



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO em

Ciências Ambientais

JULIANA THOMAZ LEFLOCH BARBOSA

**GESTÃO DE CICLO DE VIDA DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS
VISANDO A CIRCULARIDADE: ESTUDO DE CASO NUM PARQUE
FABRIL DE ELETROELETRÔNICOS**

Sorocaba
2025

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO em

*ciências
ambientais*



unesp
Sorocaba

JULIANA THOMAZ LEFLOCH BARBOSA

**GESTÃO DE CICLO DE VIDA DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS
VISANDO A CIRCULARIDADE: ESTUDO DE CASO NUM PARQUE
FABRIL DE ELETROELETRÔNICOS**

Tese apresentada como requisito para a obtenção do título de Doutora em Ciências Ambientais da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" na Área de Concentração Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Sandro Donnini Mancini
Coorientador: Dr. Henrique L. Maranduba

Sorocaba
2025

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO em

ciências
ambientais



B238g

Barbosa, Juliana Thomaz Lefloch

Gestão de ciclo de vida de resíduos sólidos industriais visando a circularidade : estudo de caso num parque fabril de eletroeletrônicos / Juliana Thomaz Lefloch Barbosa. -- Sorocaba, 2025

120 p. : il., tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba

Orientador: Sandro Donnini Mancini

Coorientador: Henrique Leonardo Maranduba

1. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.). 2. Ciclo de vida do produto - Aspectos ambientais. 3. Resíduos industriais. 4. Economia circular. I. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Sorocaba

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: GESTÃO DE CICLO DE VIDA DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS VISANDO A CIRCULARIDADE: ESTUDO DE CASO NUM PARQUE FABRIL DE ELETROELETRÔNICOS

AUTORA: JULIANA THOMAZ LEFLOCH BARBOSA

ORIENTADOR: SANDRO DONNINI MANCINI

COORIENTADOR: HENRIQUE LEONARDO MARANDUBA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Ciências Ambientais, área: Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. SANDRO DONNINI MANCINI (Participação Presencial)

Departamento de Engenharia Ambiental / Universidade Estadual Paulista (Unesp) - Instituto de Ciência e Tecnologia - Câmpus Sorocaba

Prof. Dr. GERSON ARAÚJO DE MEDEIROS (Participação Virtual)

Engenharia Ambiental / Instituto de Ciência e Tecnologia - UNESP - Câmpus de São José dos Campos

Prof.Dr. RICARDO GABBAY DE SOUZA (Participação Virtual)

Department of Environmental and Resource Engineering (DTU Sustain) / Technical University of Denmark (DTU)



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Sorocaba

Prof. Dr. JOSÉ AUGUSTO DE OLIVEIRA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Aeronáutica / Faculdade de Engenharia de São João da Boa Vista

Profª. Drª. JANE MARIA FAULSTICH DE PAIVA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia de Produção / Universidade Federal de São Carlos / Campus de Sorocaba

Sorocaba, 13 de junho de 2025

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me conceder saúde, determinação e a oportunidade de realizar este projeto, além de me amparar em todos os momentos desafiadores ao longo desta jornada.

Aos meus filhos, pelo amor, carinho e apoio constantes; e a todos que, de alguma forma, contribuíram para a concretização deste trabalho.

Aos meus orientadores, professores Sandro Donnini Mancini e Henrique Leonardo Maranduba, pela oportunidade de desenvolver este projeto, pelo conhecimento compartilhado e pela dedicação contínua ao longo de todo o processo.

Ao grupo Flextronics Sorocaba (FIT – Instituto de Tecnologia, Flextronics e Sinctronics), pela valiosa parceria e colaboração técnica.

À Cristina Belli, por acreditar e viabilizar esse projeto, pela dedicação e pelo conhecimento generosamente compartilhado.

