
- Comparar os métodos de análise de inventário de ciclo de vida CML-IA e ReCiPe *Midpoint* 2016;
- Identificar os níveis das principais categorias de impacto;
- Identificar os aspectos e impactos decorrentes do processo de beneficiamento;
- Definir alternativas viáveis para a minimização dos impactos;

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Caracterização da tipologia das lavanderias de jeans no contexto brasileiro

O aumento do impacto ambiental causado pela indústria de moda pode ser associado ao crescimento substancial de vestimentas e da produção têxtil. A produção global *per capita* de têxteis passou de 5,9 kg para 13 kg por ano no período de 1975 a 2018 (Peters, Sandin e Spak, 2019). A crescente globalização e fragmentação dificultaram a avaliação precisa desses impactos ambientais, devido à incerteza no fornecimento de matéria-prima e processamento (Karaosman *et al.*, 2018).

O conceito de poluição ambiental também está definido na Lei nº 6.938/1981, que a descreve como qualquer degradação recorrente de atividades que, direta ou indiretamente, e afetem, negativamente: a saúde, a segurança e o bem-estar da população; ou que gerem situações desfavoráveis às atividades sociais e econômicas; ou que prejudiquem a biota; ou que prejudiquem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente; ou a realização de lançamento de matérias ou energia acima dos padrões ambientais e limites legais estabelecidos.

Entretanto, técnicas de controle vem sendo cada vez mais refinadas, como é o caso de ações e programas que usem tecnologias mais limpas. Essas medidas vêm substituindo o uso de tecnologias de tratamento e de disposição de águas residuárias, tendo como foco diminuir os resíduos nas diversas etapas do processo produtivo.

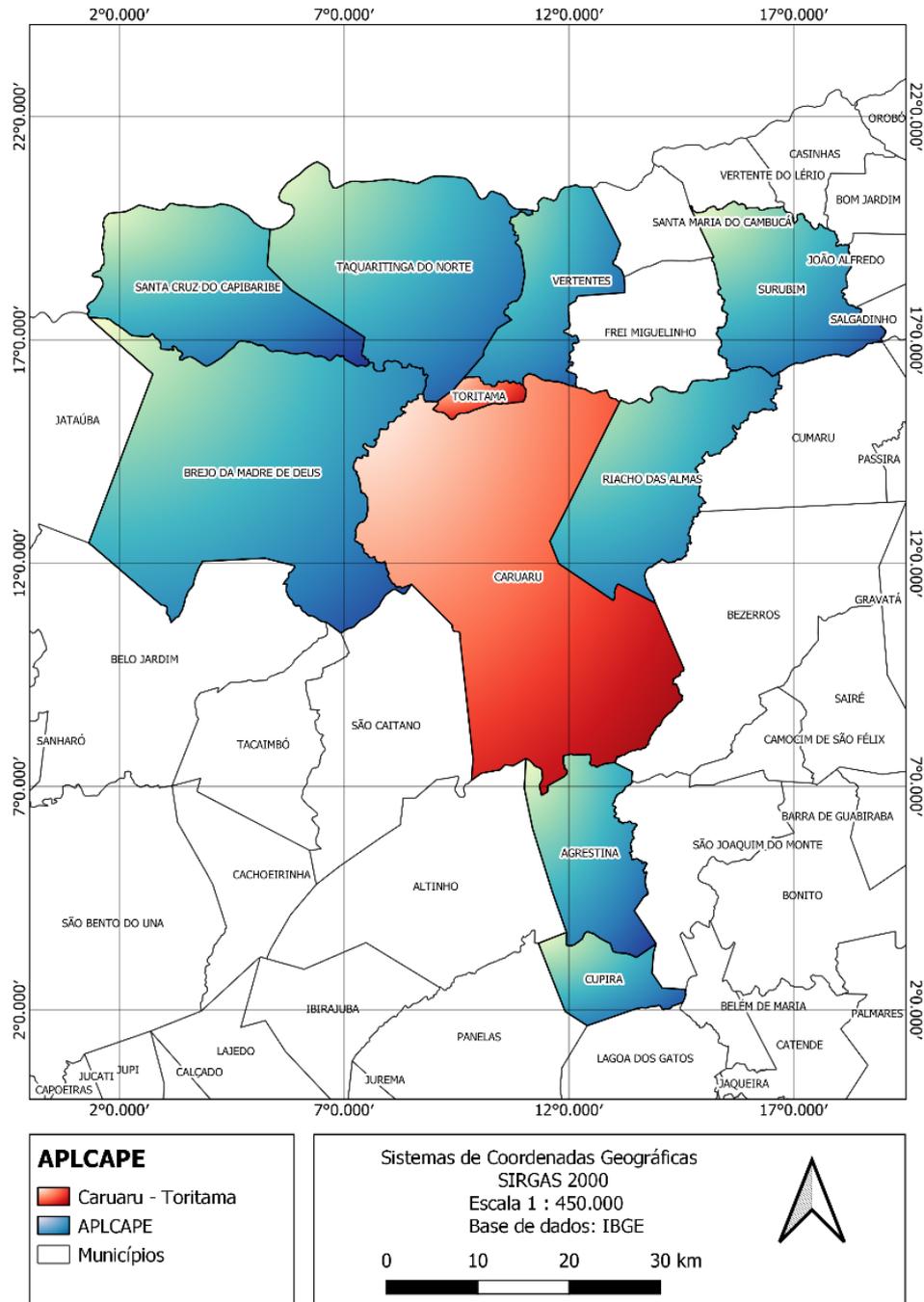
A comercialização do jeans no país foi iniciada na década de 1960 pela empresa Santista Têxtil, com finalidade de uso para os trabalhadores do campo. A confecção do jeans é realizada através da etapa de tingimento dos fios. No Brasil existem cerca de 8.000 lavanderias, onde 6.000 são de natureza doméstica e 2.000 são industriais. Nesse setor, 58.000 empregos

são gerados no país. O estado de São Paulo detém cerca de 5.225 lavanderias, com 70% delas na capital. No ano de 2018, o faturamento gerado pelo setor foi de aproximadamente R\$5.976.000.000,00 (SINDILAV, 2022).

As atividades das lavanderias de jeans na região do agreste pernambucano foram iniciadas nos anos de 1980, no município de Toritama, no qual em seguida foram difundidas para Caruaru e demais municípios (Figura 1). O aparecimento desses empreendimentos produtivos foi resultado de dois fatores principais: (1) A influência da mídia na divulgação da calça jeans desgastada, chamada popularmente como “estonada” em comerciais e na vestimenta de personagens de televisão; (2) A oportunidade de negócio, através da prestação de serviços para facções e fabricos de jeans (Pereira, 2018).

Durante os anos 2000, os proprietários das lavanderias de jeans enfrentaram o fechamento de diversas unidades na região por ação do Ministério Público, devido a denúncias de contaminação no sistema de galerias pluviais pelos efluentes do processo de beneficiamento de jeans. Estes rejeitos eram lançados na maioria dos casos no Rio Capibaribe e na via pública sem nenhum tratamento adequado. Os produtos químicos presentes nos resíduos originários das lavagens ocasionavam uma coloração azul escura à água (Almeida, 2013). Além disso, também havia a geração de fumaça decorrente do uso dos fornos de caldeira das lavanderias que era outra fonte poluidora, sem contar o risco de explosões.

Figura 1 – Municípios pertencentes ao APLCAPE.



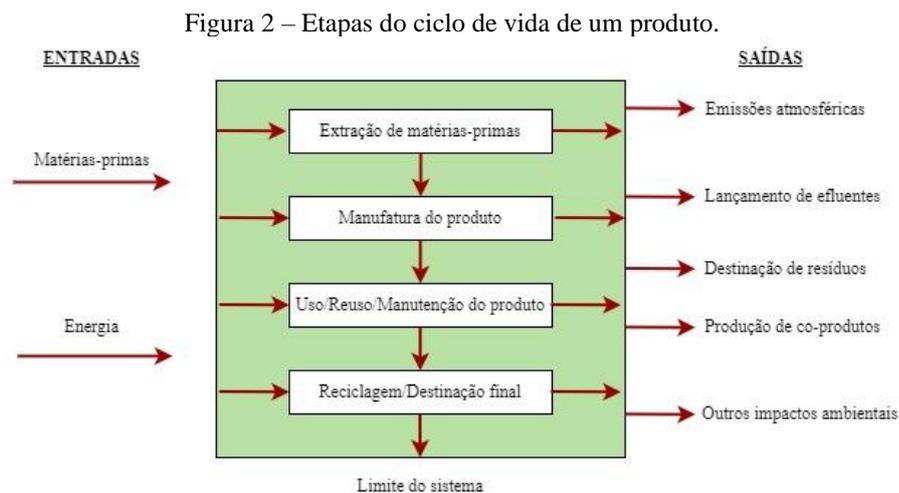
Fonte: O Autor (2024).

3.2 Fundamentos da Análise de Ciclo de Vida

A Análise de Ciclo de Vida (ACV) tem como artigo seminal a publicação elaborada por Harold Smith na World Energy Conference no ano de 1963. O trabalho de Harold Smith comparou diferentes embalagens de refrigerante no intuito de determinar qual apresentava melhor desempenho ambiental através da preservação dos recursos naturais.

A partir da década de 1990 a primeira norma da *International Organization for Organization* (ISO) que faz parte das séries de normas ISO 14040 foi editada. A tradução lançada no Brasil em 2001 foi o ponto inicial para o uso de ACV pelas empresas como técnica de estratégia organizacional.

Na Figura 2 são esquematizadas as etapas de ciclo de vida de um produto, assim como suas entradas e saídas generalizadas.



Fonte: O Autor (2024).

A ACV tem como principal fim a comparação dos diversos danos ao meio ambiente e a sociedade gerados aos produtos e/ou serviços que estão sendo considerados, determinando qual destes tem menor impacto negativo. A ACV também pode ser usada como parâmetro na tomada de decisões relacionadas a execução de determinado produto ou processo, ao permitir a compreensão ampla dos diversos impactos ambientais associados ao meio ambiente e à saúde humana (Kaab *et al.*, 2019; Mistretta *et al.*, 2019).

A Norma ISO 14040 (ISO, 2006) apresenta que o escopo de um estudo de ACV necessariamente exponha de forma precisa a aplicação, as motivações para o início do estudo e ao público alvo, este último sendo a quem receberá os resultados da análise.

Para a ACV, existem duas formas de abordagem para a ACV:

- **ACV Atribucional (*attributional LCA*):** Quantifica a parte dos impactos globais relacionados aos produtos em análise (Schaubroeck *et al.*, 2021). Os impactos ambientais de cada produto são definidos pelo estudo do sistema de produção através de dados médios representativos (Majeau-Bettez *et al.*, 2018).
- **ACV Consequencial (*consequential LCA*):** Tem como foco a modelagem das mudanças relativas em toda a esfera tecnológica em que a ACV foi usada como suporte de decisão. Essa abordagem fornece informação sobre os impactos ambientais tanto diretos quanto indiretos que acontecem devido às mudanças na demanda de um produto devido à essas mudanças (Schaubroeck *et al.*, 2021).

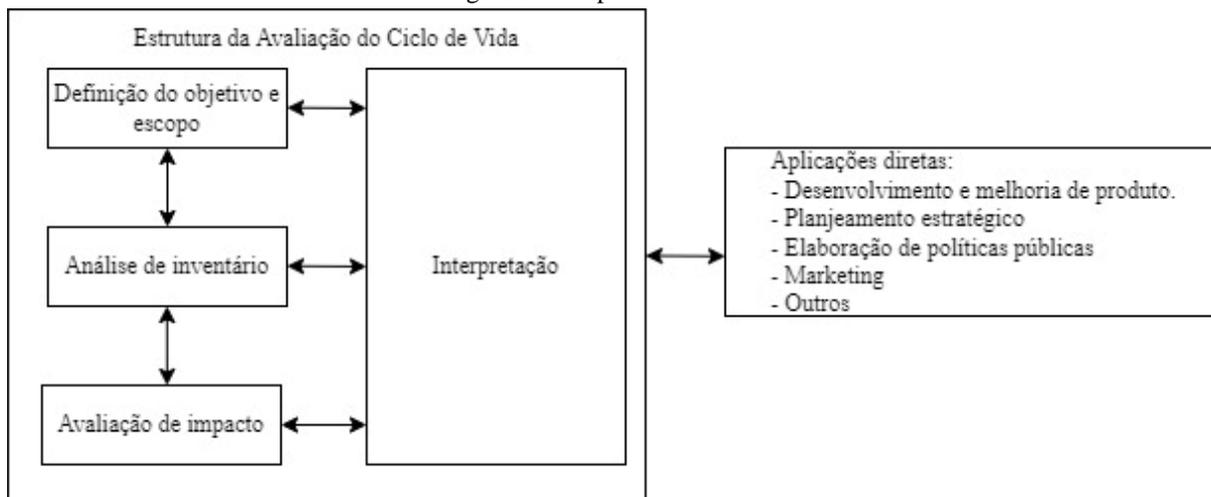
A ACV possui diversas variantes quanto ao tipo de análise do produto. Essas variantes são definidas como:

- ***From-cradle-to-grave (do berço ao túmulo)*:** A análise é realizada desde a extração das matérias-primas (berço), passando pela etapa de utilização e por fim a etapa de destinação final (túmulo), as entradas e saídas são levadas em consideração ao longo de todo o ciclo de vida;
- ***From-cradle-to-gate (do berço ao portão)*:** A análise é realizada contabilizando desde o consumo dos recursos (berço) até da realização do transporte (portão). A etapa de utilização e a de destinação final do produto são desconsideradas nessa variante. O uso desse tipo de análise é comum para a declaração ambiental de um produto;
- ***From-cradle-to-cradle (do berço ao berço)*:** Nessa variante a etapa de destinação final é ajustada para um procedimento de reciclagem. Esse método é usado para reduzir o impacto ambiental dos produtos por meio da produção, operação e práticas de destinação final de forma sustentável, agregando a responsabilidade social na produção do produto;
- ***From-gate-to-gate (do portão ao portão)*:** É uma avaliação parcial de apenas um valor agregado dentro de toda a cadeia produtiva. Além disso, há a possibilidade futura desse tipo de análise ser conectada com a cadeia de produção para elaborar uma análise de berço ao portão como um todo;
- ***From-well-to-wheel (do poço à roda)*:** Representa o estudo específico onde apenas o transporte de combustíveis, veículos e motores.

3.3 Estrutura geral da Análise de Ciclo de Vida

As etapas de uma ACV podem ser definidas por: Definição do objetivo e escopo, análise do inventário, avaliação do impacto e interpretação (Figura 3). Essas 4 etapas são necessárias para que a ACV seja realizada de maneira eficiente, e estão descritas nas séries padrão ISO (ISO, 2006; ISO, 1998; ISO, 2000a; ISO, 2000b), que serão discutidas nas subseções a seguir.

Figura 3 – Etapas de uma ACV.



Fonte: Adaptado de ISO (2006).

3.3.1 Definição do objetivo e escopo

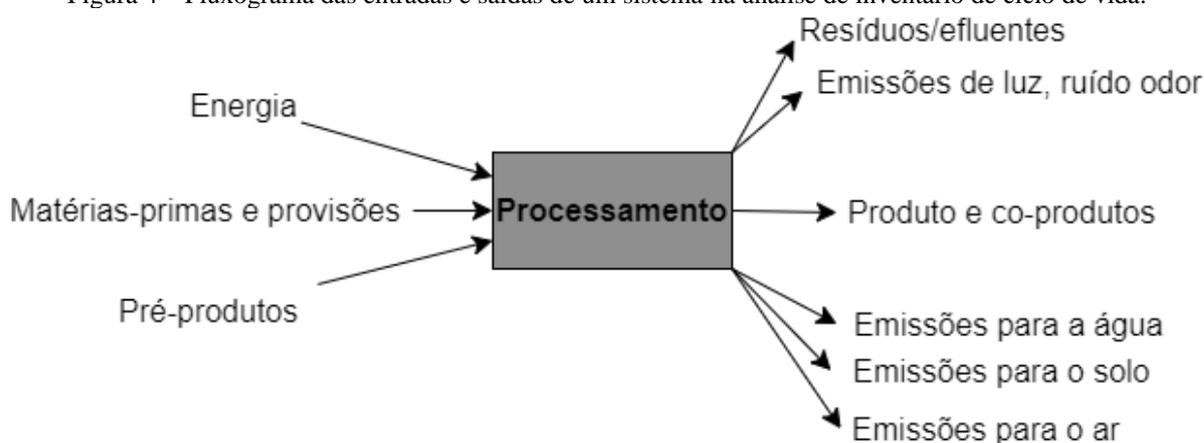
Objetivo e escopo representam o primeiro passo para o processo de análise de Ciclo de Vida. Nessa etapa, é definido o produto a ser analisado, bem como o contexto em que a análise será feita. A avaliação de impacto sofre grande influência do objetivo e do escopo, uma vez que diversos parâmetros são definidos nessa etapa inicial, como o tempo e os recursos necessários, o propósito do estudo, a aplicação pretendida, a metodologia de análise, os limites do sistema, e as considerações gerais e limitações. Dessa forma, a definição do objetivo e escopo servirá como referência em todo o processo de ACV para garantir que os resultados mais relevantes sejam obtidos (ISO, 1998).

3.3.2 Análise de inventário

Nessa etapa é gerada uma lista contendo a quantidade dos materiais e da energia consumida ao longo das diferentes etapas de ciclo de vida de um produto. Além disso, a análise de inventário apresenta as entradas e saídas para a natureza, através do detalhamento dos materiais relacionados e dos fluxos de energia do produto (ISO, 1998; CURRAN, 2006; EC-JRC, 2010a). A Figura 4 mostra que o Inventário de Ciclo de Vida (ICV) depende das diferentes

quantidades de matérias-primas (como a água, a energia, entre outros), dos materiais que foram usados na fabricação do produto, do que foi consumido durante o transporte (combustíveis), da forma em que o produto é utilizado ao longo do seu tempo de vida, e da forma que o produto é descartado ao final do seu ciclo de vida. Esses fatores podem mudar de uma região para outra, como é o caso de diferentes formas de produzir certos materiais ou diferentes formas consumo de energia (renováveis ou não renováveis). Tais diferenças afetam as considerações e limitações do estudo de ACV em questão.

Figura 4 – Fluxograma das entradas e saídas de um sistema na análise de inventário de ciclo de vida.



Fonte: Adaptado de Cirotto *et al.* (2019).

3.3.3 Avaliação de impacto

Essa etapa é relativa a interpretação e posterior transformação da lista do ICV que possui as quantidades de materiais e energia consumida de determinado produto em indicadores de impacto que sejam entendíveis. A função desses indicadores é relativa a expressão do grau de contribuição das categorias de impacto ao meio ambiente. A ISO 14042 (ISO, 2000a) contém diversas etapas que devem ser realizada para a definição desses indicadores, sendo alguns obrigatórios e outros opcionais. Dentre essas etapas, podem ser citadas:

a) Definição e classificação das categorias de impacto

As categorias de impacto são escolhidas de forma que descrevam os impactos causados pelas emissões e o consumo de recursos naturais que fazem parte da produção, uso e descarte de um determinado produto. Grande parte das metodologias de Inventário de Ciclo de Vida (AICV) considera que as emissões e o consumo de matérias-primas são atribuídos a três áreas essenciais de proteção: Qualidade do ecossistema, saúde humana e recursos naturais.

3.3.4 Interpretação de resultados

Essa etapa é caracterizada pela interpretação dos resultados da análise de impacto, seguida pela elaboração de conclusões que serão usadas como base para o processo de tomada de decisão. Os problemas ambientais de maior impacto são identificados e o cálculo da significância das contribuições relativas dos componentes de determinado produto ou processo para o meio ambiente.

3.4 Metodologias de Avaliação de Inventário de Ciclo de Vida

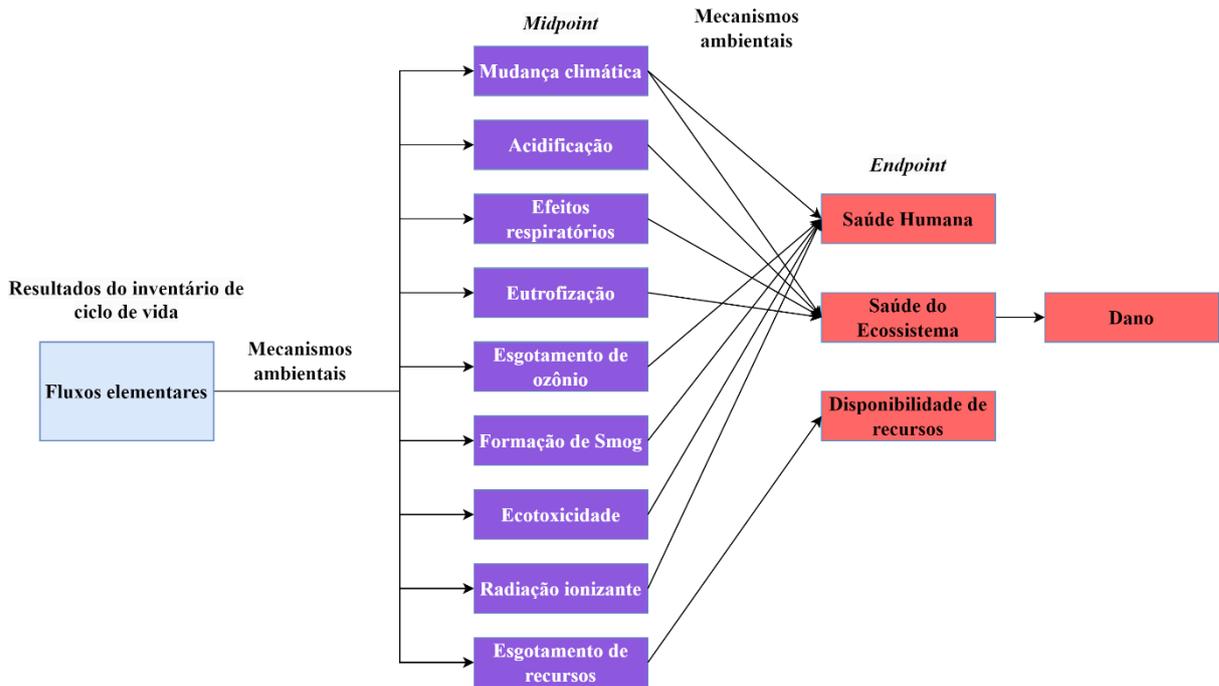
A avaliação de Inventário de Ciclo de Vida (AICV) em uma ACV é a etapa de maior importância do estudo, devido ao número elevado de dados que são gerados nos resultados da análise de inventário. De acordo com Menoufi (2011), os resultados do inventário são convertidos em indicadores de impacto com categorias de impacto após passarem através de uma modelagem ambiental complexa baseada em ciência ambiental e natural (caracterização e normatização). Segundo o mesmo autor, algumas metodologias foram desenvolvidas para simplificar e otimizar o processo de AICV devido a sua complexidade. As metodologias de AICV são formas de relacionar os resultados do ICV com os impactos ambientais associados. Os resultados do inventário são classificados em categorias de impacto, cada uma associada a um indicador de categoria. Em suma, as metodologias de AICV são usadas para simplificar as comparações e trocas entre diferentes alternativas de produtos, o que torna o processo para os pesquisadores em ACV menos complexo e também permite o *benchmarking*. Existem duas diferentes formas de abordagens para a caracterização de um indicador de impacto: a abordagem *midpoint* e a abordagem *endpoint*, a primeira sendo focada em modelar os impactos usando um indicador alocado ao longo do mecanismo metodológico, mas anterior as categorias *endpoint*; e a segunda é relativa à modelagem de todo o mecanismo metodológico até chegar às categorias *endpoint* das áreas de proteção, que geralmente são a qualidade do ecossistema, a saúde humana e os recursos.

Com isso, os indicadores de categoria podem ser alocados em um determinado ponto que esteja entre os resultados do ICV e as categorias *endpoint*, que é onde ocorre os efeitos ambientais, na corrente de causa e efeito. As duas principais escolas de metodologias foram desenvolvidas nesse contexto.

- **Métodos clássicos de análise de impacto:** Voltados para os problemas, esses métodos de análise reduzir a modelagem quantitativa aos estágios iniciais da corrente de causa e efeito e agrupam os resultados do ICV em categorias *midpoint* por temas, estes que são mecanismos comumente aceitos para agrupar subcategorias de impacto.

- **Métodos orientados ao dano:** Os modelos de análise de impacto de causa e efeito se interligam ao *endpoint*, ou seja, relativos aos danos causados nas diferentes áreas de proteção consideradas no estudo. Na Figura 5 é exposta de forma esquemática a diferença entre as abordagens de análise *midpoint* e *endpoint*.

Figura 5 – Diferença entre as abordagens de análise midpoint e endpoint



Fonte: Adaptado de Algren, Wendy e Landis (2021).

Em suma, os métodos que se baseiam nas mudanças iniciais na corrente de causa e efeito são métodos *midpoint*. Por outro lado, os métodos de *endpoint* ou de dano são relativos a mudanças mais tardias no mecanismo ambiental. No Quadro 1 são apresentadas as metodologias mais utilizadas de Análise de Inventário de Ciclo de Vida, em que são apresentados a abordagem de modelo utilizada por cada metodologia (*midpoint*, *endpoint* ou combinada) e suas respectivas categorias de impacto.

Quadro 1 – Metodologias de AICV mais utilizadas

Metodologia	Categorias de impacto ou de dano	Áreas de proteção
CML (<i>midpoint</i>)	Categorias de impacto obrigatórias: Depleção de recursos abióticos, competição de terras, mudanças climáticas, esgotamento de ozônio estratosférico, natural, meio	Saúde humana, meio ambiente

<p>Eco Indicator 99 (<i>endpoint</i>)</p>	<p>toxicidade humana, ecotoxicidade aquática de água doce, ecotoxicidade aquática marinha, ecotoxicidade terrestre, formação de foto-oxidantes, acidificação e eutrofização.</p> <p>Categorias de impacto opcionais: Perda da função de suporte à vida, perda de biodiversidade, ecotoxicidade de sedimentos de água doce, ecotoxicidade de sedimentos marinhos, impactos de radiação ionizante, ar fétido, ruído, calor residual, fatalidades, letal, não letal, esgotamento de recursos bióticos, dessecação e água malcheirosa.</p> <p>Mudanças climáticas, esgotamento da camada de ozônio, acidificação, eutrofização, carcinogênico, efeitos respiratórios, radiação ionizante, ecotoxicidade, uso da terra, recursos minerais, recursos fósseis.</p>	<p>ambiente artificial e recursos humanos.</p> <p>Saúde humana, ecossistema e recursos.</p>
<p>ReCiPe (Combinado)</p>	<p>Midpoint: Aquecimento global, esgotamento do ozônio estratosférico, acidificação terrestre, eutrofização de água doce, eutrofização marinha, toxicidade humana, formação de ozônio troposférico, formação de material particulado, ecotoxicidade terrestre, ecotoxicidade de água doce, ecotoxicidade marinha, radiação ionizante, uso/transformação da terra, uso de água, recursos minerais, combustíveis fósseis.</p> <p>Endpoint: Danos à saúde humana, danos à diversidade do ecossistema e danos à disponibilidade de recursos.</p>	<p>Saúde humana, ecossistema e recursos.</p>

Fonte: Adaptado de MENOUI (2011).

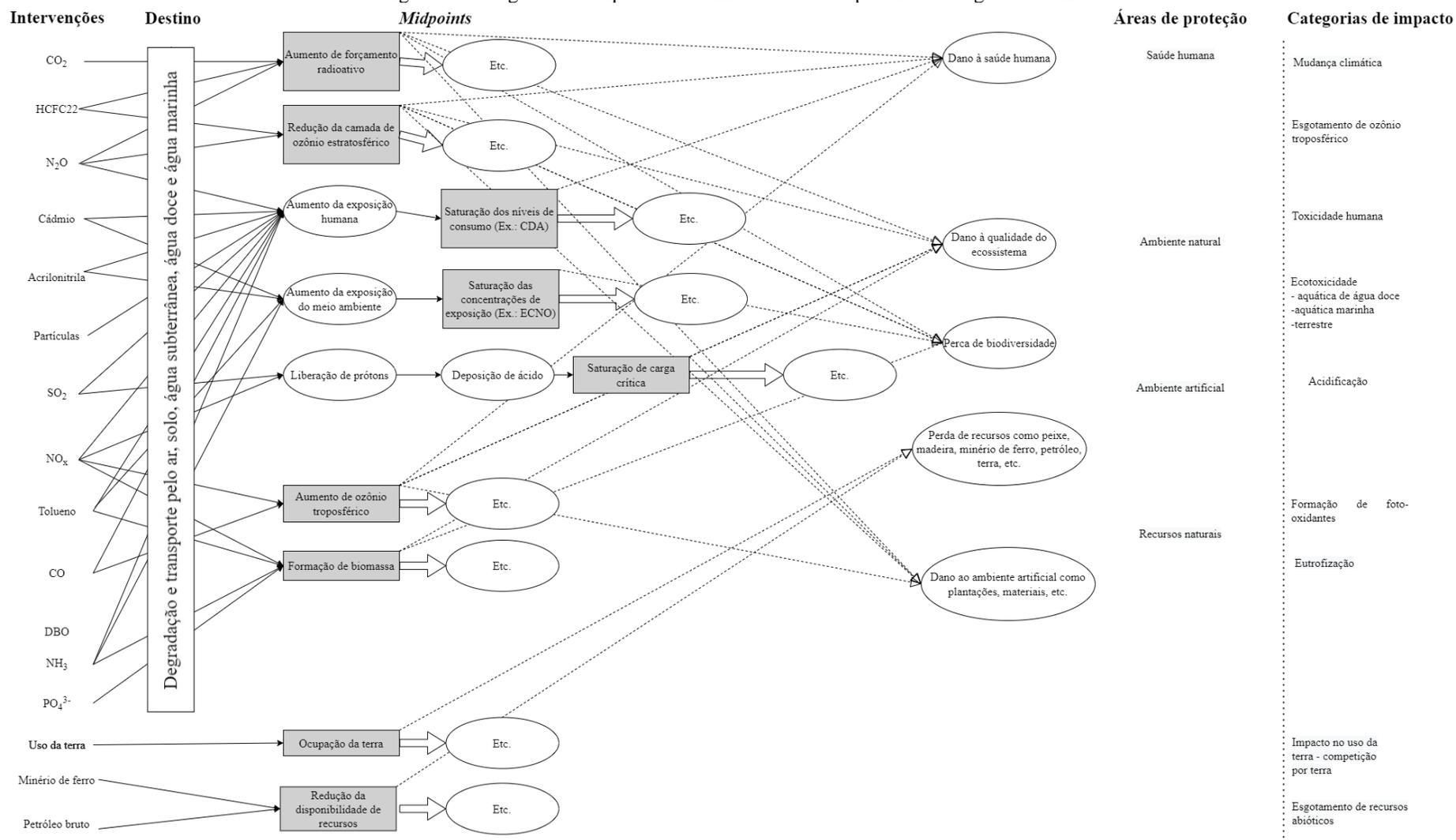
Nas subseções a seguir, as metodologias de AICV serão detalhadas e suas diferenças entre si apresentadas.

3.4.1 CML

Método *midpoint* que foi desenvolvido em 1992 pelo Instituto de Ciências Ambientais da Universidade de Leiden (CML) (UNIVERSIDADE DE LEIDEN, 2024). O método CML de AICV subdivide as categorias de impacto em duas classes: Categorias de impacto obrigatórias,

que estão presentes na maioria dos estudos de ACV e categorias de impacto adicionais que são necessárias a depender dos requisitos da pesquisa.

Figura 6 - Categorias de impacto e caminhos abordados pela metodologia de CML.



Fonte: Adaptado de EC-JRC (2010b).

A caracterização do método é utiliza valores médios globais e europeus, enquanto que a normalização é realizada com base em fatores de normalização globais disponíveis entre os anos 1990 e 1995 como intervenções mundiais anuais agregadas ou per capita como as intervenções anuais de um cidadão médio. A validade regional da metodologia CML para categorias de impacto é global, exceto para a acidificação e formação foto-oxidante onde são utilizados valores europeus (EC-JRC, 2010b). A Figura 6 acima expõe as categorias de impacto e caminhos abordados pela AICV do CML.

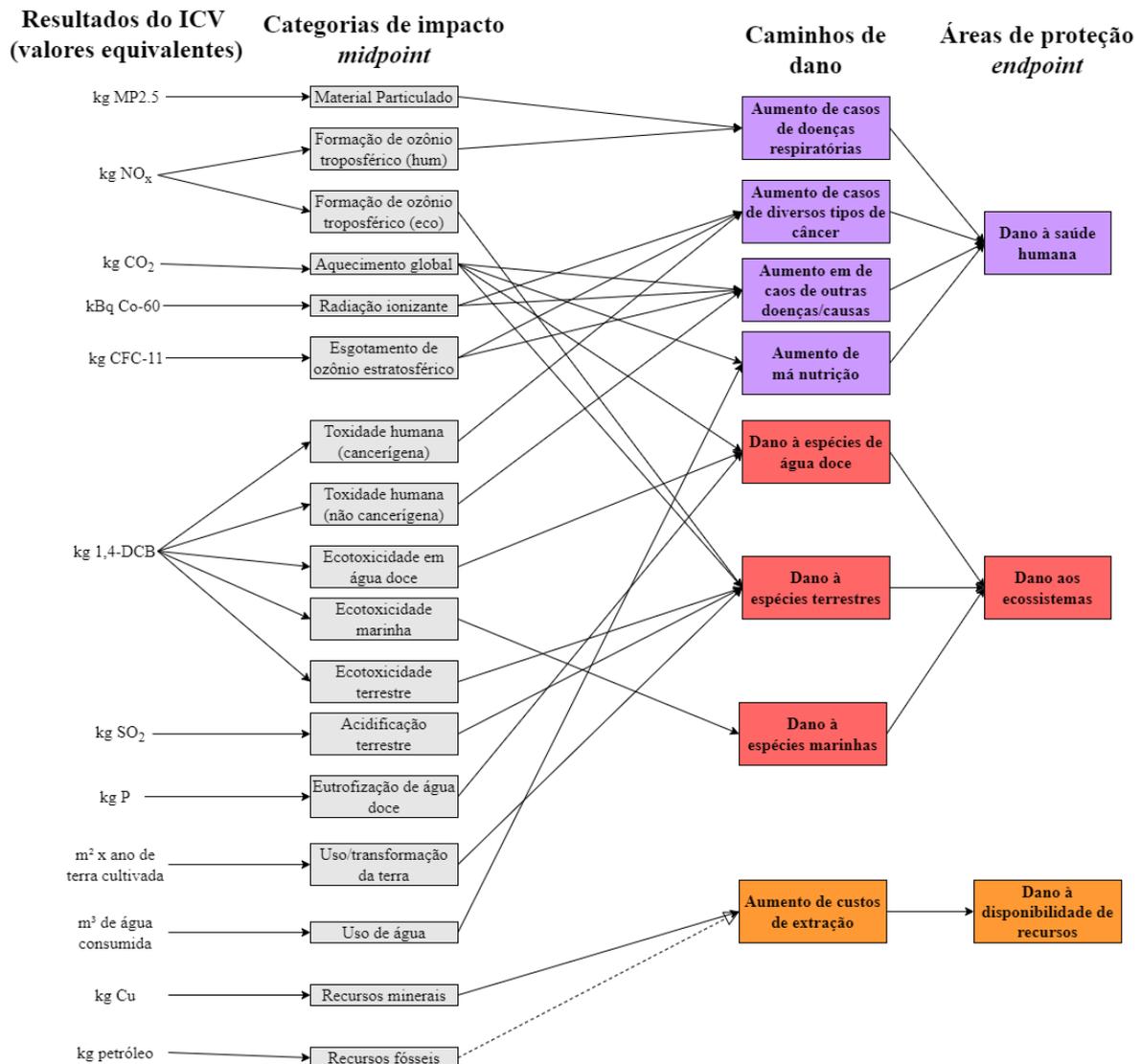
3.4.2 Eco Indicator 99

Um método orientado do tipo *endpoint*. As categorias de dano ambiental da Eco Indicator 99 são: Mudanças climáticas, esgotamento da camada de ozônio, acidificação, eutrofização, carcinogênico, efeitos respiratórios, radiação ionizante, ecotoxicidade, uso da terra, recursos minerais e recursos fósseis. Essas categorias são relacionadas à três áreas de proteção: qualidade do ecossistema, saúde humana e recursos naturais. Os fatores de caracterização e normalização são definidos ao utilizar dados em extração de recursos e emissões. Esses dados foram obtidos em um estudo para caracterizar e normalizar os valores para o território europeu e Holandês, que quantificou as intervenções resultantes da produção europeia entre os anos de 1990 a 1994.

3.4.3 ReCiPe 2016

Esse método é considerado uma continuação dos métodos CML e EI99. As pontuações de indicador são determinadas de forma similar ao método da Eco Invent 99. A modelagem é realizada tanto para abordagem *midpoint* quanto para *endpoint*. A caracterização é baseada em diversos anos diferentes, já que essa metodologia recebe constantes atualizações, como pode ser visto no trabalho de Huijbregts *et al.* (2016), em que cada categoria é baseada numa referência chave. A normalização é baseada no ano de 2010 como referência para os fatores globais. A Figura 7 apresenta as categorias de impacto e caminhos abordados pela metodologia ReCiPe 2016. A linha pontilhada representa que não há um fator *mid-to-endpoint* para os recursos fósseis.

Figura 7 – Categorias de impacto e caminhos de dano da metodologia ReCiPe 2016.



Fonte: Adaptado de HUIJBREGTS (2016).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Estado da arte sobre aplicação de ACV voltada para os efluentes têxteis

A revisão foi realizada para os trabalhos de ACV voltados para a indústria têxtil no geral que tiveram ênfase nas águas residuárias geradas pelos processos de beneficiamento. O objetivo dessa revisão foi para compreender de que forma a ACV foi utilizada para reduzir o impacto ambiental da indústria têxtil. Para isso, a busca foi elaborada nas bases de dados *Scopus* e *Web Of Science*, através do Portal da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Os artigos foram selecionados utilizando a seguinte metodologia chamada de os Principais Itens para Relatar Revisões Sistemáticas e Meta-Análises (PRISMA),

subdividida em 4 etapas: Identificação, Seleção, Elegibilidade e Inclusão (MOHER *et al.*, 2010).

A pesquisa na base de dados englobou os artigos que foram publicados desde a data do primeiro artigo encontrado nas bases de dados (1996) até abril de 2023. Na etapa de Identificação as palavras-chave utilizadas na busca foram: “*life cycle assessment*”, “*textile industry*”, “*wastewater*” e “*effluent*” com o operador Booleano “*or*” entre as duas últimas, e as demais associações usando o operador “*and*”, com isso foram obtidos 897 documentos. Na etapa de Seleção, foram aplicados critérios de exclusão que foram: A seleção apenas de artigos em inglês e a remoção de artigos de revisão, papéis de conferência, livros e capítulos de livros. Após essa etapa, 521 artigos foram filtrados para a próxima etapa.

A etapa de elegibilidade se seguiu pela leitura dos títulos e resumos dos artigos selecionados pela etapa de Seleção, removendo aqueles que não se enquadravam na temática pesquisada. Ao final dessa etapa a quantidade de trabalhos foi filtrada para um total de 70 artigos. Na última etapa, Inclusão, foi realizada a leitura na íntegra dos artigos filtrados pela etapa anterior. Após a leitura, caso determinado artigo não se enquadre na temática da pesquisa era descartado do conjunto, o que por fim resultou em 29 artigos.

4.2 Escolha das lavanderias de jeans e aplicação dos questionários

As lavanderias de jeans foram selecionadas de forma que possuíssem a maior quantidade de processos de beneficiamento, tornando-as as mais representativas possíveis dentro do APLCAPE. Para isso, foi aplicado um questionário (Apêndice A) para caracterizar as lavanderias onde seria realizada a coleta de dados e visitas frequentes para compreender o seu funcionamento das lavanderias. Foram identificadas duas lavanderias de jeans que atendiam ao critério estabelecido, sendo uma empresa localizada no município de Caruaru/PE e a outra no município de Toritama/PE.

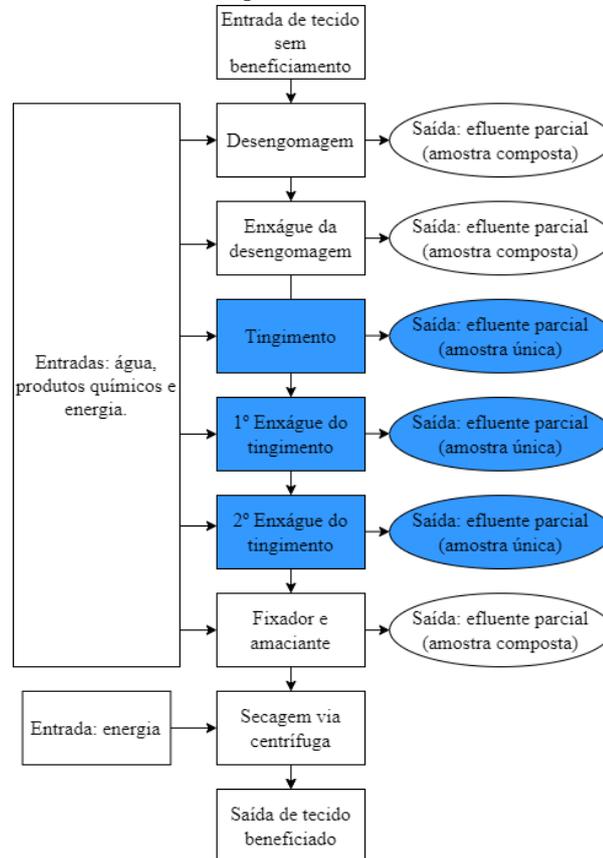
4.3 Roteiro de coleta nas lavanderias

As coletas foram realizadas para elaboração do ICV dos processos de beneficiamento mais utilizados das lavanderias de jeans. A partir do questionário aplicado, foi possível obter o consumo de água, de produtos químicos e a caracterização de cada efluente gerado nas diversas etapas do processo.

Em uma mesma lavanderia, quando realizadas lavagens em etapas de processos semelhantes, o efluente gerado foi coletado via amostragem composta. Para isso, foi definido

um volume de coleta de 1200mL para cada efluente parcial para a caracterização, volume que para a amostragem composta deve ser dividido em partes iguais para cada uma das amostras componentes. A Figura 8 exemplifica como foi realizado o processo de coleta para o processo de tingimentos direto em uma lavanderia de jeans. Por exemplo, caso fossem coletados para análise três tingimentos diretos, a quantidade de amostras seria: 9 amostras únicas, referentes ao tingimento, 1º enxágue do tingimento e 2º enxágue do tingimento por utilizarem químicos diferentes; e 3 amostras compostas referentes a desengomagem, o enxágue da desengomagem e ao efluente referente ao fixador e amaciante, totalizando 12 amostras.

Figura 8 – Esquema da lavagem por tingimento direto em uma determinada lavanderia de jeans com máquinas por batelada.



Fonte: o Autor (2024).

Para a ETE, também foi realizada a coleta do efluente antes e depois da coleta, através de amostras compostas. Para sistemas de ETE por batelada, foi estabelecida a coleta da entrada da imediatamente a montante do tanque de equalização (Figura 9). Após a chegada do volume de efluente no tanque de equalização, foi aferido o nível para mensurar o volume recebido. Dessa forma, foi solicitado ao operador da ETE que acionasse a bomba de recalque e a bomba dosadora (que insere diretamente na tubulação da bomba de recalque os produtos químicos para

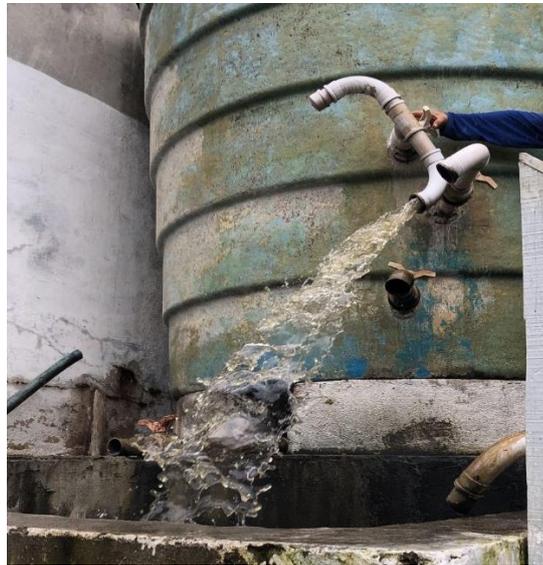
tratamento) para que o nível do efluente no tanque retornasse ao valor original, conferindo que o volume de entrada foi transferido para tratamento. Com isso, foi esperado o tempo de detenção estabelecido pela lavanderia para que fosse coletado o efluente tratado (Figura 10).

Figura 9 – Calha do reservatório a montante do tanque de equalização



Fonte: o Autor (2024).

Figura 10 – Lançamento do efluente tratado pelo tanque de decantação após o tempo de retenção



Fonte: o Autor (2024).

4.4 Parâmetros avaliados na caracterização

No momento da coleta, foram avaliadas as temperaturas dos efluentes parciais através de um termômetro de mercúrio. Nas amostras compostas, foram verificadas as temperaturas individuais, sendo realizada a média aritmética do conjunto como valor final de temperatura.

Foram avaliados também os valores de pH, salinidade, Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) e Condutividade Elétrica (CE) das amostras através de uma sonda multiparamétrica.

Para a caracterização dos efluentes parciais como saídas na ACV, foram realizadas as análises de Sólidos Sedimentáveis (SS) e Demanda Química de Oxigênio (DQO) no Laboratório de Engenharia Ambiental (LEA) do Campus Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco.

A análise da DQO foi realizada em triplicata para cada um dos efluentes parciais seguindo os procedimentos presentes no *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA/AWWA/WEF, 2012). A análise iniciou pipetando-se 1,5 mL de solução digestora em um tubo de ensaio de vidro com tampa rosqueável. Por seguinte, foi adicionado 2,5 mL da amostra, e por último foi adicionado ao tubo 3,5 mL de ácido sulfúrico (Figura 11). Em seguida, os tubos de ensaio foram inseridos no equipamento de bloco digestor com uma temperatura constante de 150 °C em um intervalo de tempo de 2 horas. Após resfriar em temperatura ambiente, cada um dos tubos de ensaio foi analisado por titulação, realizada com solução padrão de sulfato ferroso amoniacal e solução indicadora de ferroína.

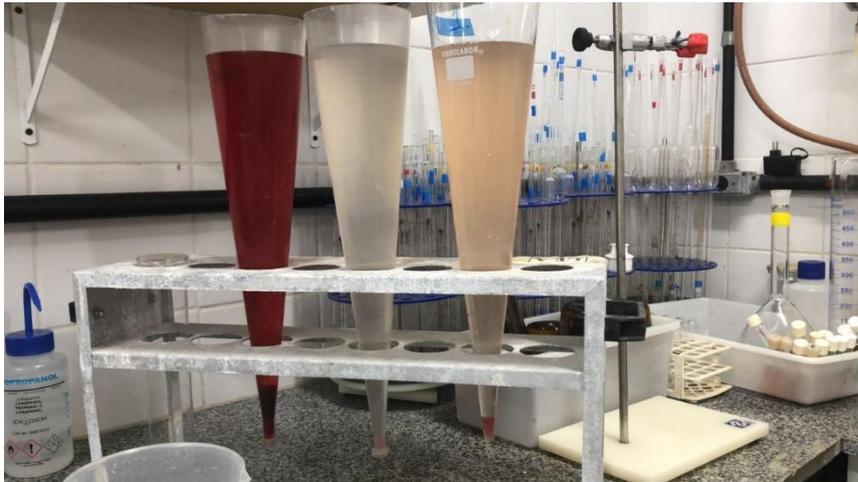
Figura 11 – Preparação dos tubos de ensaio para inserção no bloco digestor.



Fonte: o Autor (2024).

A análise de Sólidos Sedimentáveis (ASS) foi realizada através da inserção de 1 litro do efluente homogeneizado por agitação em cone de Imhoff (Figura 12), deixando o conjunto em repouso pelo período de uma hora. Após o tempo estabelecido, foi lido o volume de sólidos decantados no fundo do cone (Figura 13).

Figura 12 – Cones de Imhoff com efluente em processo de decantação.



Fonte: o Autor (2024).

Figura 13 – Sólidos decantados após o fim do tempo da Análise de Sólidos Sedimentáveis.



Fonte: o Autor (2024).

4.5 Objetivo e Escopo da Análise de Ciclo de vida

4.5.1 *Unidade funcional*

Para os efluentes parciais, foi considerado o beneficiamento de 1000 kg de tecido. Os maquinários das lavanderias beneficiam geralmente entre 40 kg e 60 kg por lavagem. Dessa forma, planilhas eletrônicas foram usadas para que o consumo dos materiais, o consumo de energia e a geração de efluentes sejam proporcionais a 1000 kg de tecido beneficiado. Além disso, para as ETEs de cada uma das lavanderias foram mensurados os itens do inventário para um dia normal de funcionamento, com geração diária de efluente de 100 m³ para a lavanderia

de Caruaru/PE e 80 m³ para a lavanderia de Toritama/PE. Dessa forma, foi feita uma projeção de 30 anos de funcionamento para cada uma para realizar a ACV.