Agradeço à universidade, pelo ensinamento e suporte e a todos aqueles que me apoiaram de alguma maneira durante a realização deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

A crescente necessidade de práticas produtivas mais sustentáveis tem impulsionado a adoção dos princípios da Economia Circular em setores industriais estratégicos, como o de eletroeletrônicos. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) se consolida como uma ferramenta para mensurar e comparar os impactos ambientais de diferentes estratégias de gestão de resíduos. Este estudo de caso, analisa a o gerenciamento dos resíduos sólidos, com enfoque no desempenho ambiental, no período de 2015 a 2022, de um parque fabril composto por uma Unidade de Manufatura e uma Unidade de Logística Reversa de Equipamentos Eletroeletrônicos, que aplica práticas de circularidade. Os fluxos dos resíduos sólidos são: resíduos eletroeletrônicos (REEE): tratados por meio de coleta, manufatura reversa, reciclagem e reintrodução de matéria-prima no ciclo produtivo (circularidade); resíduos sobras de alimentos e jardinagem: destinados à compostagem; e resíduos refeitórios, banheiros e varrição: enviados a aterro sanitário. A análise foi realizada a partir de dados primários e secundários obtidos nas duas unidades operacionais — considerando mais de 45 mil toneladas de resíduos processados, nos oito anos estudados. Seis cenários de gestão de resíduos foram modelados, variando do totalmente linear (C1 - 100% de disposição em aterro) ao totalmente circular (C7 - 0% de aterro). O cenário C5 representa a configuração real da empresa durante o período analisado, com 91% de reciclagem, 4% de disposição em aterro e 5% de compostagem. A comparação dos cenários demonstra que a atual estratégia de circularidade (C5) resultou em reduções expressivas de impacto ambiental em todas as seis categorias avaliadas: Aquecimento Global, Depleção da Camada de Ozônio Estratosférico, Eutrofização da Água Doce, Toxicidade Humana – efeito cancerígeno, Acidificação Terrestre e Uso da Terra. A análise de sensibilidade com simulação de Monte Carlo (1.000 amostragens, índice de confiança 95%) foi aplicada aos cenários C1, C5 e C7, permitindo a avaliação da robustez dos resultados frente às incertezas, o cenário C1 apresentou impactos superiores aos cenários circulares (C5 e C7), comprovando estatisticamente os benefícios da circularidade. A comparação entre C5 e C7, indicaram que C7 teve desempenho estatisticamente superior nas categorias de Aquecimento Global e Eutrofização da Água Doce, enquanto C5 apresentou menor impacto apenas em Depleção da Camada de Ozônio. Nas demais categorias, não houve diferença estatisticamente significativa entre os dois. Tais achados reforçam a importância da análise de incerteza como elemento fundamental para interpretações mais robustas em contextos industriais complexos. A pesquisa demonstrou a eficácia da integração entre manufatura e logística reversa, reforçando o potencial da economia circular na redução de impactos ambientais e fornecendo diretrizes práticas para aprimorar a gestão de resíduos sólidos industriais.

Palavras-chave: Indicadores Ambientais. Resíduos Sólidos Industriais.