4.5.2 Contornos do sistema

O estudo de ACV foi do tipo *from-gate-to-gate* (do portão ao portão) por apenas englobar uma parcela da produção de jeans, que é o beneficiamento. Os contornos do sistema englobaram o consumo de água, os produtos químicos utilizados e a energia elétrica consumida relativos ao processo de beneficiamento.

4.5.3 Categorias de impacto ambiental

Para esse estudo, foram utilizados dois métodos diferentes de AICV: o *ReCiPe 2016* e o CML, ambos com abordagem *midpoint*. Apesar de serem ambos métodos representativos, o CML tem a abordagem voltada para a realidade da região europeia, enquanto que o *ReCiPe 2016* tem uma abordagem de representatividade global, não sendo voltado para uma região específica (Silva *et al.*, 2021). Para o *ReCiPe 2016* as categorias de impacto selecionadas para esse estudo foram: acidificação terrestre, toxicidade humana, ecotoxicidade terrestre, eutrofização de água doce e aquecimento global. Para o CML, as categorias de impacto definidas para esse estudo são: acidificação, toxicidade humana, ecotoxicidade terrestre, eutrofização e aquecimento global.

4.5.4 Limitações, considerações e incertezas

Apesar das vantagens obtidas através da aplicação da ACV, ela possui limitações devido ao uso intensivo de dados e consumo de tempo. Dessa forma, é necessário definir o que abranger e o que excluir da análise (Bhatt *et al.*, 2023). Para este trabalho, foram apenas consideradas as emissões para a água, através do parâmetro de DQO, ou seja, a queima de lenha da fornalha para geração de vapor e a geração de fumaça pela queima não foram abrangidas no estudo. Além disso, devido a confidencialidade da composição dos produtos químicos industriais, principalmente relativos aos corantes e desengomantes, o estudo seguiu o inventário considerando esses componentes como “químicos orgânicos gerais”.

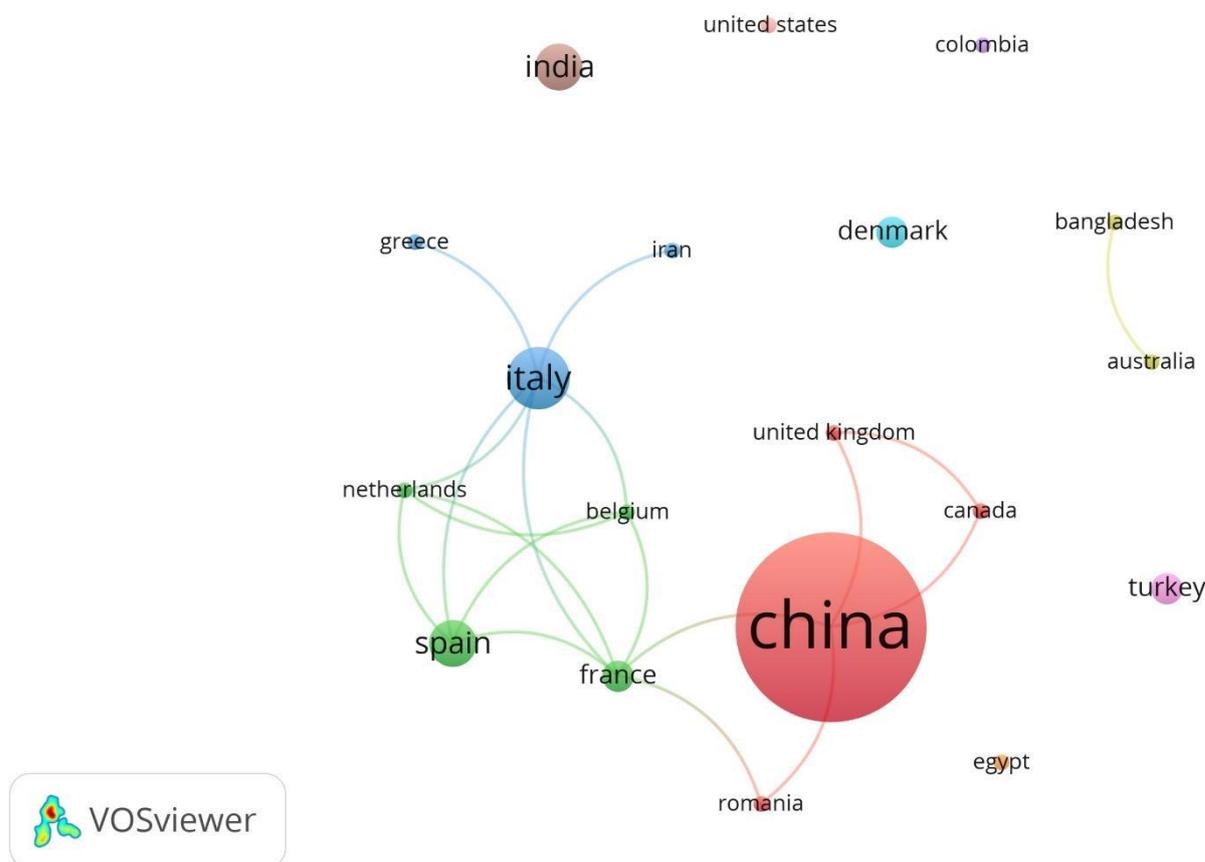
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Revisão bibliográfica dos artigos com uso do *software VOSviewer*

Segundo Van Eck & Waltman (2010), as análises de redes de coautoria permitem identificar como pesquisadores, instituições de pesquisa ou países que interagem pelo volume de trabalhos de pesquisa que realizam e publicam cooperativamente. O *software VOSviewer*, utilizado na análise de coautorias entre os respectivos países das instituições às quais pertencem os autores dos artigos, permitiu compreender as relações entre os autores. Cada círculo representa um país e seu respectivo diâmetro representa o número de artigos publicados. A linha que liga dois círculos representa a cooperação entre dois países, e a sua espessura a intensidade desta cooperação. Assim, foram mapeadas as principais redes de coautoria e apenas os países com pelo menos um documento foram considerados na análise. Esta condição gerou uma rede com 16 círculos (países), divididos em 4 clusters de colaboração em pesquisa (Figura 14).

A falta de conexões entre alguns círculos da rede comprova a baixa interação entre instituições de diferentes países e a dispersão dos trabalhos da área de estudo. Apenas 6 artigos do conjunto contaram com a participação de autores de diferentes países: Ahangarnokolaei *et al.* (2021), Angelis-Dimakis *et al.* (2016), Mattioli *et al.* (2005), Mahiat *et al.* (2023), Liu *et al.* (2022) e Powar *et al.* (2021). Destaca-se a formação de quatro grupos principais liderados pela China (*cluster* vermelho), Espanha (*cluster* verde), Bangladesh e Austrália (*cluster* amarelo) e pela Itália (*cluster* azul).

Figura 14 – Rede de coautoria entre os países de origem dos autores



Fonte: o Autor (2024).

Observou-se baixa cooperação científica entre grupos de pesquisa de diferentes países, bem como pequena colaboração entre pesquisadores de grupos de um mesmo país. França e Itália apresentaram o maior número de coautorias com pesquisadores de outros países.

Para compreender as relações de citação entre os 29 documentos selecionados, foi criada uma rede de citações utilizando o software VOSviewer. A Figura 15 mostra a rede de citações, onde o tamanho do círculo representa o número total de citações do artigo e as linhas entre os círculos representam a ocorrência de citações entre artigos.

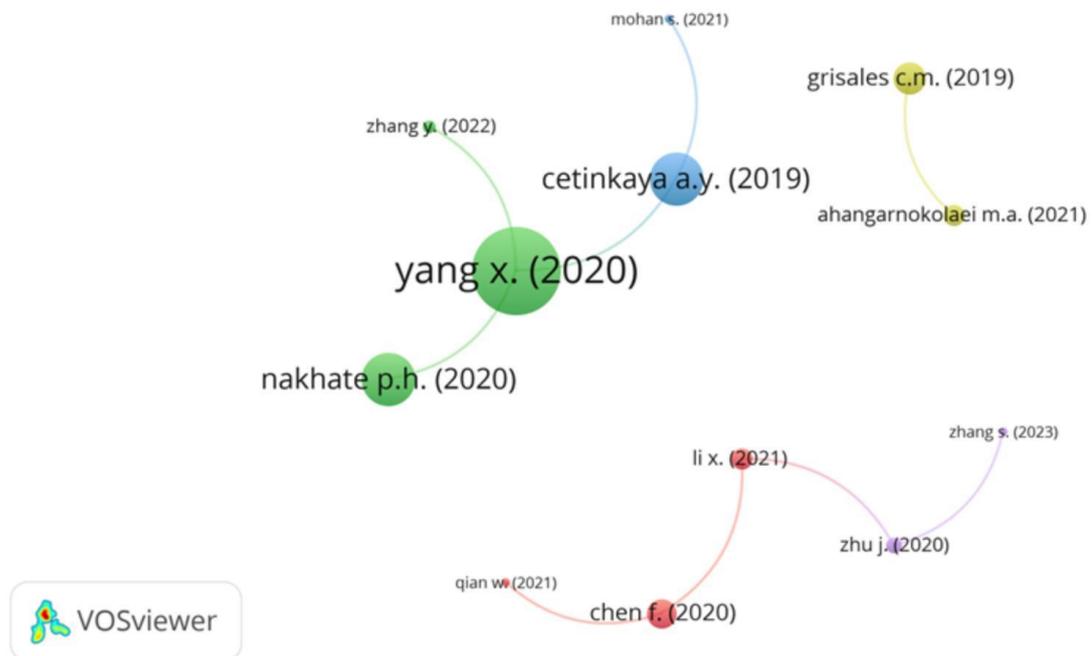
A rede de citação dos artigos é composta por 12 círculos que representam os artigos da pesquisa, alocados em 5 *clusters* com dois artigos cada. No *cluster* roxo, o trabalho de Zhu *et al.* (2020) foi citado pelo trabalho de Zhang *et al.* (2023) e Li *et al.* (2021).

O *cluster* vermelho contém o trabalho de Chen *et al.* (2020), citado em ambos os trabalhos de Li *et al.* (2021) e Qian *et al.* (2021). Todos esses trabalhos utilizaram a pegada hídrica para analisar o desempenho ambiental da produção têxtil.

O artigo de Yang *et al.* (2020), que é o trabalho com maior média de citações por ano, citou a pesquisa de Nakhate *et al.* (2019) e Zhang *et al.* (2022), compondo o *cluster* verde. Yang

et al. (2020) também citaram o trabalho de Cetinkaya & Bilgini (2019), que também foi referenciado no trabalho de Mohan *et al.* (2020), estes dois últimos artigos compoem o cluster azul. O *cluster* amarelo é composto pelo trabalho de Ahangarnokolaei *et al.* (2021), que cita o trabalho de Grisales *et al.* (2019). Os 17 artigos restantes não foram utilizados na rede porque não possuem nenhuma ligação, ou seja, não citaram e não foram citados por nenhum artigo encontrado.

Figura 15 – Rede de citação entre os artigos encontrados nas bases de dados



Fonte: o Autor (2024).

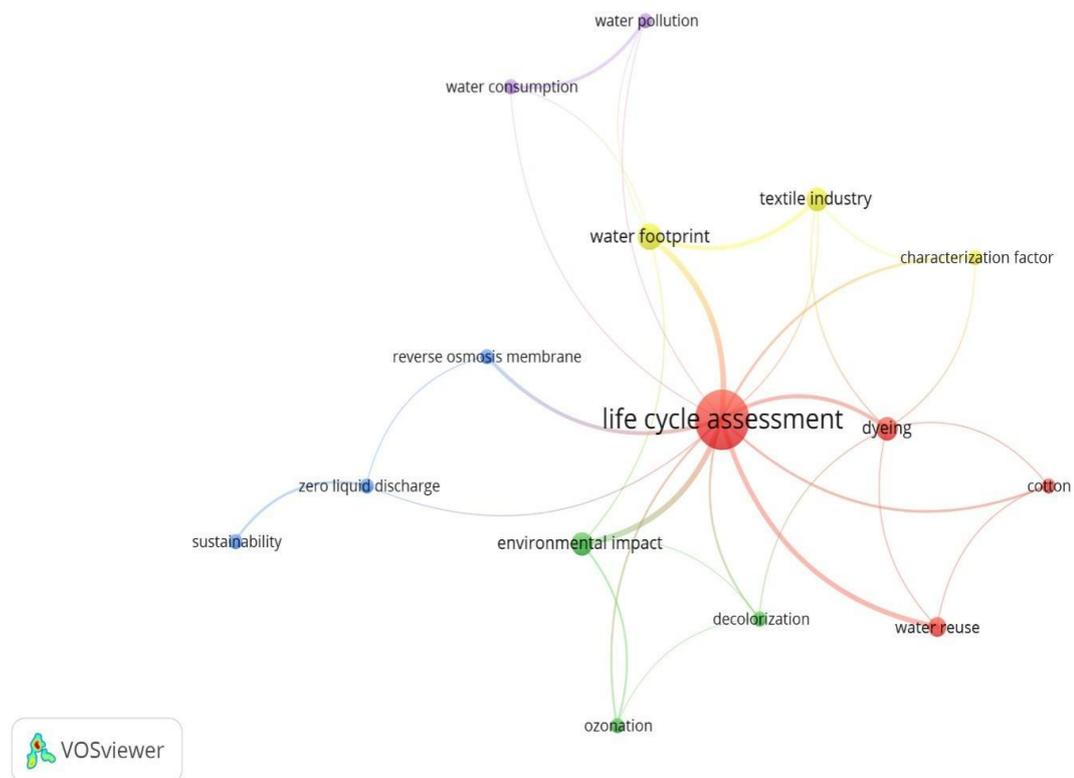
A análise de coocorrência, mostrada na Figura 16, foi formada de acordo com as palavras-chave determinadas pelos autores dos artigos. Para facilitar a visualização, critérios como a utilização de um tesouro (repertório alfabético de termos utilizados na indexação e na classificação de documentos) e restrição do número mínimo de ocorrências (neste caso, duas) foram atribuídas à pesquisa. Das 109 palavras encontradas anteriormente, após a aplicação dos critérios mencionados, restaram apenas 15, divididas em 5 *clusters*.

O *cluster* azul contém 3 círculos, correspondendo às palavras: membrana de osmose reversa, descarga zero de líquido e sustentabilidade. Estas palavras-chave referem-se aos trabalhos que utilizaram ACV para avaliar o desempenho ambiental do tratamento do efluente têxtil por membrana de osmose reversa, como é o caso da pesquisa de Centikaya e Bilgili (2019).

Alguns trabalhos também avaliaram o uso da osmose reversa como componente do tratamento por descarga zero de líquido, como, por exemplo, o trabalho de Rajakumari e Kanmani (2008). No *cluster* subsequente, na cor amarela, encontram-se 3 palavras: Fator de caracterização, indústria têxtil e pegada hídrica. O fator de caracterização da palavra-chave está relacionado aos trabalhos de Temizel-Sekeryan e Hicks (2021) e de Chen (2020) (que também utilizaram a pegada hídrica em suas pesquisas). O *cluster* na cor vermelha apresentou como palavras: Algodão, avaliação do ciclo de vida, tingimento e reúso de água. Este cluster apresenta as pesquisas que trabalharam com o reaproveitamento de águas residuárias provenientes do tingimento do algodão, como o trabalho de Wenzel et al. (1996). No *cluster* roxo, as palavras-chave consumo de água e poluição da água estão relacionadas aos trabalhos que usaram a pegada hídrica para avaliar os produtos de fibra natural na China (Zhu *et al.*, 2022) e para analisar produtos de lã com uma linha de base de baixa pegada hídrica (Li *et al.*, 2022).

No último *cluster* (cor verde), foram apresentadas as seguintes palavras: Ozonização, descoloração e impacto ambiental. Estas três palavras-chave estão relacionadas ao trabalho de Powar *et al.* (2021), que avaliaram o desempenho ambiental da descoloração de têxteis de algodão por ozonização com tingimento reativo.

Figura 16 – Rede de co-ocorrências entre as palavras-chaves usadas pelos autores dos artigos



Fonte: o Autor (2024).

5.2 Revisão Sistemática sobre análise de ciclo de vida em efluentes gerados pela indústria têxtil

Foram identificados um total de 29 artigos após a aplicação da metodologia PRISMA. Nas subseções a seguir, os artigos foram categorizados a partir do escopo da pesquisa da seguinte forma: (i) trabalhos voltados para o tratamento dos efluentes têxteis; (ii) trabalhos voltados para a aplicação de sustentabilidade; e (iii) trabalhos focados na análise da pegada hídrica. Também foram apresentados os principais resultados encontrados pelos artigos. A partir da plataforma *Scopus* foi possível mensurar que os artigos totalizam 347 citações e foram publicados de 1996 até o ano de 2023.

A Tabela 1 apresenta um breve resumo dos trabalhos selecionados, considerando o tipo de atividade têxtil, como a ACV foi usada no estudo do efluente, e o foco de cada um. Os métodos de análise de inventário de ciclo de vida mais usados pelos trabalhos fora o *ReCiPe 2016* e o CML, que são métodos *midpoint* amplamente usados em diversos estudos de ACV. Como por exemplo, o método ReCiPe usa mecanismos de impacto global, sendo regularmente atualizado com adição de novos dados e estudos.

As categorias de impacto mais usadas foram aquecimento global, acidificação, ecotoxicidade, e o esgotamento do ozônio estratosférico. O uso de categorias de impacto próprias também foi notado, sendo seu uso em maioria voltado para avaliar componentes e/ou processos específicos da cadeia têxtil.

Tabela 1– Artigos selecionados

Referência	Objetivo do uso da ACV	Método de análise de inventário	Categorias de impacto	Subtema*
Ahangarnokolaei <i>et al.</i> (2021)	Comparar os usos sequenciais e simultâneos da combinação de eletrocoagulação e ozonização no tratamento de efluentes têxteis.	<i>ReCiPe</i> 2016 (<i>midpoint</i>) e <i>ReCiPe</i> 2016 (<i>endpoint</i>)	Midpoint: Aquecimento global; Ecotoxicidade Terrestre; Ecotoxicidade Marinha; Carcinogênico Humano; Toxicidade Não-Carcinogênica Humana; uso da terra; Escassez de Recursos Minerais; Escassez de Recursos Fósseis; e Consumo de Água. Endpoint: Saúde Humana, Danos à Diversidade dos Ecossistemas e Disponibilidade de Recursos.	1
Alvarez <i>et al.</i> (2019)	Avaliar o desempenho ambiental do processo de tingimento reativo a jato e seu posterior tratamento de efluentes.	<i>ReCiPe</i> 2008 (<i>midpoint</i>) and <i>ReCiPe</i> 2008 (<i>endpoint</i>)	Midpoint: Mudanças Climáticas; Escassez de Ozônio; Acidificação Terrestre; Ecotoxicidade em Água Doce; Ecotoxicidade Marinha; Radiação ionizante; Ocupação de Terras Agrícolas; Ocupação de terras urbanas e esgotamento de fósseis. Endpoint: Saúde Humana, Danos à Diversidade dos Ecossistemas e Disponibilidade de Recursos.	1 e 2

Angelis–Dimakis <i>et al.</i> (2016)	Estudar uma estrutura metodológica para avaliar a ecoeficiência dos sistemas de uso de água em Biella, na Itália, utilizando ACV.	CML-IA	Midpoint: Mudanças Climáticas; Esgotamento dos Recursos de Água Doce; Eutrofização; Toxicidade Humana; Acidificação; Ecotoxicidade aquática; Ecotoxicidade Terrestre; e Formação Fotoquímica de Ozônio.	1 e 2
Badawi, Bakhoumand e Zaher (2021)	Comparar o desempenho de dois adsorventes no tratamento de efluentes têxteis.	IMPACT 2002+	Midpoint: Consumo de energia; Materiais Consumidos; Aquecimento Global; Potencial de Acidificação; Potencial de Eutrofização; Geração de Resíduos Sólidos; Potencial de destruição da camada de Ozônio; Efeitos Respiratórios (inorgânicos); Oxidação fotoquímica.	1 e 2
Cetinkayaa e Bilgili (2019)	Avaliar os tratamentos de efluentes têxteis por sistema de membrana de osmose reversa e por sistema de membrana de deionização capacitiva.	IMPACT 2002+ e CML-IA	Midpoint (CML-IA): Esgotamento Abiótico; Esgotamento Abiótico (combustíveis fósseis); Aquecimento global; Esgotamento da Camada de Ozônio; Toxicidade Humana; Ecotoxicidade Aquática em Água Doce; Ecotoxicidade Terrestre; Oxidação Fotoquímica; Acidificação; Eutrofização. Midpoint (IMPACT 2002+): Carcinógenos; Não cancerígeno; Inorgânicos Respiratórios; Radiação ionizante; Destruição da Camada de Ozônio; Orgânicos Respiratórios; Ecotoxicidade Aquática; Ecotoxicidade Terrestre; Acidificação/Nutrição Terrestre; Ocupação	1 e 2

			de Terra; Acidificação Aquática; Eutrofização Aquática; Aquecimento Global; Energia não-renovável; e Extração Mineral.	
Chen <i>et al.</i> (2020)	Realizar uma pegada de alcalinização da água para avaliar o impacto potencial da alcalinização da água pela produção têxtil.	Própria	Pegada de alcalinização da água.	3
Fidan <i>et al.</i> (2022)	Comparar os benefícios entre o uso de fibra de algodão orgânico e fibra de algodão convencional na produção de jeans.	CML-IA	<i>Midpoint:</i> Potencial de aquecimento global; Potencial de Acidificação; Potencial de Ecotoxicidade em Água Doce; Potencial de Ecotoxicidade Terrestre; Potencial de eutrofização	2
Grisales, Salazar e Garcia (2018)	Avaliar a influência da presença de produtos químicos auxiliares no efluente têxtil no desempenho do tratamento realizado pelo processo Fenton.	<i>ReCiPe</i> 2008 (<i>Midpoint</i>) e <i>ReCiPe</i> 2008 (<i>Endpoint</i>).	<i>Midpoint:</i> Acidificação; Das Alterações Climáticas; Esgotamento de Combustíveis Fósseis; Esgotamento Metálico; Esgotamento de Água; Ecotoxicidade em Água Doce; Ecotoxicidade Marinha; Ecotoxicidade Terrestre; Eutrofização de Água Doce; Eutrofização Marinha; Toxicidade Humana; Radiação ionizante; Ocupação de Terras Agrícolas; Transformação Natural da Terra; Ocupação do Solo Urbano;	1 e 2

			Destruição do Ozono; Formação de Partículas e Formação de Oxidantes Fotoquímicos.	
			Endpoint: Saúde Humana, Danos à Diversidade dos Ecossistemas e Disponibilidade de Recursos.	
Jørgensen et al. (2004)	Avaliar seis alternativas para a reutilização da água de uma lavanderia industrial na Dinamarca.	EDIP 2003	Midpoint: Consumo de recursos; Acidificação; Enriquecimento Nutricional; Aquecimento global; Geração de resíduos; Destruição do ozônio estratosférico, formação fotoquímica de ozônio e toxicidade.	1 e 2
Li et al. (2017)	Estimar as mudanças na pegada hídrica da indústria têxtil chinesa entre os anos de 2001 e 2014.	Própria	Pegada Hídrica Azul; Pegada Hídrica Cinzenta e pegada hídrica total.	2 e 3
Li et al. (2021)	Avaliar a pegada hídrica ao nível do processo para a indústria têxtil da China.	Própria	Pegada de Acidificação hídrica; pegada de Ecotoxicidade Hídrica; e Pegada de Eutrofização Hídrica.	2 e 3
Li et al. (2022)	Estabelecer uma linha de base de baixa pegada hídrica para avaliar produtos de lã.	Pegada hídrica	Pegada de escassez hídrica; pegada de eutrofização hídrica.	3

Liu et al. (2022)	Desenvolver um sistema multirregional de gestão de água azul/cinza	Pegada hídrica	Pegada hídrica azul, pegada hídrica cinza	2 e 3
Mahiat et al. (2022)	Comparar as pegadas ambientais e sociais de um antigo tear manual e de um tear mecânico.	ReCiPe 2016 (Midpoint)	Midpoint: Aquecimento global. Ecotoxicidade; formação de partículas finas, escassez de recursos fósseis. Eutrofização da água doce, toxicidade humana; formação de ozônio; acidificação terrestre.	2
Marrucci et al. (2022)	Comparar os seguintes cenários num curtume: sem ações circulares, uma circular com recuperação de sal e uma reutilização de banhos de bronzeamento.	ILCD	Midpoint: Mudanças Climáticas; Esgotamento de ozônio; Toxicidade humana (efeitos não-cancerígenos); Toxicidade humana (efeitos cancerígenos); Material particulado Radiação ionizante HH; Radiação ionizante E; Formação fotoquímica de ozônio; Acidificação; Eutrofização terrestre; Eutrofização da água doce; Eutrofização marinha. Ecotoxicidade em água doce; Uso da terra; Recursos hídricos; Esgotamento de recursos minerais, fósseis e renováveis.	2
Mattioli et al. (2005)		Não aplicável	Não aplicável	2
Mohan, Oke e Gokul (2020)	Para comparar a pegada de carbono entre uma estação de tratamento	Própria	Midpoint: Uso de Combustível; Consumo elétrico; Transporte; Emissão de metano proveniente de tratamento biológico; Emissão de	1 e 2

	convencional e uma estação de descarga zero de líquidos.		Metano por Lançamento de Efluentes Tratados; Bombeamento de Água Subterrânea; Transporte de águas subterrâneas.	
Nakhate <i>et al.</i> (2019)	Estimar a pegada ambiental de uma estação de tratamento de efluentes têxteis na Índia	CML 2001 e ReCiPe 2016	<p>Midpoint (CML 2001): Esgotamento Abiótico; Potencial de Acidificação; Potencial de Eutrofização; Potencial de Ecotoxicidade Aquática em Água Doce; Potencial de aquecimento global; Potencial de Aquecimento Global excluindo Carbono Biogênico; Potencial de Ecotoxicidade Aquática Marinha; e Potencial de Ecotoxicidade Terrestre.</p> <p>Midpoint (ReCiPe 2016): Mudanças Climáticas; Formação de Partículas Finas; Esgotamento Fóssil; Ecotoxicidade em Água Doce; Toxicidade Humana, Câncer; Radiação ionizante; Ecotoxicidade Marinha; Esgotamento Metálico; e Acidificação Terrestre.</p>	1
Powar <i>et al.</i> (2021)	Avaliar a descoloração de tecidos de algodão com tingimento reativo com ozônio.	ILCD 2011	<p>Midpoint: Mudanças Climáticas; Esgotamento de minerais, fósseis e recursos. Radiação Ionizante HH, Ecotoxicidade em Água Doce; Toxicidade Humana, Efeitos do Câncer; e esgotamento dos recursos hídricos.</p>	1 e 2

Qian et al. (2021)	Avaliar a pegada hídrica de blusas de viscose e ternos mistos masculinos.	Própria		Midpoint: Eutrofização da Água; Acidificação da Água; Alcalinidade da Água; e Ecotoxicidade da Água.	3
Rajakumari e Kanmani (2008)	Comparar o desempenho ambiental do tratamento de efluentes têxteis utilizando pré-tratamento, osmose reversa e evaporador.	Própria		Midpoint: Potencial de aquecimento global; Potencial de Acidificação; e Impacto na Saúde Humana.	1
Temizel–Sekeryan e Hicks (2021)	Comparar quatro tecidos de poliéster que foram preparados com diferentes cargas de prata/nanoprata.	TRACI		Midpoint: Destruição do Ozono; Aquecimento global; Poluição atmosférica, acidificação; Eutrofização; Cancerígenos; Não-Carcinógenos; Efeitos Respiratórios; Ecotoxicidade e esgotamento de combustíveis fósseis.	2
Wenzel et al. (1996)	Comparar a implementação de precipitação química, filtração por membranas, adsorção de carvão ativado e evaporação no tratamento de efluentes.	Própria		Midpoint: Aquecimento global; Acidificação; Nutrição; e Fotosmog.	1 e 2
Yang et al. (2020)	Comparar três métodos de tratamento biológico de efluentes têxteis.	ReCiPe 2016 (midpoint) and		Midpoint: Radiação ionizante; Formação de Partículas; Formação de Oxidantes Fotoquímicos; Toxicidade Humana; Destruição do Ozono;	1 e 2

		<i>ReCiPe</i> 2016 (<i>endpoint</i>)	Mudanças Climáticas; Ecotoxicidade Terrestre; Transformação Natural da Terra; Ocupação do Solo Urbano; Ocupação de Terras Agrícolas; Ecotoxicidade Marinha; Ecotoxicidade em Água Doce; Eutrofização de Água Doce; Acidificação Terrestre; Esgotamento de Fósseis e Esgotamento de Metais. Endpoint: Saúde humana; Ecossistemas; e Recursos.	
Yuan <i>et al.</i> (2012)	Avaliar os impactos ambientais de uma indústria de tingimento têxtil.	CML 2001	Midpoint: Esgotamento abiótico; Potencial de acidificação; Potencial de aquecimento global; Formação de ozônio fotoquímico; Ecotoxicidade aquática de água doce; Potencial de toxicidade humana; Ecotoxicidade aquática marinha e Potencial de ecotoxicidade terrestre.	2
Zhang <i>et al.</i> (2022)	Avaliar o impacto ambiental do decametilciclopentasiloxano como solvente e comparar, pelas perspectivas ambientais e econômicas, o sistema de tingimento não aquoso e a tecnologia tradicional de tingimento aquoso.	CML 2001 e USEtox	Midpoint: Potencial de esgotamento abiótico; Potencial de esgotamento abiótico fóssil; Potencial de aquecimento global; Potencial de destruição da camada de ozono; Potencial de eutrofização; Potencial de acidificação; potencial de criação fotoquímica de ozono; Potencial de ecotoxicidade aquática marinha; Potencial de ecotoxicidade terrestre; Ecotoxicidade; Toxicidade humana (não cancerígena); Toxicidade humana (câncer); Consumo de água doce.	2

Zhang <i>et al.</i> (2023)	Estudar os impactos ambientais do processamento úmido de tecidos/malha de algodão e poliéster.	ReCiPe 2016	Midpoint: Mudanças Climáticas; Toxicidade humana (não cancerígena); Escassez de recursos fósseis; Potencial de ecotoxicidade em água doce; Potencial de ecotoxicidade marinha; Potencial de ecotoxicidade terrestre; Potencial de destruição da camada de ozono; Potencial de radiação ionizante; Potencial de formação de partículas finas; Formação fotoquímica de ozônio (Saúde Humana); Formação fotoquímica de ozônio (Qualidade do ecossistema); Potencial de acidificação terrestre; Eutrofização da água doce; Eutrofização Marinha; Toxicidade. Uso de água; Uso da terra.	2
Zhu <i>et al.</i> (2020)	Para apresentar um novo indicador quantitativo para alcalinização da água, foram calculadas as pegadas hídricas envolvidas na produção têxtil de viscose.	Própria	Pegada de Escassez Hídrica; Pegada de degradação hídrica.	3

Zhu <i>et al.</i> (2022)	Calcular e avaliar as pegadas hídricas de referência para têxteis de fibra natural.	Pegada hídrica	Pegada de Escassez Hídrica; Pegada de eutrofização hídrica; Pegada de ecotoxicidade hídrica.	2 e 3
--------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------	----------------	----------------------------------------------------------------------------------------------	-------

* 1 – Tipos de tratamento de efluentes, 2 – Otimização do processo têxtil, 3 – Análise da pegada hídrica. Fonte: o Autor (2024).

Nas subseções a seguir, os artigos foram categorizados e discutidos, de acordo com o foco da pesquisa mostrado na Tabela 1. Os artigos discutidos foram aqueles com maior número de citação normalizada pelo VOSviewer (Tabela 2).

Tabela 2 – Artigos com maiores citações normalizadas pelos VOSviewer.

Referência	Título do trabalho	Número de citações (normalizada)*
Zhang et al. (2022)	<i>Potential trade-off between water consumption and water quality: life cycle assessment of nonaqueous solvent dyeing</i>	3.57
Badawi et al. (2021)	<i>Sustainable evaluation of using nano zero-valent iron and activated carbon for real textile effluent remediation</i>	3.33
Yang et al. (2020)	<i>Treatment of textile wastewater by CAS, MBR, and MBBR: A comparative study from technical, economic, and environmental perspectives</i>	2.04
Ahangarnokolaei et al. (2021)	<i>Life cycle assessment of sequential and simultaneous combination of electrocoagulation and ozonation for textile wastewater treatment</i>	1.33
Li et al. (2021)	<i>Development of a novel process-level water footprint assessment for textile production based on modularity</i>	1.33
Cetinkaya & Bilgili (2019)	<i>Life cycle comparison of membrane capacitive deionization and reverse osmosis membrane for textile wastewater treatment</i>	1.25
Nakhate et al. (2019)	<i>Case study on sustainability of textile wastewater treatment plant based on lifecycle assessment approach</i>	1.23

		1.00
Angelis-Dimakis, <i>et al</i> (2016)	<i>Value chain upgrading in a textile dyeing industry</i>	1.00
Fidan <i>et al.</i> (2022)	<i>The impact of organic cotton use and consumer habits in the sustainability of jean production using the LCA approach</i>	1.00
Jørgensen <i>et al.</i> (2004)	<i>Use of life cycle assessment as decision-support tool for water reuse and handling of residues at a Danish industrial laundry</i>	1.00
Li <i>et al.</i> (2017)	<i>Decoupling water consumption and environmental impact on textile industry by using water footprint method: a case study in China</i>	1.00
Mahiat <i>et al.</i> (2023)	<i>Modeling the environmental and social impacts of the handloom industry in Bangladesh through life cycle assessment</i>	1.00
Mattioli <i>et al.</i> (2005)	<i>Efficient use of water in the textile finishing industry</i>	1.00
Rajakumaria e Kanmani (2008)	<i>Environmental life cycle assessment of zero liquid discharge treatment technologies for textile industries, Tirupur - A case study</i>	1.00
Wenzel <i>et al.</i> (1996)	<i>Reclamation and reuse of process water from reactive dyeing of cotton</i>	1.00
Yuan <i>et al.</i> (2012)	<i>Life-cycle assessment of continuous pad-dyeing technology for cotton fabrics</i>	1.00
Zhang <i>et al.</i> (2023)	<i>Environmental assessment of fabric wet processing from gate-to-gate perspective: Comparative study of weaving and materials</i>	1.00

* número de citações do documento dividido pelo número médio de citações de todos os artigos publicados no mesmo ano, na base de dados Scopus. Fonte: O Autor (2024).

5.2.1 Artigos voltados para o tratamento de efluentes têxteis

Foram encontrados treze artigos com foco nos tipos de tratamento de efluentes têxteis, sendo os mais citados: (i) Badawi et al. (2020) se concentraram em comparar o uso de ferro nano zero valência e carvão ativado para tratamento de efluentes têxteis usando ACV para avaliar o impacto ambiental. O trabalho utilizou um estudo de tomada de decisão multicritério e constatou que o uso de carvão ativado é melhor que o ferro nano-zero-valente em aspectos ambientais para tratamento de águas residuárias. Para o tratamento com carvão ativado, a categoria de impacto com maior valor foi o consumo de energia (32.863 kWh) e para o ferro nano-zero-valente foi o aquecimento global (30.232 kg CO₂ eq). O estudo utilizou 1 kg de material produzido (nano ferro valência zero ou carvão ativado) como unidade funcional; (ii) Ahangarnokolaei *et al.* (2021) avaliaram as diferentes formas de combinação entre eletrocoagulação e ozonização para tratamento de águas residuárias têxteis. O tratamento de menor impacto foi a combinação simultânea de eletrocoagulação com ozonização, devido ao baixo consumo de energia. As categorias de impacto com maior valor foram aquecimento global (81,35 g CO₂) e ecotoxicidade terrestre (92,38 g 1,4-diclorobenzeno) do tratamento de ozonização. O estudo utilizou 1 L de água residual tratada com corante como unidade funcional; (iii) Nakhate *et al.* (2019) estimaram as pegadas ambientais de uma estação de tratamento de efluentes têxteis na Índia, com ciclo fechado de reciclagem, utilizando processo de ozonização e filtro de carvão ativado. Duas unidades funcionais foram utilizadas neste estudo (fluxo de efluentes 1 e 2): 1200 m³ e 1500 m³ de efluente têxtil. O estudo mostrou que, nas categorias de potencial de aquecimento global, o processo de ozonização aumenta consideravelmente o impacto ambiental (1.440 kg CO₂ eq para o fluxo de efluente 1 e 2.041 kg CO₂ eq para o fluxo de efluente 2) e o filtro de carvão ativado gerou um menor impacto ambiental (217 kg CO₂ eq para fluxo de efluente 1 e 173,5 kg CO₂ eq para fluxo de efluente 2); (iv) Cetinkaya e Billgili (2019) compararam o tratamento de águas residuais têxteis com deionização capacitiva por membrana (MCDI) e sistema de membrana de osmose reversa. Os resultados mostraram que o sistema MCDI é a alternativa com menor impacto ambiental. A categoria de impacto com maior valor foi a ecotoxicidade aquática marinha (41.442,27 kg 1,4-diclorobenzeno eq) no sistema de membrana de osmose reversa, que foi cerca de 71 vezes maior que o MCDI; (v) Rajakumari & Kanmani (2008) estudaram o impacto ambiental do tratamento com descarga zero de líquido para águas residuais tratadas nas indústrias têxteis de Tirupur, em duas plantas distintas (I e II). O processo de tratamento foi composto por pré-tratamento, osmose reversa e evaporador. A unidade funcional deste artigo foi 1 m³ de efluente têxtil. O estudo constatou que

a osmose reversa tem o menor impacto ambiental na categoria potencial de aquecimento global em ambas as plantas; (vi) Wenzel et al. (1996) discutem o desenvolvimento de novas práticas para a recuperação e reutilização de água nas lavanderias. A maior redução nos valores das categorias de impacto foi no aquecimento global e no photo smog, em quase 50% do sistema original (sem reutilização). O uso de precipitação química, filtração por membranas, adsorção de carvão ativado e evaporação permitiu a reutilização da água quente no enxágue, o reaproveitamento de restos de filtração nos digestores anaeróbios e o reaproveitamento de sais e da água de tingimento.

Nesta seção, o uso da ACV mostrou que o tratamento de efluentes têxteis com carvão ativado e o reaproveitamento de efluentes têxteis tratados são tecnologias eficientes na redução dos impactos ambientais decorrentes da indústria têxtil.

5.2.2 Artigos voltados para a otimização dos processos têxteis

Foram encontrados vinte artigos com foco na otimização de processos têxteis, sendo os mais citados: (i) Zhang et al. (2022) estimaram os impactos ambientais do decametilciclopentasiloxano (D5), solvente orgânico para tingimento não aquoso, que é comparado com o sistema de tingimento aquoso no trabalho. O unitário funcional utilizado neste trabalho foi 1 tonelada de fibras de algodão tingidas com corantes reativos. Os resultados mostraram que todas as categorias, exceto potencial de depleção abiótica e ecotoxicidade, tiveram valores menores para o sistema de tingimento não aquoso; (ii) Yang et al. (2020) avaliaram o tratamento biológico de efluentes têxteis (lodo ativado convencional, biorreator de membrana e reator de biofilme de leito móvel). Tecnicamente, os resultados demonstraram que o tratamento com membrana foi o mais eficaz na remoção da demanda química de oxigênio, sólidos suspensos totais e cor. O reator de biofilme de leito móvel apresentou os menores custos e consumo de energia elétrica. O estudo concluiu, a partir dos resultados do estudo econômico e da ACV, que a água tratada resultante do sistema de reator de biofilme de leito móvel pode ser reaproveitada para realizar novos tingimentos com qualidade aceitável. A unidade funcional deste estudo foi 1 m³ de esgoto tratado; (iii) Angelis-Dimakis *et al.* (2016) apresentam um estudo para avaliar a ecoeficiência dos sistemas de uso de água em Biella, na Itália, utilizando ACV. Os autores concluíram que os principais problemas relacionados à indústria têxtil na região são o esgotamento das fontes de água doce, a toxicidade humana e a ecotoxicidade (terrestre e aquática). A unidade funcional utilizada neste trabalho é 1 kg de produto tingido; (iv) Yuan *et al.* (2012), que avaliaram os impactos ambientais de uma indústria de tingimento têxtil, determinando os principais processos para mitigar os impactos ambientais de forma

eficiente e eficaz, o que beneficiaria a aplicação de tecnologias de produção limpa. O estudo indicou que branqueamento e lavagem com oxigênio, tingimento, acabamento e fixação, tratamento de efluentes e incineração são os principais itens da cadeia produtiva. 2.000 kg de tecido de algodão foi a unidade funcional utilizada neste trabalho; (v) Fidan *et al.* (2022) compararam os benefícios entre o uso da fibra de algodão convencional e da fibra de algodão orgânico. O estudo constatou que uma calça jeans com 100% de fibra de algodão orgânico apresentou, respectivamente, valores 87% e 59% menores nos potenciais de ecotoxicidade terrestre e de ecotoxicidade em água doce; (vi) Jørgensen *et al.* (2004) analisaram seis opções alternativas para a reciclagem de água numa lavanderia industrial dinamarquesa. O maior valor encontrado nas categorias de impacto foi o da toxicidade persistente. A unidade funcional deste estudo foi a lavagem de 1.000 toneladas de roupas de trabalho coloridas por ano. O estudo concluiu que a ultrafiltração e o biofiltro de chumbo são opções viáveis para diminuir os impactos ambientais causados pelo lançamento de águas residuais; (vii) Mahiat *et al.* (2023) avaliaram o impacto ambiental e social da indústria de teares manuais em Bangladesh, comparando um tear mecânico com um tear manual antigo. O estudo revelou que o potencial de aquecimento global e os valores de consumo de energia eram quatro vezes maiores em um tear manual antigo do que em um tear mecânico. A unidade funcional utilizada neste trabalho foi a produção de 1 tonelada de tecido 100% algodão. O consumo de água por tonelada de algodão foi de 0,39 toneladas para o tear antigo e de 87 toneladas para o tear mecânico. A ecotoxicidade foi a categoria de impacto de maior valor, encontrada na calibragem e desinfecção do tear manual, com aproximadamente 17.500 kg de 1,4-diclorobenzeno (para produção de 1 tonelada de tecido de algodão).

Nesta seção, o uso da ACV em conjunto com uma análise econômica e técnica permitiu identificar os processos de branqueamento e lavagem com oxigênio, tingimento, acabamento e fixação, tratamento de efluentes e incineração como essenciais dentro da indústria têxtil. Além disso, a utilização do algodão orgânico apresentou melhor desempenho ambiental que o algodão convencional.

5.2.3 Artigos voltados para pegada hídrica na cadeia têxtil

Foram encontrados oito artigos com foco na pegada hídrica na cadeia têxtil, sendo os mais citados: (i) Li *et al.* (2021) apresentaram uma avaliação de uma pegada hídrica em nível de processo para a indústria têxtil, empregando modularidade e usando como base 80 fábricas de tinturaria e estamparia na China. As avaliações permitiram comparar diferentes produtos e processos para analisar as causas e fatores de influência, identificando oportunidades

promissoras para redução do consumo de água, além de medidas para eliminar o lançamento de efluentes e reduzir a poluição. O maior valor para as categorias de impacto foi a pegada de escassez hídrica da tinturaria, com 31,88 m³ H₂O eq/t. O estudo utilizou 1 tonelada de têxteis como unidade funcional.(ii) Li et al. (2017) estimaram as mudanças na pegada hídrica azul (a água proveniente de recursos hídricos subterrâneos ou superficiais que evapora durante a produção de uma mercadoria, é adicionada a ela ou descartada no mar) na pegada hídrica cinza (a quantidade de água limpa necessária para mitigar a água poluída no processo produtivo até atender a critérios específicos de qualidade) e a pegada hídrica total da indústria têxtil, de 2001 a 2014, na tentativa de associar a pegada hídrica e o crescimento econômico da China, utilizando o Tapio modelo de dissociação. Os resultados mostraram que em 2003, 2006, 2008 e 2013 há uma dissociação forte, e em 2005, 2007, 2009 e 2010, há uma dissociação fraca. Após a análise da composição, a pegada hídrica total aumentou juntamente com a escala de produção. O maior valor encontrado no estudo da pegada hídrica foi da pegada hídrica azul.

A utilização da pegada hídrica nesses estudos confirmou o amplo impacto da atividade têxtil nos recursos hídricos, desde o alto consumo para a operação dos processos até a quantidade de água necessária para mitigar a poluição.

Os trabalhos, em sua maioria, focaram na utilização da ACV como ferramenta de apoio à otimização, apresentando resultados que podem tornar os processos têxteis mais sustentáveis. Entre os trabalhos que compararam diferentes formas de tratamento de efluentes, aqueles que utilizam carvão ativado provaram ser ecologicamente corretos. Além disso, percebeu-se que, embora o tratamento de descarga zero de líquido não tenha gerado águas residuais, pode ser mais impactante ambientalmente do que os tratamentos mais tradicionais, devido ao alto consumo de energia elétrica.

Os métodos de avaliação de inventário de ciclo de vida ReCiPe e CML foram os mais utilizados nos trabalhos de pesquisa, apresentando, como principais categorias de impacto utilizadas pelos trabalhos, aquelas relacionadas ao aquecimento global, à acidificação terrestre, à ecotoxicidade e à destruição da camada de ozônio.

5.3 Resultados da lavanderia de jeans do município de Caruaru/PE

A lavanderia localizada no bairro Salgado no município de Caruaru/PE, tem como principal atividade o tingimento de jeans, aplicado em sua grande maioria com o uso de corantes diretos. Dessa forma, foram levantados o processo de tingimento direto para três corantes, para serem avaliados futuramente, juntamente com o processo de tratamento da ETE da lavanderia.

A composição dos inventários de ciclo de vida dos processos de lavagem referentes à essa lavanderia estão presentes no Apêndice B.

5.2.1 Parâmetros físico-químicos

Na Tabela 3 são apresentados os resultados dos parâmetros físico-químicos dos efluentes gerados na referida lavanderia. Os tingimentos apresentaram os valores mais elevados de grande parte dos parâmetros analisados, com destaque para o tingimento preto. Também pode ser verificado que à medida que o jeans recebeu enxágues do tingimento, os valores de todos os parâmetros reduziram significativamente, principalmente no segundo enxágue.

Tabela 3 – Parâmetros físico-químicos dos efluentes da lavanderia do município de Caruaru/PE.

Subprocessos da lavagem / parâmetros analisados	pH	CE (mS)	Salinidade (ppm)	SS (mL.L ⁻¹)	SDT (ppm)	DQO (mg.L ⁻¹)	Temperatura de saída (°C)
Água de Abastecimento	7,91	2,20	0,8 *10 ⁻⁶	0,00	170	88,09	24
Desengomagem	8,33	3,74	2,2*10 ⁻⁶	2,50	2090	1047,82	48,5
Enxágue da desengomagem	8,12	3,21	1,9*10 ⁻⁶	1,50	1784	429,09	36
Tingimento verde-militar	8,93	37,40	26,6*10 ⁻⁶	5,25	22908	2788,38	71,0
1º enxágue do tingimento verde-militar	8,73	18,00	11,7*10 ⁻⁶	4,00	10571	627,39	39,0
2º enxágue do tingimento verde-militar	8,62	6,12	3,7*10 ⁻⁶	2,50	3467	119,50	28,0
Tingimento preto	9,04	43,60	31,4*10 ⁻⁶	150,00	27143	6475,38	66,0
1º enxágue do tingimento preto	8,83	16,90	10,5*10 ⁻⁶	30,00	9928	709,21	35
2º enxágue do tingimento preto	8,77	7,26	4,2*10 ⁻⁶	20,00	4125	215,85	27,0
Tingimento mostarda	9,27	23,80	15,3*10 ⁻⁶	55,00	14194	926,14	79,0
1º enxágue do tingimento mostarda	8,86	11,80	7,6*10 ⁻⁶	4,00	6870	268,88	47,0
2º enxágue do tingimento mostarda	8,39	5,72	3,5*10 ⁻⁶	3,00	3290	89,63	34,0
Amaciante/fixador	8,13	6,94	4,2*10 ⁻⁶	55,00	3907	2189,29	29,0
Entrada da ETE	6,67	7,00	2,7*10 ⁻⁶	7,50	4036	1796,26	28,7
Saída da ETE	6,90	13,86	8,2*10 ⁻⁶	0,20	7913	798,34	30,7

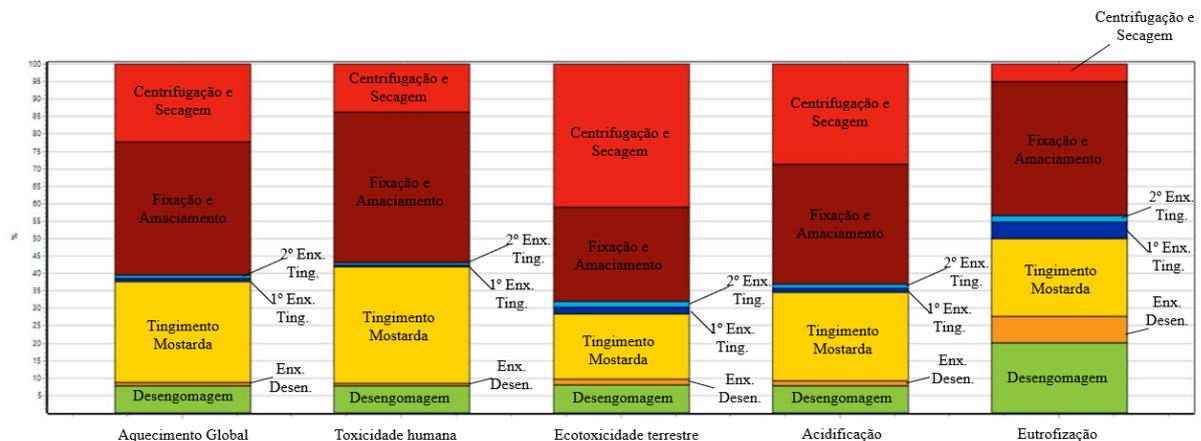
Fonte: O autor (2024).