ABSTRACT

The growing need for more sustainable production practices has driven the adoption of Circular Economy principles in strategic industrial sectors, such as electronics. Life Cycle Assessment (LCA) is establishing itself as a tool for measuring and comparing the environmental impacts of different waste management strategies. This case study analyzes solid waste management, focusing on environmental performance, from 2015 to 2022, at a manufacturing facility consisting of a Manufacturing Unit and a Reverse Logistics Unit for Electronic Equipment (Electro-Electronic Equipment), which applies circularity practices. The solid waste streams are: waste electrical and electronic equipment (WEEE): treated through collection, reverse manufacturing, recycling, and reintroduction of raw materials into the production cycle (circularity); food scraps and gardening waste: destined for composting; and cafeteria, restroom, and street sweeping waste: sent to landfill. The analysis was conducted using primary and secondary data obtained from the two operational units, considering more than 45,000 tons of waste processed over the eight years studied. Six waste management scenarios were modeled, ranging from fully linear (C1 - 100% landfill disposal) to fully circular (C7 - 0% landfill disposal). Scenario C5 represents the company's actual configuration during the analyzed period, with 91% recycling, 4% landfill disposal, and 5% composting. A comparison of the scenarios shows that the current circularity strategy (C5) resulted in significant reductions in environmental impact across all six categories evaluated: Global Warming, Stratospheric Ozone Depletion, Freshwater Eutrophication, Human Toxicity – Carcinogenic Effect, Terrestrial Acidification, and Land Use. Sensitivity analysis with Monte Carlo simulation (1,000 samples, 95% confidence interval) was applied to scenarios C1, C5, and C7, allowing for an assessment of the robustness of the results against uncertainties. Scenario C1 presented greater impacts than the circular scenarios (C5 and C7), statistically demonstrating the benefits of circularity. The comparison between C5 and C7 indicated that C7 had statistically superior performance in the categories of Global Warming and Freshwater Eutrophication, while C5 had a lower impact only in Ozone Layer Depletion. In the other categories, there was no statistically significant difference between the two. These findings reinforce the importance of uncertainty analysis as a fundamental element for more robust interpretations in complex industrial contexts. The research demonstrated the effectiveness of integrating manufacturing and reverse logistics, reinforcing the potential of the circular economy in reducing environmental impacts and providing practical guidelines for improving industrial solid waste management.

Keywords: Environmental Indicators. Industrial Solid Waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura da ACV com seus estágios e aplicações diretas da técnica	32
Figura 2 – Fluxograma Resíduos Sólidos no Parque Fabril estudado, constituído da Unidade 1 (montagem de eletroeletrônicos) e Unidade 2 (logística reversa)	44
Figura 3 - Sistema de Produto e Fronteiras do Sistema do Cenário 1, no qual se considera 0% de reciclagem e 100% de aterramento	49
Figura 4 - Sistema de Produto e Fronteiras do Sistema do Cenário 2, no qual se considera 25% de reciclagem e 75% de aterramento	49
Figura 5 - Sistema de Produto e Fronteiras do Sistema do Cenário 3, no qual se considera 50% de reciclagem e 50% de aterramento	50
Figura 6 - Sistema de Produto e Fronteiras do Sistema do Cenário 4, no qual se considera 75% de reciclagem e 25% de aterramento	51
Figura 7 - Sistema de Produto e Fronteiras do Sistema do Cenário 6, onde se considera 91% de reciclagem, 2% de aterramento, 2% coprocessamento e 5% compostagem.....	52
Figura 8 - Sistema de Produto e Fronteiras do Sistema do Cenário 7, onde se considera 91% de reciclagem, 0% de aterramento, 4% coprocessamento e 5% compostagem.....	52
Figura 9 - Geração de Resíduos Recicláveis nas Unidades 1 e 2 de 2015 a 2022...	64
Figura 10 - Soma de todos os resíduos produzidos pelas duas unidades de 2015 a 2022 e a quantidade (absoluta e percentual) de “Outros Resíduos”, ou seja, a taxa de envio de resíduos para aterramento.....	66
Figura 11 - Circularidade interna: quantidade de resíduos da Unidade 1, em relação ao total, reciclada na Unidade 2 nos anos de 2015 a 2022.....	67
Figura 12 – Contribuições das Unidades 1 e 2 de 2015 a 2022, para a categoria de impacto Aquecimento Global.....	74
Figura 13 – Contribuições das Unidades 1 e 2 de 2015 a 2022, para a categoria de impacto Depleção da Camada de Ozônio	76
Figura 14 – Contribuições das Unidades 1 e 2 de 2015 a 2022, para a categoria de impacto Eutrofização da Água Doce	77
Figura 15 – Contribuições das Unidades 1 e 2 de 2015 a 2022, para a categoria de impacto Toxicidade Humana Cancerígena	79