5.2.1 Análise de ciclo de Vida dos processos da lavanderia de Caruaru/PE

Os valores referentes à cada categoria de impacto avaliada durante o estudo para essa lavanderia estão presentes no Apêndice C.

A Figura 17 apresenta os impactos ambientais relativos ao processo de tingimento direto cor mostarda com uso da AICV CML-IA. Os processos com maior impacto ambiental foram o tingimento direto, o amaciamento com fixação e a centrifugação com secagem. Com exceção da ecotoxicidade terrestre (onde o subprocesso de centrifugação e secagem teve o maior valor, com 0,51 kg 1,4-diclorobenzeno eq), todas as categorias de impacto tiveram o valor mais elevado no subprocesso de amaciamento com fixação. Esse fato é justificado devido ao item da *Ecoinvent* que foi selecionado para representar os químicos com descrição industrial foi de um químico orgânico generalista. Dessa forma, os impactos ambientais foram maiores para o processo de amaciante e fixação devido a este processo utilizar de um volume de massa maior de químicos orgânicos (40 kg) em comparação com outros processos como o de tingimento direto, sendo que este usou apenas 26,3 kg. O aquecimento global é a categoria com maior valor do subprocesso supracitado, com valor de 98,47 kg CO₂ eq. Isso pode ser justificado devido à grande quantidade de químicos orgânicos que são utilizados nesse processo, juntamente com o elevado consumo de energia elétrica. Esta última tem um impacto indireto no potencial de aquecimento global devido a liberação de gás carbônico pela decomposição de plantas nas áreas alagadas das hidrelétricas.

Figura 17 – Categorias de impacto do CML-IA do Tingimento Direto Mostarda.



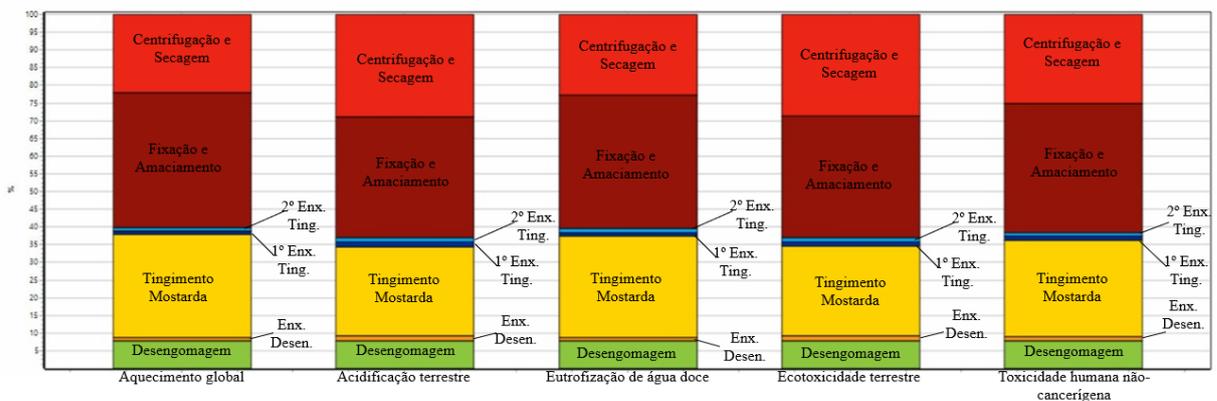
Fonte: O autor (2024).

As categorias de impacto relativas à AICV ReCiPe 2016 *Midpoint* estão presentes na Figura 18. Nessa análise de inventário, todas as categorias de impacto tiveram seus maiores

valores na etapa de amaciamento e fixação. A categoria de aquecimento global novamente aparece com o maior valor, sendo nesse método de análise de 102,49 kg CO₂ eq.

Analisando os dois métodos, percebe-se que o método do CML é mais sensível às contribuições de ecotoxicidade terrestre. Além disso, é notável a diferença entre a categoria de eutrofização do CML-IA com a eutrofização de água doce do ReCiPe 2016 *Midpoint*. Isso pode ser explicado devido a categoria de impacto do CML-IA considerar também contribuições de eutrofização em água não-doce. Esse padrão também se repete nos demais processos de beneficiamento.

Figura 18- Categorias de impacto do ReCiPe 2016 *Midpoint* do Tingimento Direto Mostarda.

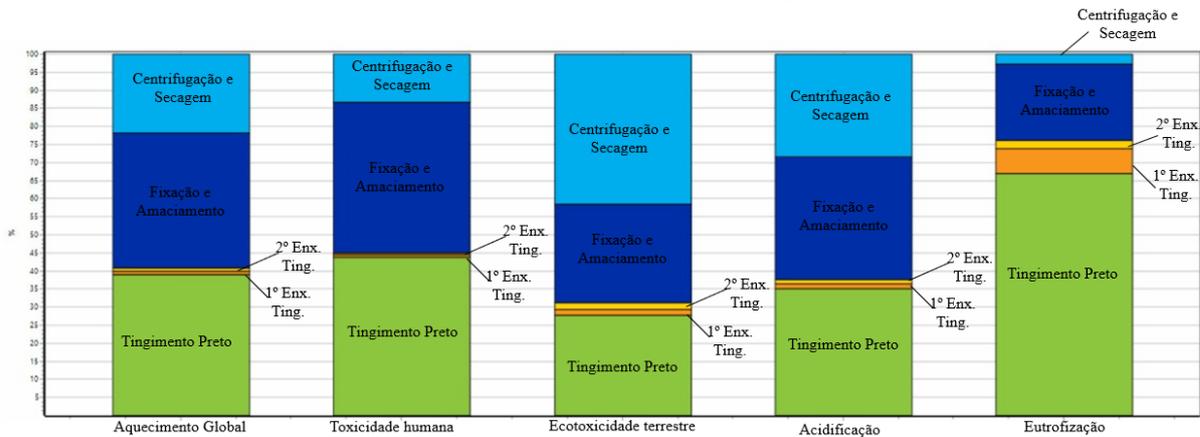


Fonte: O autor (2024).

Na Figura 19 é exposto as categorias de impacto do método CML-IA do Tingimento Direto Preto. Uma diferença entre este tingimento e os demais da lavanderia de Caruaru/PE é o fato de não requisitar desengomagem e consequentemente não precisar de enxágue.

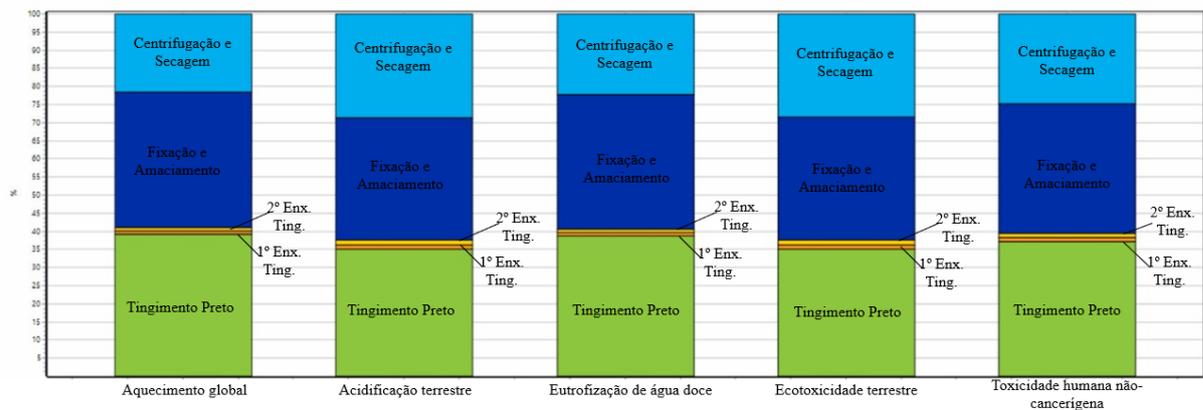
Semelhante ao processo de tingimento direto mostarda, com exceção da categoria de ecotoxicidade terrestre (com valor máximo de 0,51 kg 1,4-diclorobeneno eq no processo de centrifugação e secagem), todas as categorias obtiveram seus valores mais elevados na etapa de tingimento do processo. Onde devido ao elevado valor de DQO da água residuária, e da grande quantidade de produtos químicos requisitadas nessa etapa. A categoria de aquecimento global possui o maior valor de todas, com 98,47 kg CO₂ eq. Assim como a AICV do CML-IA, o consumo elevado de energia elétrica, juntamente com a grande quantidade de produtos químicos consumidos contribui para esse valor elevado nesta categoria em específico.

Figura 19 - Categorias de impacto do CML-IA do Tingimento Direto Preto.



Fonte: O autor (2024).

Na AICV ReCiPe 2016 *Midpoint* do tingimento direto preto (Figura 20), todas as categorias de impacto tiveram seus maiores valores na etapa tingimento preto. A categoria de aquecimento global novamente aparece com o maior valor, sendo nesse método de análise de 106,94 kg CO₂ eq. Mesmo sem os processos de desengomagem e enxágue de desengomagem, a contribuição do aquecimento global do tingimento direto preto é superior àquela gerada pelo tingimento direto mostarda. Esse fato é justificado devido ao maior consumo de químicos orgânicos gerais dentro do processo de tingimento (35 kg), além deste subprocesso ter um tempo de beneficiamento superior aos demais tingimentos diretos levantados nesta lavanderia (uma hora, os demais tingimentos têm 40 minutos de duração).

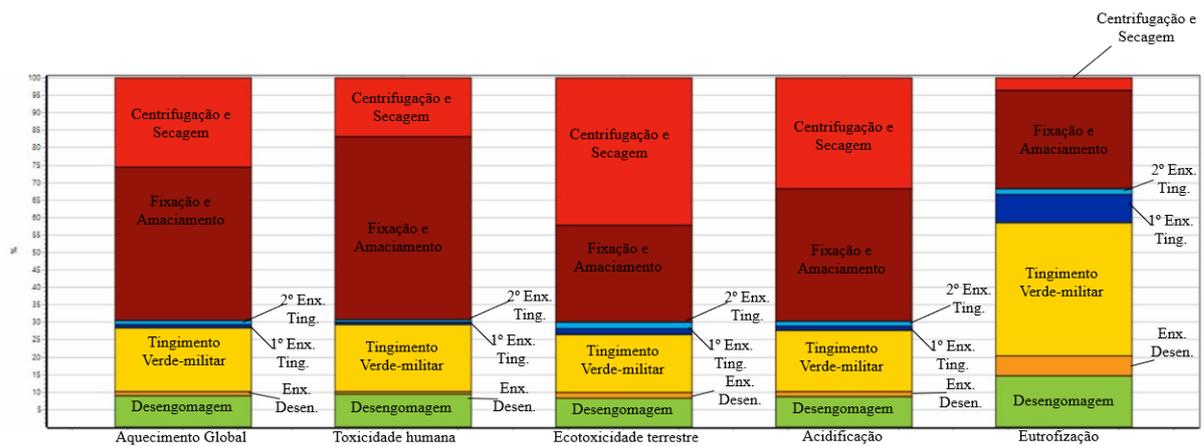
Figura 20 - Categorias de impacto do ReCiPe 2016 *Midpoint* do Tingimento Direto Preto.

Fonte: O autor (2024).

A Figura 21 apresenta os impactos ambientais relativos ao processo de tingimento direto cor verde-militar com uso da AICV CML-IA. As categorias de aquecimento global (essa

com o maior valor absoluto, sendo 98,47 kg CO₂ eq), toxicidade humana, e acidificação tiveram seus maiores valores na etapa de amaciamento e fixação, tendo a mesma justificativa do tingimento mostarda. A categoria de eutrofização teve seu valor mais alto no subprocesso de tingimento. Esse fato está relacionado com o impacto na biota dos corpos hídricos devido a carga de produtos químicos lançadas pelos efluentes dos subprocessos como o tingimento e amaciamento. Como consequência da mortalidade da biota, há a geração de matéria orgânica e consequentemente o enriquecimento de nutrientes no corpo hídrico, ocorrendo assim a eutrofização do meio. Além disso, diversos compostos do processo de tingimento como os corantes possuem em sua composição radicais amina, com potencial de serem líberos no meio, contribuindo na carga de nitrogênio no corpo hídrico. Novamente, o método CML-IA apresentou uma maior sensibilidade na ecotoxicidade terrestre, onde encontrou seu maior valor na etapa de centrifugação e secagem.

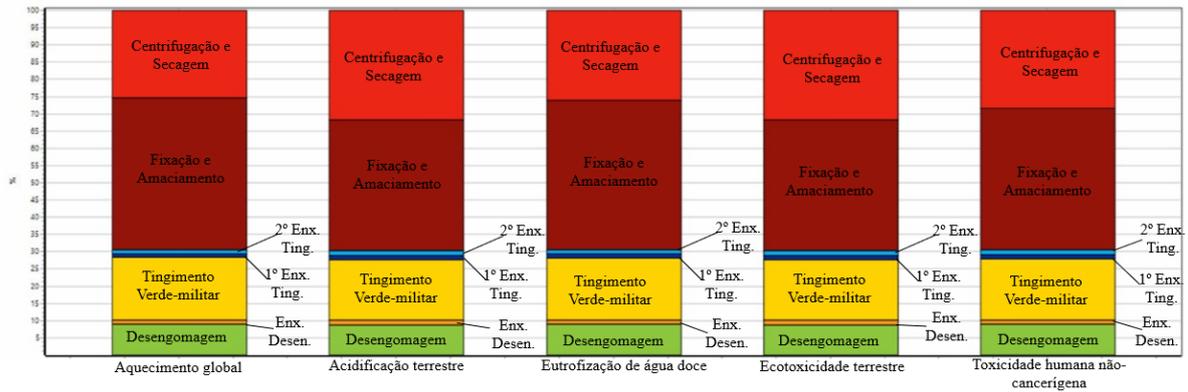
Figura 21 - Categorias de impacto do CML-IA do Tingimento Direto Verde-militar.



Fonte: O autor (2024).

As categorias de impacto relativas à AICV ReCiPe 2016 *Midpoint* estão presentes na Figura 22. Nessa análise de inventário, todas as categorias de impacto tiveram seus maiores valores na etapa de amaciamento e fixação. A categoria de aquecimento global novamente aparece com o maior valor, sendo nesse método de análise de 102,49 kg CO₂ eq. De maneira similar ao tingimento direto mostarda, o elevado consumo de energia devido ao maquinário de potência alta e tempo de funcionamento extenso, além do consumo dos produtos químicos, foram os principais contribuintes para o valor elevado desta categoria.

Figura 22 - Categorias de impacto do ReCiPe 2016 *Midpoint* do Tingimento Direto Verde-militar.



Fonte: O autor (2024).

5.4 Resultados da lavanderia de jeans do município de Toritama/PE

5.4.1 *Parâmetros físico-químicos*

Nas Tabelas 4 a 7 são apresentados os resultados dos parâmetros físico-químicos dos efluentes gerados na referida lavanderia. Similar à lavanderia de Caruaru/PE, grande parte dos parâmetros tiveram seus máximos valores na etapa de tingimento. Na Tabela 6 onde é apresentado a lavagem de amaciado simples, é notável que apenas com um enxágue inicial nas peças de jeans sem nenhum tipo de produto, o efluente vem com uma carga elevada de DQO, o que mostra que o próprio jeans vem com uma carga química própria, provavelmente advinda da aplicação de índigo no tecido durante a tecelagem.

A composição dos Inventários de Ciclo de Vida dos processos de lavagem referentes à essa lavanderia estão presentes no Apêndice D.

Tabela 4 – Subprocessos do beneficiamento Superfashion.

Subprocessos da lavagem / parâmetros analisados	pH	CE (mS)	Salinidade (ppm)	SS (mL.L ⁻¹)	SDT (ppm)	DQO (mg.L ⁻¹)	Temp. de saída (°C)
Desengomagem	6,11	4,59	0,00254	1,60	2674	972,38	29,50
Enxágue da desengomagem	7,19	3,19	0,00116	1,30	1794	348,05	28,00
Estonagem	5,29	4,32	0,00245	13,00	2410	1321,55	30,00
1º enxágue da estonagem	6,99	3,65	0,00185	10,00	2122	282,87	28,00
2º enxágue da estonagem	7,54	2,80	0,00103	9,00	1589	264,94	26,00
Clareamento	7,12	6,09	0,00300	9,70	3410	486,19	42,00
1º enxágue do clareamento	7,57	5,54	0,00279	1,20	3080	247,51	35,00
2º enxágue do clareamento	7,99	3,26	0,00120	0,20	2373	179,22	29,00
Neutralização	5,88	5,29	0,00272	5,50	2988	406,63	31,00
1º enxágue da neutralização	7,10	4,25	0,00212	3,00	2353	247,51	29,00
2º enxágue da neutralização	7,55	3,94	0,00204	2,00	2213	220,78	25,00
Alvejamento	10,62	5,22	0,00244	44	3135	1246,41	65,00
1º enxágue do alvejamento	9,16	4,04	0,00202	8,8	2258	1034,25	40,00
2º enxágue do alvejamento	8,46	3,96	0,00198	0,1	2230	127,27	30,00
Amaciamento	8,89	4,17	0,00157	5,50	2356	1029,83	29,00

Fonte: O autor (2024).

Tabela 5 – Subprocessos do beneficiamento de Tingimento Reativo.

Subprocessos da lavagem / parâmetros analisados	pH	CE (mS)	Salinidade (ppm)	SS (mL.L ⁻¹)	SDT (ppm)	DQO (mg.L ⁻¹)	Temp. de saída (°C)
Alvejamento	10,62	5,22	0,00244	44,00	3135	1246,41	65,00
1º enxágue do alvejamento	9,16	4,04	0,00202	8,80	2258	1034,25	40,00
2º enxágue do alvejamento	8,46	3,96	0,00198	0,10	2230	127,27	30,00
Tingimento	10,82	11,04	0,00493	57,10	6937	4353,59	48,00
1º enxágue do tingimento	10,64	10,60	0,00454	44,00	6501	1772,38	36,00
2º enxágue do tingimento	10,31	10,20	0,00102	40,00	5846	259,74	32,00
Dispersante	10,25	9,63	0,00379	61,00	5493	680,66	31,00
Enxágue do dispersante	9,76	5,91	0,00226	43,00	3399	397,79	30,00
Amaciamento	8,89	4,17	0,00157	5,50	2356	1029,83	29,00

Fonte: O autor (2024).

Tabela 6 – Subprocessos do beneficiamento do Amaciado Simples.

Subprocessos da lavagem / parâmetros analisados	pH	CE (mS)	Salinidade (ppm)	SS (mL.L ⁻¹)	SDT (ppm)	DQO (mg.L ⁻¹)	Temp. de saída (°C)
Enxágue	7,07	3,14	0,00116	11	2271	1135,91	25,00
Amaciamento	8,89	4,17	0,00157	5,50	2356	1029,83	29,00

Fonte: O autor (2024).

Tabela 7 – Entrada e saída da ETE e água mista.

Subprocessos da lavagem / parâmetros analisados	pH	CE (mS)	Salinidade (ppm)	SS (mL.L ⁻¹)	SDT (ppm)	DQO (mg.L ⁻¹)	Temp. de saída (°C)
Abastecimento	7,44	3,32	0,00120	0,00	1810	153,25	25,00
Entrada da ETE	8,55	5,90	0,00371	18,60	4018	636,14	26,33
Saída da ETE	6,88	4,99	0,00220	0,10	2837	486,17	27,50

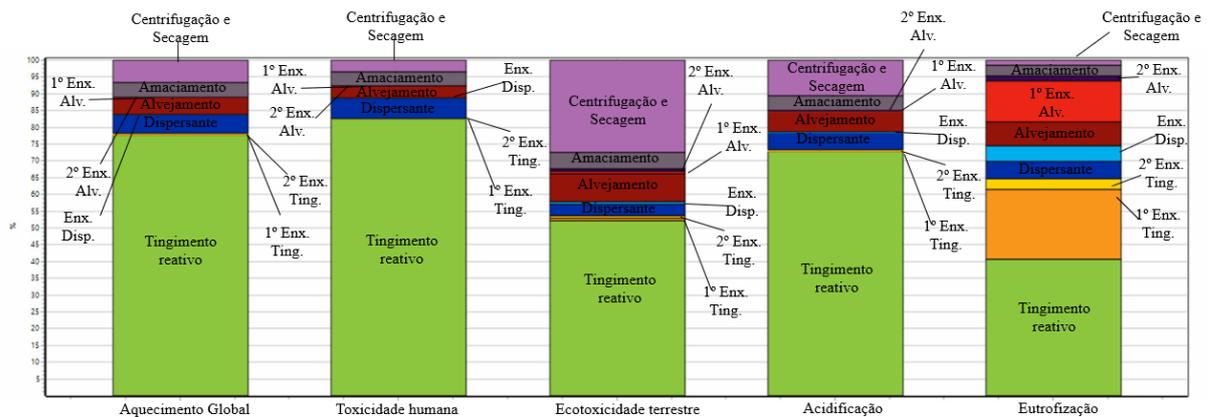
Fonte: O autor (2024).

5.4.2 Análise de ciclo de Vida dos processos da lavanderia de Toritama/PE

Os valores referentes à cada categoria de impacto avaliada durante o estudo para essa lavanderia estão presentes no Apêndice E.

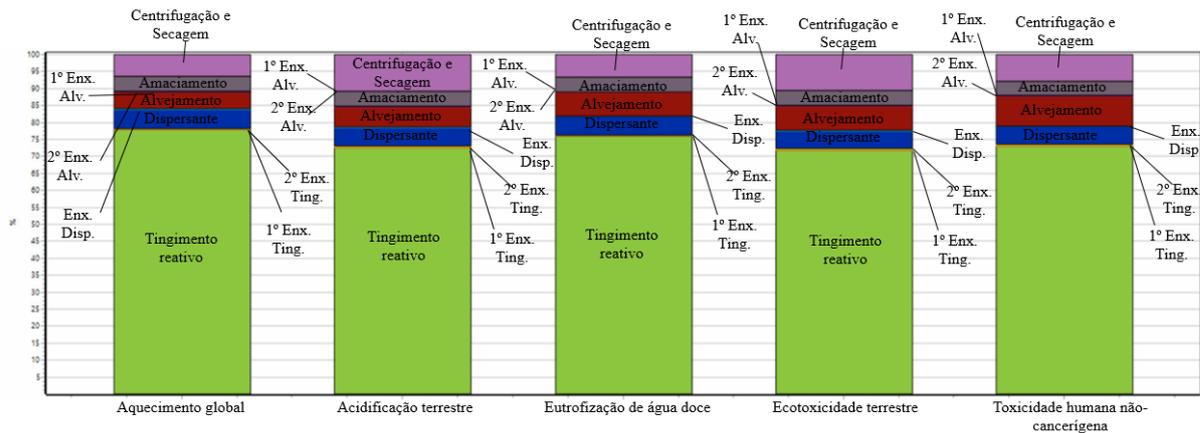
As Figuras 23 e 24 apresentam respectivamente as categorias de impacto do método CML-IA e ReCiPe *Midpoint 2016* para o tingimento reativo cor panthone. Em ambos os métodos, o processo de tingimento reativo é o mais impactante ao meio ambiente. Com exceção da eutrofização no método CML-IA, o subprocesso supracitado passa da marca de 50% da carga de todas as categorias nos dois métodos de análise. O processo de tingimento reativo é o que utilizou a maior carga de consumo de químicos orgânicos de todo o trabalho. Cerca de 237 kg de produtos químicos foram consumidos no beneficiamento da unidade funcional definida, além do elevado valor de DQO presente em suas águas residuárias, como pode ser verificado no valor das categorias referentes à eutrofização. O valor máximo encontrado foi de 627,95 kg CO₂ eq no método de CML na categoria de aquecimento global.

Figura 23 - Categorias de impacto do CML-IA do Tingimento Reativo Panthone.



Fonte: O autor (2024).

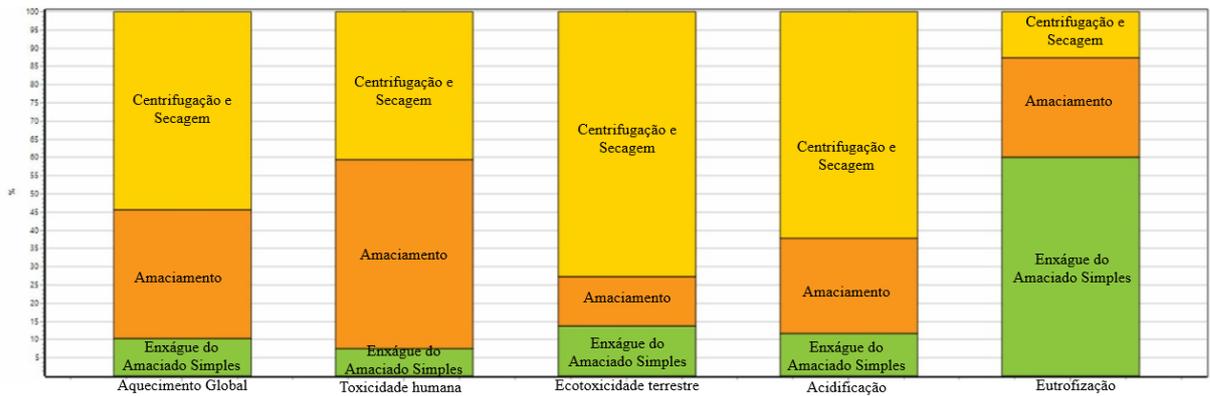
Figura 24 - Categorias de impacto do ReCiPe 2016 *Midpoint* do Tingimento Reativo Panthone.



Fonte: O autor (2024).

A Figura 25 apresenta os impactos ambientais relativos ao processo de lavagem de amaciado simples com uso da AICV CML-IA. O subprocesso de centrifugação e secagem apresentou os maiores valores para o aquecimento global (este com o valor máximo das categorias com 50,98 kg CO₂ eq), ecotoxicidade terrestre e acidificação. Como é um processo simples sem muitos químicos, acabou que o consumo de energia elétrica empregado no subprocesso supracitado tivesse maior valor de impacto ambiental. Na categoria de toxicidade humana, o consumo de químicos e concentração de DQO considerável no efluente fizeram o processo de amaciante como o mais impactante nesta categoria (23,45 kg 1,4-diclorbenzeno eq). Como mencionado no início deste subitem, devido a uma possível carga química advinda do índigo da tecelagem do jeans, o potencial de eutrofização foi apontado devido à contaminação da biota pela ação dos produtos químicos e consequentemente um aumento no índice de mortalidade, ocasionando em geração de matéria orgânica em decomposição e consequentemente o enriquecimento do meio por nitrogênio (0,26 kg PO₄ eq).

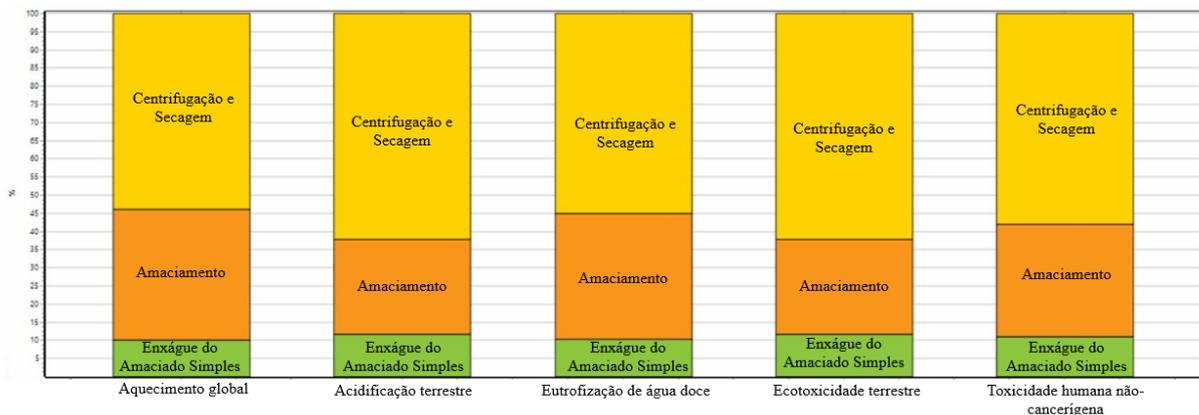
Figura 25 - Categorias de impacto do CML-IA da lavagem do Amaciado Simples.



Fonte: O autor (2024).

Na AICV ReCiPe 2016 *Midpoint* da lavagem do amaciado simples (Figura 26), todas as categorias de impacto tiveram seus maiores valores na etapa de centrifugação e secagem. A categoria de aquecimento global novamente aparece com o maior valor, sendo nesse método de análise de 52,11 kg CO₂ eq. Essa categoria se descartou porque, como citado anteriormente, devido ao baixo consumo de produtos químicos e a eutrofização neste método apenas considerando o impacto em água doce, o maior impacto foi devido ao consumo de energia.

Figura 26 - Categorias de impacto do ReCiPe 2016 *Midpoint* da lavagem do Amaciado Simples.



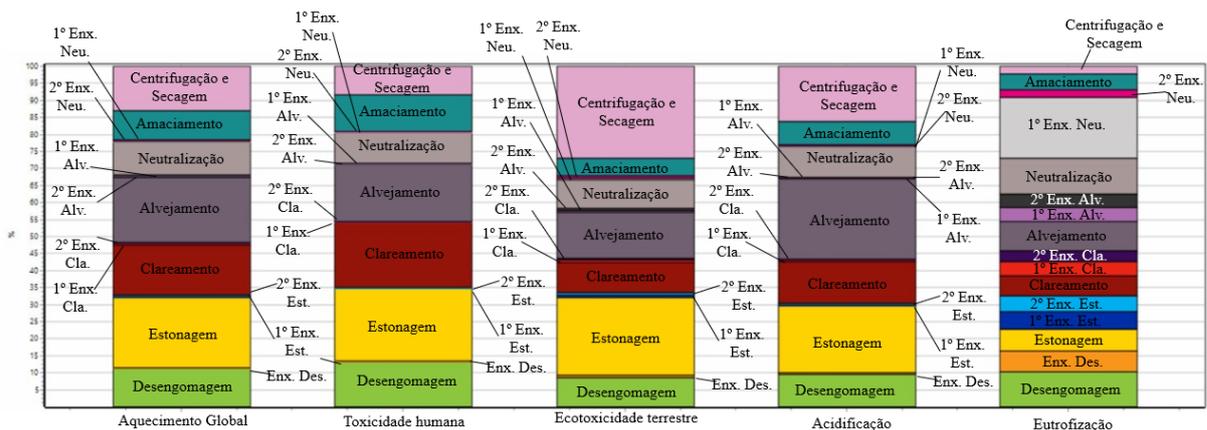
Fonte: O autor (2024).

Na Figura 27 é exposto as categorias de impacto do método CML-IA da lavagem Superfashion, que é um tipo de clareamento do jeans. O processo de estonagem atingiu os valores mais altos de aquecimento global (que é o máximo de todas as categorias, com 79,87 kg CO₂ eq), e de toxicidade humana. Esse fato é justificável devido ao tempo de processamento da estonagem, o que acarreta em um grande consumo de energia elétrica, o que agrega às categorias citadas. A ecotoxicidade terrestre teve seu valor máximo na etapa de centrifugação e secagem, que é uma etapa que possui considerável consumo de energia. A geração de energia

via a construção de usinas hidrelétricas modifica toda a dinâmica fluvial de rios e consequentemente o transporte de sedimentos, que são depositados em sua maioria nos reservatórios e junto a eles os metais potencialmente tóxicos, de origem natural ou antrópica (Gaidoumi et al., 2019; Sojka et al., 2019)

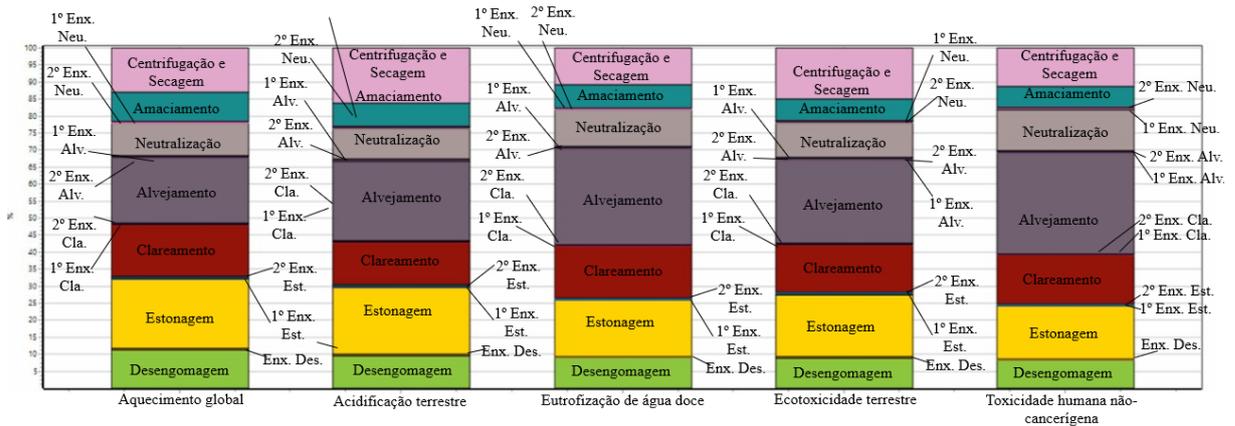
A neutralização se mostrou o subprocesso com o maior índice de acidificação de todo o processo, isso é devido à presença de metabissulfito de sódio neste subprocesso, o que acarreta na geração de compostos ácidos, como a reação com o oxigênio dissolvido na água formando sulfato ácido de sódio e a liberação de dióxido de enxofre em contato com a água (Santos, 2023). O maior valor de eutrofização foi atribuído ao 1º enxágue da neutralização, como nessa etapa não há adição de químicos no subprocesso, deve ser atribuído à etapa anterior, a neutralização.

Figura 27 - Categorias de impacto do CML-IA da lavagem Superfashion.



Fonte: O autor (2024).

As categorias de impacto referentes ao ReCiPe 2016 *Midpoint* estão presentes na Figura 28. Com exceção da categoria de aquecimento global (que pela primeira vez neste trabalho, não alcançou valor absoluto máximo entre as demais categorias de impacto), que teve seu maior valor na etapa de estonagem. O subprocesso de neutralização, por possuir grande valor de DQO, grande consumo de energia, e ter um reagente ácido como produto químico, teve as demais categorias alcançando seus maiores valores nesta etapa (a ecotoxicidade terrestre teve o maior valor entre todas as categorias, com 290,42 kg 1,4-diclorobenzeno).

Figura 28 - Categorias de impacto do ReCiPe 2016 *Midpoint* da lavagem Superfashion.

Fonte: O autor (2024).

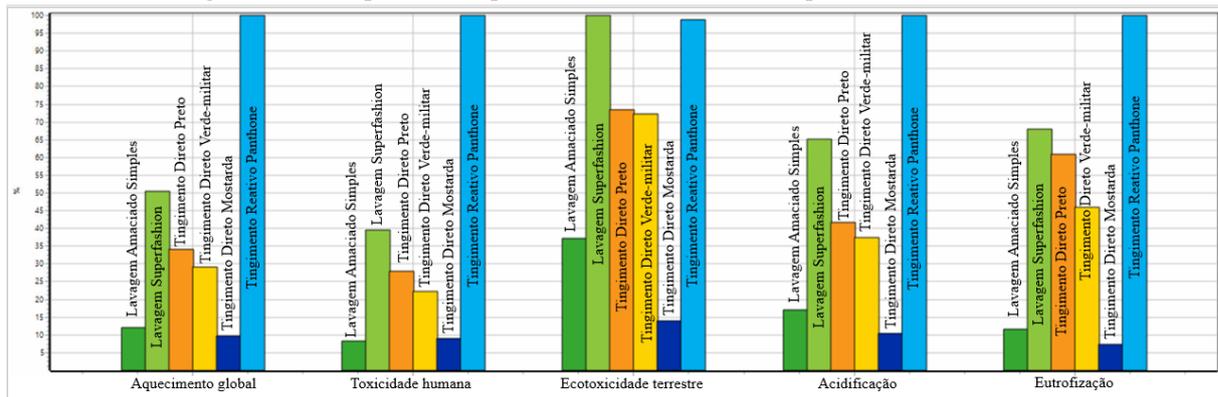
5.5 Comparativos entre as duas lavanderias

5.5.1 *Impactos totais dos beneficiamentos*

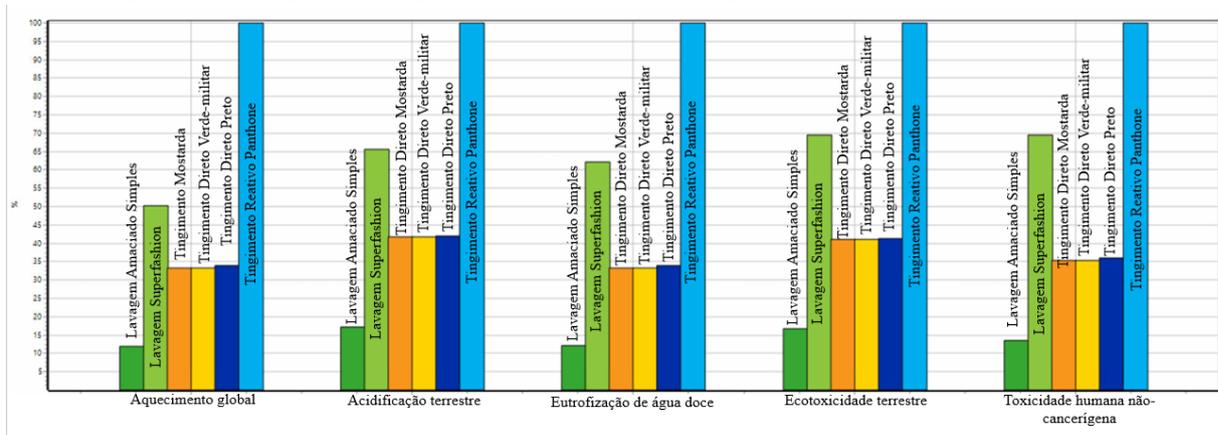
A partir das Figuras 29 e 30, com exceção da ecotoxicidade terrestre no método de CML-IA, os 1000 kg beneficiados por tingimento reativo panthone apresentaram os maiores impactos ambientais nas categorias de todas as lavanderias. Justificável por possuir uma grande carga de químicos orgânicos e com 600 kg de sal como produtos químicos inorgânicos, um grande consumo de energia devido ao tempo de processamento, além das altas cargas de DQO ao longo de todos os subprocessos. A etapa de tingimento têxtil é caracterizada como grande poluidora de corpos hídricos, devido às altas concentrações de químicos como sal, corantes, agentes ensaboantes, surfactantes, ácidos, peróxidos e demais químicos presentes no efluente têxtil (Babu, 2022).

A lavagem Superfashion se configura como o segundo beneficiamento com o maior impacto ambiental, também em todas as categorias, com exceção da ecotoxicidade terrestre do método CML-IA, onde se configura como a mais impactante.

Figura 29 – Comparativo de processos de beneficiamento pelo método CML-IA.



Fonte: O autor (2024).

Figura 30 – Comparativo de processos de beneficiamento pelo método ReCiPe 2016 *Midpoint*.

Fonte: O autor (2024).

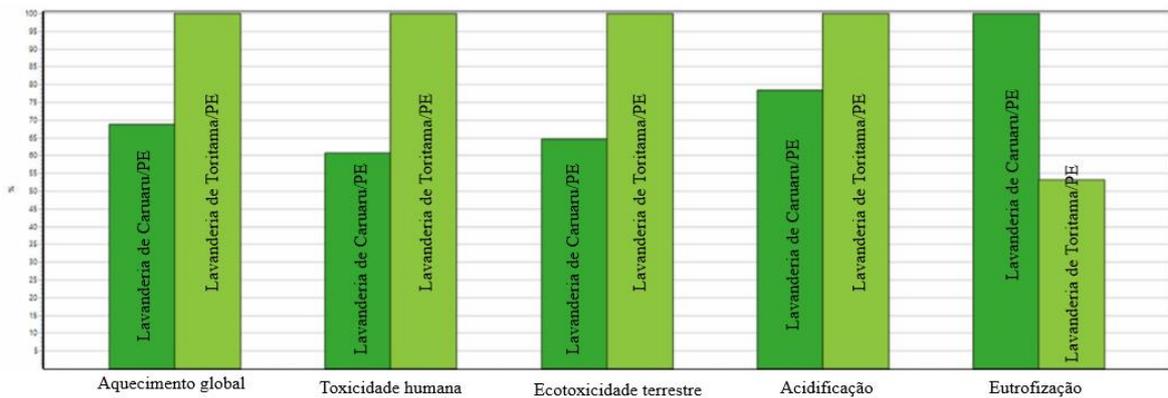
5.5.2 Comparação de ETEs

A lavanderia de Caruaru/PE tem uma geração média de efluente de 100 m³ por dia, enquanto a lavanderia de Toritama/PE gera cerca de 80 m³ por dia. A segunda tem um fator de controle de vazão que a faz trabalhar praticamente 24 h por dia, enquanto a primeira tem um regime de 9h-17h.

Apesar da ETE de Toritama/PE possuir uma menor vazão e também um valor menor de DQO em seu efluente, o consumo energético e o uso de policloreto de alumínio tornam o impacto ambiental dela superior ao da ETE de Caruaru/PE. No método de ReCiPe *Midpoint 2016*, todos os valores de impacto das categorias na ETE de Toritama/PE superaram numa média de 30% as de Caruaru/PE. No método CML-IA, apenas a eutrofização da lavanderia de Caruaru/PE foi superior à de Toritama/PE, pelo fato já mencionado anteriormente da carga de químicos do conjunto beneficiamento-ETE no efluente causar mortalidade na biota e consequente enriquecimento dos corpos hídricos devido à matéria em decomposição.

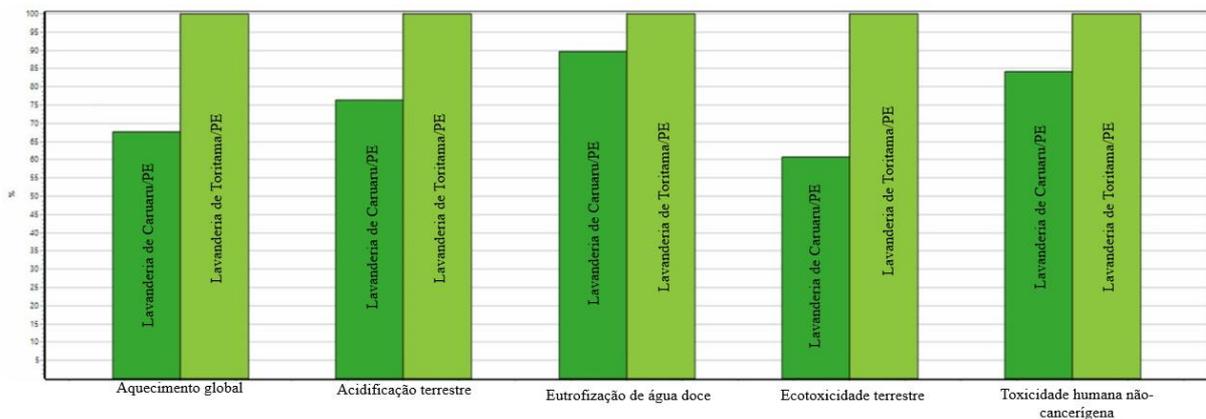
Com exceção da acidificação, o sulfato de alumínio junto com o hidróxido de sódio tem o impacto inferior ao policloreto de alumínio em todas as categorias de impacto avaliadas. A exceção deve ocorrer devido aos íons de sulfato liberados pelo sulfato de alumínio, que é usado no dobro da quantidade do hidróxido de sódio. Além disso, o pH do sulfato de alumínio (3,5) tem valor inferior ao do policloreto de alumínio (entre 4 e 10).

Figura 31 – Comparativo de ETes pelo método CML-IA.



Fonte: O autor (2024).

Figura 32 - Comparativo de ETes pelo método ReCiPe 2016 *Midpoint*.



Fonte: O autor (2024).

6 CONCLUSÃO

Após o desenvolvimento do trabalho, a ACV se mostrou como método eficaz para identificar pontos concentrados de impacto ambiental que ocorrem ao longo do processo.

Os maiores impactos ambientais ocorreram principalmente em subprocessos com, ao mesmo tempo, elevado consumo energético, consumo de produtos químicos e geração de efluentes com alta Demanda Química de Oxigênio. Como é o caso dos tingimentos, da estonagem e dos processos de centrifugação e secagem. O aquecimento global foi a categoria

com maior ocorrência de valores máximos ao longo do estudo dos subprocessos, o que constata o impacto da atividade têxtil em relação às mudanças climáticas.

Ao comparar as ETEs das duas lavanderias, foi observado o impacto elevado do Policloreto de alumínio comparado ao uso simultâneo de hidróxido de sódio e sulfato de alumínio, mesmo a primeira tendo vazão menor e um menor valor de DQO de saída.

Como foi observado, após o segundo enxágue de processos de beneficiamento, há uma redução bastante considerável nos valores dos parâmetros avaliados, como a DQO e os sólidos sedimentáveis. Dessa forma, esses efluentes podem ser reinseridos dentro da cadeia de beneficiamento para usos menos nobres, diminuindo o estresse ambiental.

Dessa forma, para trabalhos futuros, além do estudo do potencial de reuso dos efluentes desses processos, uma expansão para outras lavanderias para a realização de ACV em outros tipos de beneficiamento seria necessário para uma melhor precisão do impacto causado pelas lavanderias no APLCAPE.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE; AGÊNCIA ALEMÃ DE COOPERAÇÃO TÉCNICA. **Roteiro complementar de licenciamento e fiscalização para tipologia têxtil**. Recife: CPRH/AACT. 2001. 125p. Disponível em: <https://www.docsity.com/pt/roteiro-textil/4737207/>. Acesso em 29 jul. 2022.

AHANGARNOKOLAEI, M. A.; ATTARIAN, P.; AYATI, B.; GANJIDOUST, H.; & RIZZO, L. **Life cycle assessment of sequential and simultaneous combination of electrocoagulation and ozonation for textile wastewater treatment**. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021. 9(5), 106251. doi:10.1016/j.jece.2021.106251.

ALGREN, Mikaela; FISHER, Wendy; LANDIS, Amy E. Machine learning in life cycle assessment. In: **Data Science Applied to Sustainability Analysis**. Elsevier, 2021. p. 167-190.

ALMEIDA, A.M.B. **Roupa suja se lava em casa: a seca no agreste pernambucano e a gestão ambiental na Lavanderia Água Limpa**. *Administração Pública e Gestão Social*, 5(3), jul/set, 2013, p. 139-142.

ALVAREZ, M.-D.; BUSCIO, V.; LÓPEZ-GRIMAU, V.; & GUTIÉRREZ-BOUZÁN, C. **LCA study of a new electrochemical and ultraviolet (EC-UV) combined system to decolourise and reuse textile saline effluents: Environmental evaluation and proposal to improve the production process**. *Chemical Engineering Journal*, 2019. 123696. doi:10.1016/j.cej.2019.123696

ANGELIS-DIMAKIS, A.; ALEXANDRATOU, A.; & BALZARINI, A. (2016). **Value chain upgrading in a textile dyeing industry**. *Journal of Cleaner Production*, 2016. 138, 237–247. doi: 10.1016/j.jclepro. 2016.02.137b=NRMRL&dirEntryID=124656>.

APHA, AWWA, WEF. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 22nd edition, Washington, USA, 2012

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão Ambiental– Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE VESTUÁRIO. (2020). **Pernambuco é o maior polo de jeans do Brasil**. GBL Jeans. <https://abravest.org.br/site/pe-e-o-maiorpolo-de-jeans-do-brasil-gbl-jeans/>.

BABU, K.M. Overview on Significant Approaches to Waterless Dyeing Technology. In **Emerging Technologies for Textile Coloration** (pp. 171-188).2022. CRC Press.

BADAWI, A. K.; BAKHOUM, E. S.; & ZAHER, K. **Sustainable Evaluation of Using Nano Zero-Valent Iron and Activated Carbon for Real Textile Effluent Remediation**. *Arab J Sci Eng* 46, 10365–10380 (2021). <https://doi.org/10.1007/s13369-021-05349-5>

BHATT, Ankita et al. Integrating life cycle assessment with quantitative microbial risk assessment for a holistic evaluation of sewage treatment plant. **Science of The Total Environment**, v. 862, p. 160842, 2023.