Figura 16 - Contribuições das Unidades 1 e 2 de 2015 a 2022, para a categoria de impacto Acidificação Terrestre	80
Figura 17 - Contribuições das Unidades 1 e 2 de 2015 a 2022, para a categoria de impacto Uso da Terra	82
Figura 18 - Análises de Sensibilidade e Incertezas dos valores relativos dos cenários propostos nas categorias Aquecimento Global (PAG), Eutrofização da Água Doce (EUTROF-AD), Toxicidade Humana (TOXIC-HC) e Depleção da Camada de Ozônio (DCO) para as unidades 1 e 2.....	85
Figura 19 - Quantidade de cada material reciclável gerados no parque fabril, ano 2015	99
Figura 20 - Quantidade de cada material reciclável gerados no parque fabril, ano 2016	99
Figura 21 - Quantidade de cada material reciclável gerados no parque fabril, ano 2017	100
Figura 22 - Quantidade de cada material reciclável gerados no parque fabril, ano 2018	100
Figura 23 - Quantidade de cada material reciclável gerados no parque fabril, ano 2019	101
Figura 24 – Quantidade de cada material reciclável gerados no parque fabril, ano 2020	101
Figura 25 - Quantidade de cada material reciclável gerados no parque fabril, ano 2021	102
Figura 26 - Quantidade de cada material reciclável gerados no parque fabril, ano 2022	102

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação dos EEE	27
Quadro 2 – Tipos e Fontes de dados relacionados à geração de resíduos no parque fabril estudado.....	55
Quadro 3 – Processos do inventário do ciclo de vida – ICV do parque fabril estudado de 2015 a 2022 relacionado as entradas às unidades de processo existentes no <i>software</i>	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Detalhamento Cenários quanto a destinação final	53
Tabela 2 - Categorias de impacto, do método ReCiPe 2016, utilizadas no estudo de caso.....	59
Tabela 3 - Quantidade relativa dos resíduos separados nas Unidades 1 e 2 de 2015-2022	62
Tabela 4 - Entradas de insumos e saídas de materiais da Central de Resíduos da Unidade 1 – Manufatura, durante o período de 2015 a 2022	62
Tabela 5 - Entradas de insumos e saídas de materiais da Central de Resíduos da Unidade 2 – Logística Reversa, durante o período de 2015 a 2022	63
Tabela 6 - Quantidade de tipos e variações de que cada material foi subdivido nas Unidades 1 e 2 estudadas em 2022	69
Tabela 7 - Quantidade de parceiros recicladores diferentes das Unidades 1 e 2 ao longo do período em estudo.....	69
Tabela 8 - Localização e distância dos parceiros de destinação de resíduos em relação ao parque industrial (2015–2022).....	70
Tabela 9 - Quantidade de parceiros recicladores por tipo de material das unidades estudadas, ano base 2022	72
Tabela 10 - Teste de hipótese estatística para comparação de cenários nas categorias avaliadas, usando 1.000 espaço amostral da simulação de Monte Carlo com intervalo de confiança de 95%	86
Tabela 11 - Matriz de pedigree usada para avaliar a qualidade das fontes de dados	103
Tabela 12 - Matriz de pedigree com os valores referentes do parque fabril em estudo, no período de 2015-2022	104
Tabela 13 - Resumo de algumas das categorias de impactos no nível <i>midpoint</i> do ReCiPe 2016, os compartimentos afetados e os impactos potenciais	106
Tabela 14 - Cenário 1 - Entradas de insumos e saídas de materiais da Unidade 1 – Manufatura, durante o período de 2015 a 2022	107
Tabela 15 - Cenário 1 - Entradas de insumos e saídas de materiais da Unidade 2 – Logística Reversa, durante o período de 2015 a 2022.....	108
Tabela 16 - Cenário 2 - Entradas de insumos e saídas de materiais da Unidade 1 – Manufatura, durante o período de 2015 a 2022	108

Tabela 17 - Cenário 2 - Entradas de insumos e saídas de materiais da Unidade 2 – Logística Reversa, durante o período de 2015 a 2022.....	109
Tabela 18 - Cenário 3 - Entradas de insumos e saídas de materiais da Unidade 1 – Manufatura, durante o período de 2015 a 2022	109
Tabela 19 - Cenário 3 - Entradas de insumos e saídas de materiais da Unidade 2 – Logística Reversa, durante o período de 2015 a 2022.....	110
Tabela 20 - Cenário 4 - Entradas de insumos e saídas de materiais da Unidade 1 – Manufatura, durante o período de 2015 a 2022	110
Tabela 21 - Cenário 4 - Entradas de insumos e saídas de materiais da Unidade 2 – Logística Reversa, durante o período de 2015 a 2022.....	111
Tabela 22 - Cenário 6 - Entradas de insumos e saídas de materiais da Unidade 1 – Manufatura, durante o período de 2015 a 2022	111
Tabela 23 - Cenário 6 - Entradas de insumos e saídas de materiais da Unidade 2 – Logística Reversa, durante o período de 2015 a 2022.....	112
Tabela 24 - Cenário 7 - Entradas de insumos e saídas de materiais da Unidade 1 – Manufatura, durante o período de 2015 a 2022	112
Tabela 25 - Cenário 7 - Entradas de insumos e saídas de materiais da Unidade 2 – Logística Reversa, durante o período de 2015 a 2022.....	113
Tabela 26 - Processos de contribuição da categoria de impacto Aquecimento Global – cenário atual C5	114
Tabela 27 - Processos de contribuição da categoria de impacto Depleção da Camada de Ozônio – cenário atual C5	115
Tabela 28 - Processos de contribuição da categoria de impacto Eutrofização da Água Doce – cenário atual C5	116
Tabela 29 - Processos de contribuição da categoria de impacto Toxicidade Humana Cancerígena – cenário atual C5.....	117
Tabela 30 - Processos de contribuição da categoria de impacto Acidificação Terrestre – cenário atual C5	118
Tabela 31 - Processos de contribuição da categoria de impacto Uso da Terra – cenário atual C5.....	119
Tabela 32 - Teste de hipótese estatística para comparação do C5 (sem e com compostagem) nas categorias avaliadas, usando 1.000 espaço amostral da simulação de Monte Carlo com intervalo de confiança de 95%	120

Tabela 33 - Análise de incerteza do C5 (sem e com compostagem) nas categorias Aquecimento Global, Depleção da Camada de Ozônio, Eutrofização da Água Doce, Acidificação Terrestre e Toxicidade Humana, com efeito cancerígeno	120
---	-----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 JUSTIFICATIVA PARA TESE	21
2. OBJETIVOS E ESTRUTURA DA TESE	23
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
2.2 ESTRUTURA DA TESE	24
3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA	25
3.1 GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS	25
3.2 EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E ELETRÔNICOS – EEE	26
3.3 ECONOMIA CIRCULAR E LOGÍSTICA REVERSA	28
3.4 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	32
3.5 ESTUDOS QUE ABORDAM AS ACV E REEE	35
4. MATERIAIS E MÉTODOS	43
4.1 OBJETIVO E ESCOPO	43
4.1.1 Objetivo	43
4.1.2 Escopo	43
4.2 CENÁRIOS UTILIZADOS NA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	48
4.3 INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA (ICV)	54
4.4 AVALIAÇÃO DE IMPACTOS	58
4.5 ANÁLISES DE SENSIBILIDADE E INCERTEZA	59
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
5.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DAS PRÁTICAS DE GESTÃO DE RESÍDUOS NO PARQUE FABRIL (UNIDADES MANUFATURA E LOGÍSTICA REVERSA)	62
5.2 AVALIAÇÃO DE IMPACTOS NO CICLO DE VIDA (AICV)	73
5.2.1 Aquecimento Global	74
5.2.2 Depleção da Camada de Ozônio Estratosférico	76
5.2.3 Eutrofização da Água Doce	77
5.2.4 Toxicidade Humana Cancerígena	79
5.2.5 Acidificação Terrestre	80
5.2.6 Uso da Terra	82