BEHERA, M.; NAYAK, J.; BANERJEE, S.; CHAKRABORTTY, S.; TRIPATHY, S. K., 2021. **A review on the treatment of textile industry waste effluents towards the development of efficient mitigation strategy: an integrated system design approach**. *J. Environ. Chem. Eng.* 9 <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105277>.

BELL J.; PLUMB J. J.; BUCKLEY C. A.; STUCKEY D. C. **Treatment and decolorization of dyes in an anaerobic baffled reactor**. *Journal of Environmental Engineering* 2000; 126:1026-32.

BERNARDES, M. A. dos S. **Breve introdução à metodologia Avaliação do Ciclo de Vida**. CEFET MG. Belo Horizonte, 2006.

CETINKAYA, A. Y.; & BILGILI, L. **Life Cycle Comparison of Membrane Capacitive Deionization and Reverse Osmosis Membrane for Textile Wastewater Treatment**. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2019. 230(7). doi:10.1007/s11270-019-4203-0.

CHEN, F.; ZHU, J.; YANG, Y.; & WANG, L. **Assessing environmental impact of textile production with water alkalization footprint**. *Science of The Total Environment*, 2020. 719, 137522. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.137522

CIROTH, Andreas et al. LCA database creation: Current challenges and the way forward. **Indonesian J. Life Cycle Assess. Sustain**, v. 3, p. 41-51, 2019.

CURRAN, M.A. **Life Cycle Assessment: principles and practice**. Environmental Protection Agency (EPA), USA, EPA/600/R-06/060, May 2006.

Dicuonzo G, Galeone G, Ranaldo S, Turco M. The key drivers of born-sustainable businesses: evidence from the Italian fashion industry. **Sustain times** 12:1–16. 2020. <https://doi.org/10.3390/su122410237>

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. EPA, 1993. **Life Cycle Assessment: Inventory Guidelines and Principles**. EPA/600/R-92/245. Office of Research and Development. Cincinnati, Ohio, USA.

EUROPEAN COMMISSION – JOINT RESEARCH CENTRE. EC-JRC, 2010a. **International Reference Life Cycle Data System. (ILCD) Handbook—General guide for Life Cycle Assessment—Detailed guidance**. First edition March 2010. Publications Office of the European Union, Luxembourg. Disponível em: <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/ilcd.html>. Acessado em 26 jul. 2022.

EUROPEAN COMMISSION – JOINT RESEARCH CENTRE. EC-JRC, 2010b. Analysis of existing environmental impact assessment methodologies for use in life cycle assessment—background document. **ILCD Handbook—International Reference Life Cycle Data System, European Union**. Disponível em: <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/ilcd.html>. Acessado em 26 jul. 2022.

GAIDOUMI, A. E. L.; TANJI, K.; BENABDALLAH, A. C.; TALEB, A.; KHERBECHE, A. Characterization and Quantification of Heavy Metals in Oued Sebou Sediments. **Hindawi The Scientific World Journal**, 2019. pp 1-9. <https://doi.org/10.1155/2019/7496576>.

GARVERT, U., 2017. A comparative study of recycling in the European and Brazilian textile industry. Doctoral dissertation. **Sao Paulo School of Business Administration**.

GONZALEZ, Victoria; LOU, Xingqiu; CHI, Ting. Evaluating Environmental Impact of Natural and Synthetic Fibers: A Life Cycle Assessment Approach. **Sustainability**, v. 15, n. 9, p. 7670, 2023.

GRISALES, C.M.; SALAZAR, L.M; & GARCIA, D.P. **Treatment of synthetic dye baths by Fenton processes: evaluation of their environmental footprint through life cycle assessment**. *Environ Sci Pollut Res* 26, 4300–4311 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2757-9>.

Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., & Olsen, S. I. (2018). *Life Cycle Assessment: Theory and practice*. Geneva, Switzerland: Springer

HOLKAR, C. R.; JADHAV, A. J.; PINJARI, D.V.; MAHAMUNI, N. M.; PANDIT, A.B., 2016. **A critical review on textile wastewater treatments: possible approaches**. *J. Environ. Manag.* 182, 351–366. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.07.090>.

HUIJBREGTS, M. A. J.; STEINMANN, Z. J. N.; ELSHOUT, P. M. F.; STAM, G.; VERONES, F.; VIEIRA, M.; ... VAN ZELM, R. **ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level**. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2016, 22(2), 138–147. doi:10.1007/s11367-016-1246-y

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. IPCC, 2014. **Mitigation of climate change**. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. 14043:2000. **Environmental Management - Life cycle Interpretation**. Genève: Switzerland.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. ISO 14040, 2006. **Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework**. Genève: Switzerland.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. ISO 14041, 1998. **Environmental Management – Life cycle assessment: Goal and scope definition and Inventory analysis**. Genève: Switzerland.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. ISO 14042, 2000. **Environmental Management – Life cycle assessment**. Life cycle Impact assessment. Genève: Switzerland.

JAMSHAD, HAFSA ET AL. Effect of different washing methods on denim fabric properties and their effluent's environmental impact. **Mehran University Research Journal of Engineering and Technology**, v. 42, n. 3, p. 33-41, 2023.

JØRGENSEN, K. R.; VILLANUEVA, A.; & WENZEL, H. **Use of life cycle assessment as decision-support tool for water reuse and handling of residues at a Danish industrial laundry**. Waste Management & Research, 2004. 22(5), 334–345. doi:10.1177/0734242x04046489.

KAAB, A., SHARIFI, M., MOBILI, H., NABAVI-PELESARAEI, A., CHAU, K.-W. Combined life cycle assessment and artificial intelligence for prediction of output energy and environmental impacts of sugarcane production. **Sci. Total Environ.** 2019. 664, 1005.

KARAOSMAN, H.; PERRY, P.; BRUN, A.; & MORALES-ALONSO, G. **Behind the runway: extending sustainability in luxury fashion supply chains**. J. Bus. Res. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2018.09.017> (2018).

LALNUNHLIMI, S.; KRISHNASWAMY, V. **Decolorization of azo dyes (Direct Blue 151 and Direct Red 31) by moderately alkaliphilic bacterial consortium**. Brazilian Journal of Microbiology, v. 47, p. 39-46, 2016.

LEE Y. H. & PAVLOSTATHIS S. G. **Decolorization and toxicity of anthraquinone textile dyes under methanogenic conditions**. Water Research 2004;38: 1838-52.

LI, X.; REN, J.; WU, Z.; WU, X.; & DING, X. (2021). **Development of a novel process-level water footprint assessment for textile production based on modularity**. Journal of Cleaner Production, 2021. 291, 125884. doi:10.1016/j.jclepro.2021.125884.

LI, Xue et al. Water footprint assessment of wool products with a low-water footprint baseline. **Sustainable Production and Consumption**, v. 34, p. 310-317, 2022.

LI, Y.; LU, L.; TAN, Y.; SHEN, WANG L.; SHEN M. **Decoupling water consumption and environmental impact on textile industry by using water footprint method: a case study in China**. Water, 9 (2017), p. 124.

LIU, Yanyan et al. Development of a multi-region blue/grey water management system-- Application to the Yangtze River Economic Belt. **Journal of Cleaner Production**, v. 380, p. 134924, 2022.

LUO, YAN; WU, XIONGYING; DING, XUEMEI. Carbon and water footprints assessment of cotton jeans using the method based on modularity: A full life cycle perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 332, p. 130042, 2022.

MAJEAU-BETTEZ, Guillaume et al. Choice of allocations and constructs for attributional or consequential life cycle assessment and input-output analysis. **Journal of Industrial Ecology**, v. 22, n. 4, p. 656-670, 2018.

MAHIAT, Tashfia et al. Modeling the environmental and social impacts of the handloom industry in Bangladesh through life cycle assessment. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 9, n. 1, p. 239-252, 2023.

MARRUCCI, Luca et al. Using a life cycle assessment to identify the risk of “circular washing” in the leather industry. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 185, p. 106466, 2022.

MATTIOLI, D.; FLORIO, L. D.; GIORDANO, A.; TARANTINI, M.; SCALBI, S.; AGUADO, M., BIANCHI, R., et al., 2005. **Efficient Use of Water in the Textile Finishing Industry**. E-Water 2005/8. <http://www.ewa-online.eu/e-water-documents.html>.

MISTRETTA, M., CAPUTO, P., CELLURA, M., AND CUSENZA, M.A. Energy and environmental life cycle assessment of an institutional catering service: An Italian case study. **Sci. Total Environ.** 2019. 657, 1150.

MOHAN, S.; OKE, N.; & GOKUL, D. **Conventional and zero liquid discharge treatment plants for textile wastewater through the lens of carbon footprint analysis**. Journal of Water and Climate Change, 2020. doi:10.2166/wcc.2020.100

MENOUFI, K. **Life cycle analysis and life cycle impact assessment methodologies: a state of the art**. Master Dissertation. University of Lleida; 2011.

MOHER, D.; LIBERATI, A.; TETZLAFF, J.; ALTMAN, D. G. **Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement**. International Journal of Surgery, 2010. 8, 5, 336-341. DOI: 10.1016/j.ijssu.2010.02.007.

NAKHATE, P. H.; MORADIYA, K. K.; PATIL, H. G.; MARATHE, K. V.; & YADAV, G. D. **Case study on sustainability of textile wastewater treatment plant based on lifecycle assessment approach**. Journal of Cleaner Production, 2019. 118929. doi:10.1016/j.jclepro.2019.118929.

NOR, F. H. M.; ABDULLAH, S.; YUNIARTO, A.; IBRAHIM, Z.; NOR, M. H. M.; & HADIBARATA, T. **Production of lipopeptide biosurfactant by *Kurthia gibsonii* KH2 and their synergistic action in biodecolourisation of textile wastewater**. Environmental Technology & Innovation. 2021, 22, 101533

NOVOTNY C.; DIAS N.; KAPANEN A.; MALACHOVA K.; VANDROVCOVA M.; ITARVAARA M, et al. **Comparative use of bacterial, algal and protozoan tests to study toxicity of azo and anthraquinone dyes**. Chemosphere 2006; 63: 1436e42.

PENNINGTON, D. W.; POTTING, J.; FINNVEDEN, G.; LINDEIJER, E.; JOLLIET, O.; RYDBERG, T.; REBITZER, G. **Life cycle assessment part 2: current impact assessment practice**. Environ. Int. 2004, 30, 721–739.

PEREIRA, A.M.B.A. **Dinâmica Formal-Informal em Lavanderias de Jeans e suas implicações nas relações de trabalho**. 2018. 330 p. Tese (Doutorado em Administração) - Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.

PETERS, G. M.; SANDIN, G.; & SPAK, B. **Environmental prospects for mixed textile recycling in Sweden**. ACS Sustain. Chem. Eng. 7, 11682–11690 (2019).

POWAR, A.; PERWUELZ, A.; BEHARY, N.; HOANG, L.V.; AUSSENAC, T.; LOGHIN, C.; MAIER, S.S.; GUAN, J.; CHEN, G. **Environmental Profile Study of Ozone Decolorization of Reactive Dyed Cotton Textiles by Utilizing Life Cycle Assessment**. *Sustainability* 2021, 13, 1225.

QIAN, W.; ZHU, J.; CHEN, F.; JI, X.; WANG, X.; & WANG, L. **Water footprint assessment of viscose staple fiber garments**. *Water Supply*, 2021. 21(5), 2217-2232.

RAJAKUMARI, S.P.; KANMANI, S. **Environmental life cycle assessment of zero liquid discharge treatment technologies for textile industries, Tirupur: A case study**. *J. Sci. Ind. Res.* 2008, 67, 461–467.

SANTOS, F.P. Indicadores de desenvolvimento sustentável pela caracterização química e tecnológica de corantes, efluentes e lodos provenientes do polo têxtil de Pernambuco. **Universidade Federal Rural de Pernambuco**. 2023.

SAXENA, Sujata; RAJA, A. S. M.; ARPUTHARAJ, Anuprabha. Challenges in sustainable wet processing of textiles. **Textiles and clothing sustainability: sustainable textile chemical processes**, p. 43-79, 2017.

SCHAUBROECK, T., SCHAUBROECK, S., HEIJUNGS, R., ZAMAGNI, A., BRANDO, M., BENETTO, E. Attributional & consequential life cycle assessment: definitions, conceptual characteristics and modelling restrictions. **Sustainability**, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13137386>

ŞENER FIDAN, Fatma; KIZILKAYA AYDOĞAN, Emel; UZAL, Niğmet. The impact of organic cotton use and consumer habits in the sustainability of jean production using the LCA approach. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 4, p. 8853-8867, 2023.

SHEN, B. **Sustainable Fashion Supply Chain: Lessons from H&M**. *Sustainability* 2014, 6, 6239- 6249.

SHEN, B.; LI, Q.; DONG, C.; & PERRY, P. **Sustainability Issues in Textile and Apparel Supply Chains**. *Sustainability*, 9(9), 1592. 2017.

SHEN, L., WORRELL, E., PATEL, M.K. **Environmental impact assessment of man-made cellulose fibres**. *Resources, Conservation and Recycling*, n. 55, p. 260-274, 2010.

SILVA FILHO, A.R.A. **Sistema de gestão ambiental como estratégia empresarial no ramo hoteleiro**. Associação Brasileira de Engenharia de Produção – ABEPRO - Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. *Revista Produção online*. ISSN 1676 -1901 / Vol. VIII/ Num. III/ 2008. Disponível em: <http://producaoonline.org.br/rpo/article/download/110/152>.

SILVA FILHO, Antônio Romão Alves et al. Classificação, caracterização e diagnóstico das Lavanderias de Beneficiamento de Jeans na Cidade de Caruaru-PE, no Agreste Pernambucano. **Research, society and development**, v. 10, n. 1, p. e57810112186-e57810112186, 2021.

SILVA, B. L.; & XAVIER, M. G. P. Inovação e tecnologia em lavanderias de jeans do polo têxtil do agreste Pernambucano e a implementação das atividades de reuso de água. **Brazilian Journal of Development**, 2020. 6(6), 41458-41476.

SILVA, Rogerio et al. Life Cycle Analysis of Dye Degradation Using Advanced Oxidative Processes. **Chemical Engineering Transactions**, v. 86, p. 589-594, 2021.

SINDILAV - SINDICATO INTERMUNICIPAL DE LAVANDERIAS NO ESTADO DE SÃO PAULO. SINDILAV, 2022. **Panorama do Mercado**. Disponível em <https://sindilav.com.br/mercado-panorama/>. Acesso em 10 jul. 2022.

SOJKA, M.; JASKUŁA, J.; SIEPAK, M. Heavy Metals in Bottom Sediments of Reservoirs in the Lowland Area of Western Poland: Concentrations, Distribution, Sources and Ecological Risk. **Water**. 2019, 11, 56.

STEINBERGER, J.K., FRIOT, D., JOLLIET, O., ERKMAN, S. **A spatially explicit life cycle inventory of the global textile chain**. *Int J Life Cycle Assess*, n. 14, p. 443-455, 2009.

TEMIZEL-SEKERYAN, S.; & HICKS, A. L. **Cradle-to-grave environmental impact assessment of silver enabled t-shirts: Do nano-specific impacts exceed non nano-specific emissions?** *NanoImpact*, 2021, 22, 100319. doi:10.1016/j.impact.2021.100319.

UNIVERSITY OF LEIDEN. **INSTITUTE OF ENVIRONMENTAL SCIENCES (CML)**. cml.leiden.edu. Acessado em 26 jan. 2024.

VAN DER WERF, H.M.G.; TURUNEN, L. **The environmental impacts of the production of hemp and flax textile yarn**. *Ind Crops and Products*, n. 27, p. 1-10, 2008.

WENZEL H.; KNUDSEN, H.H.; KRISTENSEN, G.H.; HANSEN, J. **Reclamation and reuse of process water from reactive dyeing of cotton**. *Desalination*, 106 (1996), pp. 195-203, 10.1016/S0011-9164(96)00109-9.

YANG, X., LÓPEZ-GRIMAU, V., VILASECA, M., & CRESPI, M. **Treatment of Textile Wastewater by CAS, MBR, and MBBR: A Comparative Study from Technical, Economic, and Environmental Perspectives**. *Water*, 2020. 12(5), 1306. doi:10.3390/w12051306.

YUAN, Z.-W., ZHU, Y.-N., SHI, J.-K., LIU, X., & HUANG, L. **Life-cycle assessment of continuous pad-dyeing technology for cotton fabrics**. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2012. 18(3), 659–672. doi:10.1007/s11367-012-0470-3.

ZAINITH, S.; SANDHYA, S.; SAXENA, G.; & BHARAGAVA, R. **Microbes: an eco-friendly tools for the treatment of industrial wastewaters**. *Microbes and Environmental Management* 2016, 75–100.

ZAMANI, B. **Carbon footprint and energy use of textile recycling techniques**. *Master of science thesis*. Department of chemical and biological engineering, Chalmers University of Technology, 2011.

ZHANG, Siyuan et al. Environmental assessment of fabric wet processing from gate-to-gate perspective: Comparative study of weaving and materials. **Science of The Total Environment**, v. 857, p. 159495, 2023.

ZHANG, Yi et al. Potential trade-off between water consumption and water quality: life cycle assessment of nonaqueous solvent dyeing. **Water Research**, v. 215, p. 118222, 2022.

ZHU, Lisha et al. Assessing baseline water footprints of natural fiber textile products in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 379, p. 134747, 2022.

ZHU, J. X.; YANG, Y. D.; LI, Y.; XU, P. H.; WANG, L. L. **Water footprint calculation and assessment of viscose textile**. *Ind. Textila*, 2020. 71 (1), 33e40. <http://dx.doi.org/10.35530/IT.071.01.1642>.

APÊNDICE A - ROTEIRO DE ENTREVISTA PARA AS VISITAS NAS LAVANDERIAS DO APLCAPE

1. DADOS DA LAVANDERIA				
Nome Fantasia:				
Opera desde:				
CNAE/Atividade Principal:				
Endereço completo (Logradouro, cidade, estado):				
E-mail institucional:		Fone:		
Responsável Legal:				
E-mail:		Cargo:		
Área construída (m ²):		Área útil (m ²):		Nº de empregados:
Período de Produção				
Capacidade de produção atual (peças/mês)				

Área de localização (Urbana, Industrial, Rural):	
2. CONSUMO DE ÁGUA	
Faz uso de água de chuva?	
Caso afirmativo, qual a média mensal? (Caso possua histórico, anexar)	
Faz uso de água de poço?	
Caso afirmativo, qual a média mensal? (Caso possua histórico, anexar)	
Faz uso de água de manancial? Se sim, qual(is)?	
Caso afirmativo, qual a média mensal? (Caso possua histórico, anexar)	
Faz uso de água de concessionária?	
Caso afirmativo, qual a média mensal? (Caso possua histórico, anexar)	
Usa hidrômetro para medir o consumo de água?	
Faz acompanhamento da qualidade da água? Se sim, que métodos de análise são usados?	
3. PROCESSOS DE BENEFICIAMENTO	
Quais os principais processos de beneficiamento de jeans que a empresa trabalha? Relatar no mínimo 10 lavagens.	
Possui fluxograma dos processos? Se sim, descrever.	
Possui manuais e rotinas operacionais? Se sim, descrever.	
Possui receituário dos tipos de lavagem? Se sim, anexar.	
Processo 1 _____	
Descrição do processo acima, junto as relações de banho de cada etapa (Produtos químicos, equipamentos, uso de energia, água consumida no processo, volume de jeans usado pra esse processo).	
Processo 2 _____	
Descrição do processo acima, junto as relações de banho de cada etapa (Produtos químicos, equipamentos, uso de energia, água consumida no processo) volume de jeans usado pra esse processo.	
Processo 3 _____	
Descrição do processo acima, junto as relações de banho de cada etapa (Produtos químicos, equipamentos, uso de energia, água consumida no processo, volume de jeans usado pra esse processo).	
Processo 4 _____	
Descrição do processo acima, junto as relações de banho de cada etapa (Produtos químicos, equipamentos, uso de energia, água consumida no processo, volume de jeans usado pra esse processo).	

Processo 5 _____				
Descrição do processo acima, junto as relações de banho de cada etapa (Produtos químicos, equipamentos, uso de energia, água consumida no processo, volume de jeans usado pra esse processo).				
4. EFLUENTES LÍQUIDOS INDUSTRIAIS				
É efetuado algum tipo de tratamento para os efluentes industriais?				
Caso acima seja afirmativo, qual método é usado?				
Há um medidor de vazão para fluente líquido industrial?				
Caso acima seja afirmativo, qual a vazão média diária? (m ³ /h)				
Qual o volume de água consumido por peças beneficiadas?				
A água tratada é reutilizada?				
Caso acima seja afirmativo, em que processos?				
Em que quantidade essa água é reutilizada? (m ³)				
O excesso de água tratada é destinado a que local? (Rede coletora, corpo hídrico receptor, terreno etc.) Nome do corpo receptor e vazão de lançamento)				
Qual é o destino final do lodo tratado? (Aterro sanitário, compostagem, etc.).				
5. CONSUMO				
Equipamento Consumidor	Nº de Equipamentos	Consumo usado por peças beneficiadas	Consumo diário	
			Quantidade	Unidade de medida

**APÊNDICE B – INVENTÁRIOS DE CICLO DE VIDA DAS LAVAGENS
PERTENCENTES À LAVANDERIA DE CARUARU/PE**

Tabela 8 – ICV do processo de tingimento direto mostarda de 1000 kg de tecido.

1. DESENGOMANTE (t=20 min)	
Materiais usados	10000,00 L de água
	5,00 kg de químicos orgânicos
Energia elétrica consumida	24,53 kWh
Emissões para a água	10,48 kg DQO
2.ENXÁGUE DO DESENGOMANTE (t=5 min)	
Materiais usados	10000,00 L de água

Energia elétrica consumida	6,13 kWh
Emissões para a água	4,29 kg DQO
3. TINGIMENTO MOSTARDA (t=40 min)	
	10000,00 L de água
Materiais usados	150,00 kg de sal 26,30 kg de químicos orgânicos
Energia elétrica consumida	49,07 kWh
Emissões para a água	9,26 kg DQO
4. 1º ENXÁGUE TINGIMENTO MOSTARDA (t=5 min)	
Materiais usados	10000,00 L de água
Energia elétrica consumida	6,13 kWh
Emissões para a água	2,69 kg DQO
5. 2º ENXÁGUE TINGIMENTO MOSTARDA (t=5 min)	
Materiais usados	10000,00 L de água
Energia elétrica consumida	6,13 kWh
Emissões para a água	0,90 kg DQO
6. AMACIAMENTO E FIXAÇÃO (t=20 min)	
Materiais usados	8000 L de água 40 kg de químicos orgânicos
Energia elétrica consumida	24,53 kWh
Emissões para a água	17,51 kg DQO
7. CENTRIFUGAÇÃO E SECAGEM (t=1 h 05 min)	
Energia elétrica consumida	140,90 kWh

Fonte: O autor (2024).

Tabela 9 – ICV do processo de tingimento direto preto de 1000 kg de tecido.

1. TINGIMENTO PRETO (t=1 h)	
	10000,00 L de água
Materiais usados	200,00 kg de sal 35,00 kg de químicos orgânicos
Energia elétrica consumida	73,60 kWh
Emissões para a água	64,75 kg DQO
2. 1º ENXÁGUE TINGIMENTO PRETO (t=5 min)	
Materiais usados	10000,00 L de água
Energia elétrica consumida	6,13 kWh
Emissões para a água	7,09 kg DQO
3. 2º ENXÁGUE TINGIMENTO PRETO (t=5 min)	
Materiais usados	10000,00 L de água
Energia elétrica consumida	6,13 kWh

Emissões para a água	2,16 kg DQO
4. AMACIAMENTO E FIXAÇÃO (t=20 min)	
Materiais usados	8000 L de água 40 kg de químicos orgânicos
Energia elétrica consumida	24,53 kWh
Emissões para a água	17,51 kg DQO
5. CENTRIFUGAÇÃO E SECAGEM (t=1 h 05 min)	
Energia elétrica consumida	140,90 kWh

Fonte: O autor (2024).

Tabela 10 – ICV do processo de tingimento direto verde-militar de 1000 kg de tecido.