5.3 ANÁLISES DE SENSIBILIDADE E INCERTEZA	84
6. CONCLUSÕES.....	89
7. SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	91
REFERÊNCIAS.....	92
APÊNDICE A – MATERIAL RECICLÁVEL GERADOS NO PARQUE FABRIL (2015-2022)	99
APÊNDICE B – MATRIZ PEDIGREE.....	103
APÊNDICE C – INCERTEZA BÁSICA.....	105
APÊNDICE D – AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA.....	106
APÊNDICE E – ENTRADAS DE INSUMOS E SAÍDAS DE MATERIAIS NAS UNIDADES 1 E 2, NOS CENÁRIOS PROPOSTOS	107
APÊNDICE F – ANÁLISE DOS PROCESSOS DE CONTRIBUIÇÃO DAS CATEGORIAS DE IMPACTO ESTUDADOS NO PARQUE FABRIL, CENÁRIO ATUAL AO LONGO DOS ANOS 2015-2022	114
APÊNDICE G – COMPARAÇÃO CENÁRIO ATUAL C5 COM E SEM COMPOSTAGEM.....	120

1. INTRODUÇÃO

A expansão tecnológica, marcada pela ampla disseminação de dispositivos eletrônicos — hoje essenciais no cotidiano de milhões de pessoas — e pela crescente conectividade em áreas urbanas e rurais, trouxe consigo um desafio significativo: o aumento rápido e significativo da geração de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE). Esse cenário é agravado por fatores como a redução do ciclo de vida dos produtos, as dificuldades de reparo e atualização, além da limitação estrutural dos sistemas de coleta e tratamento desses resíduos (BALDÉ *et al.*, 2024).

Em decorrência desse crescimento significativo de resíduos eletroeletrônicos, surgiu a preocupação com a destinação adequada desses resíduos. Em 2018, 183 países estabeleceram, uma meta global para 2023, visando elevar a taxa de reciclagem de resíduos eletrônicos para 30% e aumentar a porcentagem de países com legislação sobre resíduos eletrônicos para 50% (ITU, 2018).

Estima-se que, em 2022, o mundo gerou 62 bilhões de kg de REEE, com uma média de 7,8 kg por habitante, dos quais apenas 22,3% foram formalmente reciclados (BALDÉ *et al.*, 2024). A Europa lidera tanto em geração (17,6 kg per capita) quanto em taxa de reciclagem (42,8%), enquanto o Brasil, maior gerador da América Latina e quinto no ranking mundial, produziu 2,4 bilhões de kg em 2022, mas com desempenho ainda abaixo das metas estabelecidas para reciclagem. Os países africanos apresentaram a menor taxa, inferior a 1% do resíduo coletado e reciclado (BALDÉ *et al.*, 2024).

A gestão inadequada desses resíduos acarreta sérios impactos ambientais e sociais, agravados por fatores como a obsolescência programada, a dificuldade e alto custo de reparo dos produtos e a ausência de infraestrutura eficaz de coleta e reciclagem. A fim de mitigar esses impactos, diversos países firmaram compromissos para aumentar a taxa de reciclagem de REEE e aprovar legislações específicas. Ainda assim, até 2023, apenas 42% dos países possuíam uma legislação nacional sobre o tema, e menos de metade adotava práticas efetivas de logística reversa (BALDÉ *et al.*, 2024).

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), de 2010, estabeleceu diretrizes para a gestão adequada de resíduos, incluindo a criação de sistemas de logística reversa para eletroeletrônicos (BRASIL, 2010).