1. DESENGOMANTE (t=20 min)	
Materiais usados	10000,00 L de água 5,00 kg de químicos orgânicos
Energia elétrica consumida	24,53 kWh
Emissões para a água	10,48 kg DQO
2.ENXÁGUE DO DESENGOMANTE (t=5 min)	
Materiais usados	10000,00 L de água
Energia elétrica consumida	6,13 kWh
Emissões para a água	4,29 kg DQO
3.TINGIMENTO VERDE-MILITAR (t=40 min)	
Materiais usados	10000,00 L de água 200,00 kg de sal 10,00 kg de químicos orgânicos
Energia elétrica consumida	49,07 kWh
Emissões para a água	27,88 kg DQO
4. 1º ENXÁGUE TINGIMENTO VERDE MILITAR (t=5 min)	
Materiais usados	10000,00 L de água
Energia elétrica consumida	6,13 kWh
Emissões para a água	6,27 kg DQO
5. 2º ENXÁGUE TINGIMENTO VERDE MILITAR (t=5 min)	
Materiais usados	10000,00 L de água
Energia elétrica consumida	6,13 kWh
Emissões para a água	1,20 kg DQO
6. AMACIAMENTO E FIXAÇÃO (t=20 min)	
Materiais usados	8000 L de água 40 kg de químicos orgânicos
Energia elétrica consumida	24,53 kWh
Emissões para a água	17,51 kg DQO
7. CENTRIFUGAÇÃO E SECAGEM (t=1 h 05 min)	
Energia elétrica consumida	140,90 kWh

Fonte: O autor (2024).

Tabela 11 – ICV do processo da ETE durante 30 anos.

	1095000,00	m ³ de água
	372,30	kg de polímero
Materiais usados	273750,00	kg de sulfato de alumínio
	136875,00	kg de hidróxido de sódio
Energia elétrica consumida	706932,00	kWh
Emissões para a água	874182,30	kg DQO

Fonte: O autor (2024).

APÊNDICE C – RESULTADOS DA ACV DE CADA LAVAGEM E ETE DA LAVANDERIA DE CARUARU/PE

Tabela 12 – Resultados das categorias de impacto para o tingimento direto mostarda de 1000 kg de tecido pelo Método CML-IA.

Categoria de impacto/lavagens	Aquecimento global (GWP100a)	Toxicidade humana	Ecotoxicidade terrestre	Acidificação	Eutrofização
Unidade	kg CO2 eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg SO2 eq	kg PO4 eq
Total	258,45	150,02	1,25	1,66	1,25
Desengomagem	20,39	11,77	0,10	0,13	0,25
Enxágue da desengomagem	2,50	0,90	0,02	0,02	0,10
Tingimento mostarda	74,64	50,15	0,23	0,42	0,28
1º enxágue tingimento mostarda	2,50	0,90	0,02	0,02	0,06
2º enxágue tingimento mostarda	2,50	0,90	0,02	0,02	0,02
Amaciamento e fixação	98,47	64,63	0,34	0,57	0,48
Centrifugação e secagem	57,45	20,77	0,51	0,48	0,06

Fonte: O autor (2024).

Tabela 13 - Resultados das categorias de impacto para o tingimento direto mostarda de 1000 kg de tecido pelo Método ReCiPe.

Categoria de impacto/lavagens	Aquecimento global	Acidificação terrestre	Eutrofização de água doce	Ecotoxicidade terrestre	Toxicidade humana não-cancerígena
Unidade	kg CO2 eq	kg SO2 eq	kg P eq	kg 1,4-DCB	kg 1,4-DCB
Total	267,76	1,38	0,05	699,88	182,67
Desengomagem	21,12	0,11	0,00	55,43	14,44

Enxágue da desengomagem	2,55	0,02	0,00	8,76	2,00
Tingimento mostarda	77,76	0,35	0,01	177,30	49,87
1º enxágue tingimento mostarda	2,55	0,02	0,00	8,76	2,00
2º enxágue tingimento mostarda	2,55	0,02	0,00	8,76	2,00
Amaciamento e fixação	102,49	0,47	0,02	239,49	66,44
Centrifugação e secagem	58,73	0,40	0,01	201,38	45,93

Fonte: O autor (2024).

Tabela 14 - Resultados das categorias de impacto para o tingimento direto preto de 1000 kg de tecido pelo Método CML-IA.

Categoria de impacto/lavagens	Aquecimento global (GWP100a)	Toxicidade humana	Ecotoxicidade terrestre	Acidificação	Eutrofização
Unidade	kg CO2 eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg SO2 eq	kg PO4 eq
Total	263,63	155,16	1,23	1,67	2,27
Tingimento preto	102,71	67,96	0,34	0,59	1,52
1º enxágue tingimento preto	2,50	0,90	0,02	0,02	0,16
2º enxágue tingimento preto	2,50	0,90	0,02	0,02	0,05
Amaciamento e fixação	98,47	64,63	0,34	0,57	0,48
Centrifugação e secagem	57,45	20,77	0,51	0,48	0,06

Fonte: O autor (2024).

Tabela 15 - Resultados das categorias de impacto para o tingimento direto preto de 1000 kg de tecido pelo Método ReCiPe.

Categoria de impacto/lavagens	Aquecimento global	Acidificação terrestre	Eutrofização de água doce	Ecotoxicidade terrestre	Toxicidade humana não- cancerígena
Unidade	kg CO2 eq	kg SO2 eq	kg P eq	kg 1,4-DCB	kg 1,4- DCB
Total	273,27	1,39	0,05	706,20	185,44
Tingimento preto	106,94	0,49	0,02	247,81	69,07
1º enxágue tingimento preto	2,55	0,02	0,00	8,76	2,00
2º enxágue tingimento preto	2,55	0,02	0,00	8,76	2,00
Amaciamento e fixação	102,49	0,47	0,02	239,49	66,44

Centrifugação e secagem	58,73	0,40	0,01	201,38	45,93
-------------------------	-------	------	------	--------	-------

Fonte: O autor (2024).

Tabela 16 - Resultados das categorias de impacto para o tingimento direto verde-militar de 1000 kg de tecido pelo Método CML-IA.

Categoria de impacto/lavagens	Aquecimento global (GWP100a)	Toxicidade humana	Ecotoxicidade terrestre	Acidificação	Eutrofização
Unidade	kg CO2 eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg SO2 eq	kg PO4 eq
Total	224,59	123,42	1,21	1,50	1,71
Desengomagem	20,39	11,77	0,10	0,13	0,25
Enxágue da desengomagem	2,50	0,90	0,02	0,02	0,10
Tingimento verde-militar	40,78	23,55	0,20	0,26	0,65
1º enxágue tingimento verde-militar	2,50	0,90	0,02	0,02	0,14
2º enxágue tingimento verde-militar	2,50	0,90	0,02	0,02	0,03
Amaciamento e fixação	98,47	64,63	0,34	0,57	0,48
Centrifugação e secagem	57,45	20,77	0,51	0,48	0,06

Fonte: O autor (2024).

Tabela 17 - Resultados das categorias de impacto para o tingimento direto preto de 1000 kg de tecido pelo Método ReCiPe.

Categoria de impacto/lavagens	Aquecimento global	Acidificação terrestre	Eutrofização de água doce	Ecotoxicidade terrestre	Toxicidade humana não-cancerígena
Unidade	kg CO2 eq	kg SO2 eq	kg P eq	kg 1,4-DCB	kg 1,4-DCB
Total	232,25	1,25	0,04	633,46	161,68
Desengomagem	21,12	0,11	0,00	55,43	14,44
Enxágue da desengomagem	2,55	0,02	0,00	8,76	2,00
Tingimento verde-militar	42,24	0,22	0,01	110,88	28,88
1º enxágue tingimento verde-militar	2,55	0,02	0,00	8,76	2,00
2º enxágue tingimento verde-militar	2,55	0,02	0,00	8,76	2,00

Amaciamento e fixação	102,49	0,47	0,02	239,49	66,44
Centrifugação e secagem	58,73	0,40	0,01	201,38	45,93

Fonte: O autor (2024).

Tabela 18 - Resultados das categorias de impacto para o funcionamento da ETE por 30 anos pelo método CML-IA.

Categoria de impacto/ componentes do tratamento	Aquecimento global (GWP100a)	Toxicidade humana	Ecotoxicidade terrestre	Acidificação	Eutrofização
Unidade	kg CO2 eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg SO2 eq	kg PO4 eq
Total	676832,84	358624,88	4306,297	6246,2793	20337,551
Efluente	0,00	0,00	0,00	0,00	19232,01
Polímero	773,35	607,49	0,79	3,60	0,71
Sulfato de alumínio	199881,53	166562,75	711,47	2512,02	441,35
Hidróxido de sódio	187927,54	87265,74	1034,57	1340,52	354,74
Eletricidade	288250,42	104188,90	2559,47	2390,14	308,74

Fonte: O autor (2024).

Tabela 19 - Resultados das categorias de impacto para o funcionamento da ETE por 30 anos pelo método ReCiPe.

Categoria de impacto/ componentes do tratamento	Aquecimento global	Acidificação terrestre	Eutrofização de água doce	Ecotoxicidade terrestre	Toxicidade humana não-cancerígena
Unidade	kg CO2 eq	kg SO2 eq	kg P eq	kg 1,4-DCB	kg 1,4-DCB
Total	692047,40	5144,67	246,56	2228221,80	942789,43
Efluente	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Polímero	811,24	2,97	0,15	1517,07	479,54
Sulfato de alumínio	204123,31	2055,06	102,31	560907,26	456914,89
Hidróxido de sódio	192463,61	1093,73	87,55	655441,88	254959,77
Eletricidade	294649,24	1992,91	56,56	1010355,60	230435,23

Fonte: O autor (2024).

APÊNDICE D – INVENTÁRIOS DE CICLO DE VIDA DAS LAVAGENS PERTENCENTES À LAVANDERIA DE TORITAMA/PE

Tabela 20 – ICV do processo Superfashion de 1000 kg de tecido.

1. DESENGOMANTE (t=20 min)	
Materiais usados	10000,00 L de água 15,00 kg de químicos orgânicos
Energia elétrica consumida	31,33 kWh
Emissões para a água	9,72 kg DQO
2.ENXÁGUE DO DESENGOMANTE (t=2 min)	
Materiais usados	20000,00 L de água
Energia elétrica consumida	3,13 kWh
Emissões para a água	6,96 kg DQO
3.ESTONAGEM (t=1 h)	
Materiais usados	3000,00 L de água 200,00 kg de sal 20,00 kg de químicos orgânicos
Energia elétrica consumida	94,00 kWh
Emissões para a água	3,96 kg DQO
4. 1º ENXÁGUE DA ESTONAGEM (t=4 min)	
Materiais usados	20000,00 L de água
Energia elétrica consumida	6,27 kWh
Emissões para a água	5,66 kg DQO
5. 2º ENXÁGUE DA ESTONAGEM (t=4 min)	
Materiais usados	20000,00 L de água
Energia elétrica consumida	6,27 kWh
Emissões para a água	5,30 kg DQO
6. CLAREAMENTO (t=10 min)	
Materiais usados	8000 L de água 10 kg de pergamato de potássio
Energia elétrica consumida	15,67 kWh
Emissões para a água	3,89 kg DQO

7. 1º ENXÁGUE DO CLAREAMENTO (t=4 min)	
Materiais usados	20000,00 L de água
Energia elétrica consumida	6,27 kWh
Emissões para a água	4,95 kg DQO
8. 2º ENXÁGUE DO CLAREAMENTO (t=4 min)	
Materiais usados	20000,00 L de água
Energia elétrica consumida	6,27 kWh
Emissões para a água	3,58 kg DQO
9. NEUTRALIZAÇÃO (t=15 min)	
Materiais usados	8000 L de água 30 kg de metabissulfito de sódio
Energia elétrica consumida	23,50 kWh
Emissões para a água	3,25 kg DQO
10. 1º ENXÁGUE DA NEUTRALIZAÇÃO (t=4 min)	
Materiais usados	20000,00 L de água
Energia elétrica consumida	6,27 kWh
Emissões para a água	4,95 kg DQO
11. 2º ENXÁGUE DA NEUTRALIZAÇÃO (t=4 min)	
Materiais usados	20000,00 L de água
Energia elétrica consumida	6,27 kWh
Emissões para a água	4,42 kg DQO
12. ALVEJAMENTO (t=15 min)	
Materiais usados	8000 L de água 5 kg de metassilicato de sódio 10 kg de alvejante de peróxido 5 kg de químicos orgânicos
Energia elétrica consumida	23,50 kWh
Emissões para a água	9,97 kg DQO
13. 1º ENXÁGUE DO ALVEJAMENTO (t=2 min)	
Materiais usados	20000,00 L de água

Energia elétrica consumida	3,13 kWh
Emissões para a água	20,69 kg DQO
14. 2º ENXÁGUE DO ALVEJAMENTO (t=2 min)	
Materiais usados	20000,00 L de água
Energia elétrica consumida	3,13 kWh
Emissões para a água	2,55 kg DQO
15. AMACIAMENTO (t=10 min)	
Materiais usados	3000,00 L de água 20,00 kg de químicos orgânicos
Energia elétrica consumida	15,67 kWh
Emissões para a água	3,09 kg DQO
16. CENTRIFUGAÇÃO E SECAGEM (t=42 min)	
Energia elétrica consumida	125,02 kWh

Fonte: O autor (2024).

Tabela 21 – ICV do processo de tingimento reativo de 1000 kg de tecido.

1. ALVEJAMENTO (t=15 min)	
	8000 L de água 5 kg de metassilicato de sódio
Materiais usados	10 kg de alvejante de peróxido 5 kg de químicos orgânicos
Energia elétrica consumida	23,50 kWh
Emissões para a água	9,97 kg DQO
2. 1º ENXÁGUE DO ALVEJAMENTO (t=2 min)	
Materiais usados	20000,00 L de água
Energia elétrica consumida	3,13 kWh
Emissões para a água	20,69 kg DQO
3. 2º ENXÁGUE DO ALVEJAMENTO (t=2 min)	
Materiais usados	20000,00 L de água
Energia elétrica consumida	3,13 kWh
Emissões para a água	2,55 kg DQO

4. TINGIMENTO (t=50 min)	
	10000,00 L de água
Materiais usados	273,20 kg de químicos orgânicos
	600,00 kg de sal
Energia elétrica consumida	78,33 kWh
Emissões para a água	43,54 kg DQO
5. 1° ENXÁGUE DO TINGIMENTO (t=2 min)	
Materiais usados	20000,00 L de água
Energia elétrica consumida	3,13 kWh
Emissões para a água	35,45 kg DQO
6. 2° ENXÁGUE DO TINGIMENTO (t=2 min)	
Materiais usados	20000,00 L de água
Energia elétrica consumida	3,13 kWh
7. DISPERSANTE (t=3 min)	
	10000,00 L de água
Materiais usados	20,00 kg de químicos orgânicos
Energia elétrica consumida	4,70 kWh
Emissões para a água	6,81 kg DQO
8. ENXÁGUE DO DISPERSANTE (t=2 min)	
Materiais usados	20000,00 L de água
Energia elétrica consumida	3,13 kWh
Emissões para a água	7,96 kg DQO
9. AMACIAMENTO (t=10 min)	
	3000,00 L de água
Materiais usados	20,00 kg de químicos orgânicos
Energia elétrica consumida	15,67 kWh
Emissões para a água	3,09 kg DQO
10. CENTRIFUGAÇÃO E SECAGEM (t=42 min)	

Energia elétrica consumida	125,02 kWh
----------------------------	------------

Fonte: O autor (2024).

Tabela 22 – ICV do processo de amaciamento simples de 1000 kg de tecido

1. ENXÁGUE INICIAL (t=15 min)	
Materiais usados	10000,00 L de água
Energia elétrica consumida	23,50 kWh
Emissões para a água	11,36 kg DQO
2. AMACIAMENTO (t=10 min)	
Materiais usados	3000,00 L de água
	20,00 kg de químicos orgânicos
Energia elétrica consumida	0,00 kWh
Emissões para a água	0,00 kg DQO
3. CENTRIFUGAÇÃO E SECAGEM (t=42 min)	
Energia elétrica consumida	125,02 kWh

Fonte: O autor (2024).

Tabela 23 - ICV do processo da ETE durante 30 anos.

Materiais usados	876000,00 m ³ de água
	2190,00 kg de polímero
	212868,00 kg de policloreto de alumínio
Energia elétrica consumida	1255965,00 kWh
Emissões para a água	532356,15 kg DQO

Fonte: O autor (2024).

APÊNDICE E – RESULTADOS DA ACV DE CADA LAVAGEM E ETE DA LAVANDERIA DE TORITAMA/PE

Tabela 24 - Resultados das categorias de impacto para o processo Superfashion de 1000 kg de tecido pelo Método CML-IA.

Categoria de impacto/lavagens	Aquecimento global (GWP100a)	Toxicidade humana	Ecotoxicidade terrestre	Acidificação	Eutrofização
Unidade	kg CO2 eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg SO2 eq	kg PO4 eq
Total	389,99	219,08	1,68	2,61	2,54
Desengomagem	43,93	29,09	0,15	0,25	0,26
Enxágue da desengomagem	1,28	0,46	0,01	0,01	0,15
Estonagem	79,87	46,49	0,38	0,51	0,17
1º enxágue estonagem	1,28	0,46	0,01	0,01	0,13
2º enxágue estonagem	1,28	0,46	0,01	0,01	0,12
Clareamento	58,12	41,09	0,15	0,32	0,15
1º enxágue clareamento	1,28	0,46	0,01	0,01	0,11
2º enxágue clareamento	1,28	0,46	0,01	0,01	0,08
Neutralização	74,93	36,78	0,22	0,60	0,21
1º enxágue neutralização	1,28	0,46	0,01	0,01	0,11
2º enxágue neutralização	1,28	0,46	0,01	0,01	0,10
Alvejamento	37,36	19,59	0,14	0,23	0,27
1º enxágue alvejamento	1,28	0,46	0,01	0,01	0,46
2º enxágue alvejamento	1,28	0,46	0,01	0,01	0,06
Amaciamento	33,31	23,45	0,08	0,18	0,12
Centrifugação e secagem	50,98	18,43	0,45	0,42	0,05

Fonte: O autor (2024).

Tabela 25 - Resultados das categorias de impacto para o processo Superfashion de 1000 kg de tecido pelo Método ReCiPe.

Categoria de impacto/lavagens	Aquecimento global	Acidificação terrestre	Eutrofização de água doce	Ecotoxicidade terrestre	Toxicidade humana não-cancerígena
Unidade	kg CO2 eq	kg SO2 eq	kg P eq	kg 1,4-DCB	kg 1,4-DCB
Total	403,91	2,17	0,09	1185,79	358,23
Desengomagem	45,74	0,21	0,01	105,90	29,53
Enxágue da desengomagem	1,30	0,01	0,00	4,47	1,02
Estonagem	82,76	0,42	0,02	215,84	56,40

1º enxágue estonagem	1,30	0,01	0,00	4,47	1,02
2º enxágue estonagem	1,30	0,01	0,00	4,47	1,02
Clareamento	60,53	0,26	0,01	160,98	50,67
1º enxágue clareamento	1,30	0,01	0,00	4,47	1,02
2º enxágue clareamento	1,30	0,01	0,00	4,47	1,02
Neutralização	77,64	0,51	0,03	290,42	106,13
1º enxágue neutralização	1,30	0,01	0,00	4,47	1,02
2º enxágue neutralização	1,30	0,01	0,00	4,47	1,02
Alvejamento	38,62	0,19	0,01	118,51	43,76
1º enxágue alvejamento	1,30	0,01	0,00	4,47	1,02
2º enxágue alvejamento	1,30	0,01	0,00	4,47	1,02
Amaciamento	34,77	0,15	0,01	75,20	21,80
Centrifugação e secagem	52,11	0,35	0,01	178,68	40,75

Fonte: O autor (2024).

Tabela 26 - Resultados das categorias de impacto para o tingimento reativo de 1000 kg de tecido pelo Método CML-IA.

Categoria de impacto/lavagens	Aquecimento global (GWP100a)	Toxicidade humana	Ecotoxicidade terrestre	Acidificação	Eutrofização
Unidade	kg CO2 eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg SO2 eq	kg PO4 eq
Total	770,92	554,43	1,65	4,00	3,73
Tingimento reativo panthone	599,43	457,33	0,86	2,91	1,52
1º enxágue tingimento panthone	1,28	0,46	0,01	0,01	0,78
2º enxágue tingimento panthone	1,28	0,46	0,01	0,01	0,12
Dispersante	43,46	33,33	0,06	0,21	0,19
1º enxágue dispersante	1,28	0,46	0,01	0,01	0,18
Alvejamento	37,36	19,59	0,14	0,23	0,27
1º enxágue alvejamento	1,28	0,46	0,01	0,01	0,46
2º enxágue alvejamento	1,28	0,46	0,01	0,01	0,06
Amaciamento	33,31	23,45	0,08	0,18	0,12

Centrifugação e secagem	50,98	18,43	0,45	0,42	0,05
-------------------------	-------	-------	------	------	------

Fonte: O autor (2024).

Tabela 27 - Resultados das categorias de impacto para o tingimento reativo de 1000 kg de tecido pelo Método ReCiPe.

Categoria de impacto/lavagens	Aquecimento global	Acidificação terrestre	Eutrofização de água doce	Ecotoxicidade terrestre	Toxicidade humana não-cancerígena
Unidade	kg CO2 eq	kg SO2 eq	kg P eq	kg 1,4-DCB	kg 1,4-DCB
Total	805,51	3,31	0,15	1708,17	516,13
Tingimento reativo panthone	627,95	2,40	0,11	1225,20	377,43
1º enxágue tingimento panthone	1,30	0,01	0,00	4,47	1,02
2º enxágue tingimento panthone	1,30	0,01	0,00	4,47	1,02
Dispersante	45,54	0,17	0,01	88,21	27,29
1º enxágue dispersante	1,30	0,01	0,00	4,47	1,02
Alvejamento	38,62	0,19	0,01	118,51	43,76
1º enxágue alvejamento	1,30	0,01	0,00	4,47	1,02
2º enxágue alvejamento	1,30	0,01	0,00	4,47	1,02
Amaciamento	34,77	0,15	0,01	75,20	21,80
Centrifugação e secagem	52,11	0,35	0,01	178,68	40,75

Fonte: O autor (2024).

Tabela 28 - Resultados das categorias de impacto para o amaciamento simples de 1000 kg de tecido pelo Método CML-IA.

Categoria de impacto/lavagens	Aquecimento global (GWP100a)	Toxicidade humana	Ecotoxicidade terrestre	Acidificação	Eutrofização
Unidade	kg CO2 eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg SO2 eq	kg PO4 eq
Total	93,86	45,34	0,62	0,68	0,43
Enxágue inicial	9,58	3,46	0,09	0,08	0,26
Amaciamento	33,31	23,45	0,08	0,18	0,12
Centrifugação e secagem	50,98	18,43	0,45	0,42	0,05

Fonte: O autor (2024).

Tabela 29 - Resultados das categorias de impacto para o amaciamento simples de 1000 kg de tecido pelo Método ReCiPe.

Categoria de impacto/lavagens	Aquecimento global	Acidificação terrestre	Eutrofização de água doce	Ecotoxicidade terrestre	Toxicidade humana não-cancerígena
Unidade	kg CO2 eq	kg SO2 eq	kg P eq	kg 1,4-DCB	kg 1,4-DCB
Total	96,67	0,57	0,02	287,46	70,21
Enxágue inicial	9,79	0,07	0,00	33,59	7,66
Amaciamento	34,77	0,15	0,01	75,20	21,80
Centrifugação e secagem	52,11	0,35	0,01	178,68	40,75

Fonte: O autor (2024).

Tabela 30 - Resultados das categorias de impacto para o funcionamento da ETE por 30 anos pelo método CML-IA.

Categoria de impacto/componentes do tratamento	Aquecimento global (GWP100a)	Toxicidade humana	Ecotoxicidade terrestre	Acidificação	Eutrofização
Unidade	kg CO2 eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg SO2 eq	kg PO4 eq
Total	985249,94	589124,26	6649,93	7964,11	10809,87
Efluente	0,00	0,00	0,00	0,00	9369,47
Polímero	4549,10	3573,46	4,64	21,20	4,20
Policloreto de alumínio	468583,09	400444,45	2098,03	3696,48	887,69
Eletricidade	512117,76	185106,35	4547,27	4246,42	548,51

Fonte: O autor (2024).

Tabela 31 - Resultados das categorias de impacto para o funcionamento da ETE por 30 anos pelo método ReCiPe.

Categoria de impacto/componentes do tratamento	Aquecimento global	Acidificação terrestre	Eutrofização de água doce	Ecotoxicidade terrestre	Toxicidade humana não-cancerígena
Unidade	kg CO2 eq	kg SO2 eq	kg P eq	kg 1,4-DCB	kg 1,4-DCB
Total	1007600,00	6568,93	307,74	3740187,10	1333350,10
Efluente	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Polímero	4772,02	17,47	0,86	8923,94	2820,81
Policloreto de alumínio	479341,84	3010,77	206,41	1936223,20	921128,45
Eletricidade	523486,17	3540,68	100,48	1795040,00	409400,88

Fonte: O autor (2024).