O Decreto Federal nº 10.240/2020 detalhou metas progressivas de recolhimento, que foram reforçadas pelo Decreto nº 10.936/2022 (BRASIL, 2020; BRASIL 2022). No entanto, os resultados permaneceram aquém do esperado: em 2022, o país recolheu apenas 46,7% da meta anual de 32.872 toneladas, embora isso tenha representado um avanço de 12 vezes em relação ao ano anterior (ABREMA, 2022).

Os países com legislação específica para a gestão desses resíduos tiveram uma taxa média coleta e reciclagem de resíduos eletrônicos de 25%, em comparação com 0% para países que não possuem legislação. Os países que também praticam o sistema de logística reversa (SLR) possuem taxa de coleta e reciclagem média de 27% em comparação aos 10% dos países que possuem legislação, porém não praticam SLR (BALDÉ *et al.*, 2024).

É importante destacar que a reciclagem não deve ser vista como o objetivo final da gestão de resíduos. Consequentemente, os modelos de negócios de desperdício zero e economia circular que poderiam ajudar a desvincular o crescimento econômico da geração de resíduos têm sido muitas vezes considerados secundários à gestão de resíduos (UNEP, 2024).

Diante desse cenário, é fundamental adotar abordagens mais abrangentes e eficazes de gestão, como a economia circular, que propõe manter os produtos, componentes e materiais ainda úteis e com valor por meio de reutilização, remanufatura e, também, reciclagem (DESHPANDE e HASKINS, 2021).

O fechamento dos ciclos produtivos conecta a fase pós-utilização à sua reintegração na fase inicial de produção, o que reduz significativamente a perda de energia de componentes já processados. Ainda, diminui a necessidade de intervenção humana em ambientes naturais para a extração de matérias-primas virgens (MERCADER *et al.*, 2021).

Projeções mostram que um modelo de economia circular, baseado na redução de resíduos, práticas comerciais sustentáveis e gerenciamento planejado de resíduos, de fato, levam a um ganho líquido total de US\$ 108,5 bilhões por ano globalmente (UNEP, 2024).

A Engenharia e Gestão do Ciclo de Vida e seu braço analítico, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), complementam essa perspectiva ao fornecer uma metodologia sólida para quantificar impactos ambientais ao longo de todas as fases do ciclo de vida de um produto — da extração da matéria-prima ao descarte final. No Brasil, as

diretrizes metodológicas da ACV estão normatizadas pela ABNT NBR ISO 14040 e 14044 (ABNT, 2014a, 2014b).

Estudos recentes oferecem uma visão abrangente e atualizada sobre o estado da arte da aplicação da ACV no gerenciamento de REEE. Ismail e Hanafiah (2019), analisaram 61 estudos de ACV em gestão de REEE publicados desde 2005. Os resultados da análise revelaram que 31 dos estudos avaliaram o impacto ambiental das estratégias de gestão de REEE; 27 estudos avaliaram os impactos do sistema de gestão de REEE e 3 estudos avaliaram o potencial de risco da gestão de REEE. Os impactos foram avaliados com base na hierarquia de gestão de resíduos. Os autores consideraram que ainda existem diversas lacunas e desafios de pesquisa que requerem atenção, por exemplo, as diferenças na modelagem da gestão de REEE e do sistema de reciclagem, especialmente entre países desenvolvidos e em desenvolvimento. Outra lacuna evidenciada é o número limitado de estudos sobre a avaliação do potencial de risco da gestão de REEE e a variação de métodos/ferramentas combinados com a metodologia de ACV.

He *et al.* (2024) revisaram a literatura existente sobre ACV da gestão de resíduos eletrônicos em uma economia circular, mostrando o estado atual da pesquisa, identificando lacunas e propondo orientações de pesquisa. O estudo aborda os impactos ambientais da disposição final inadequada dos resíduos, destacando riscos à saúde humana e ao meio ambiente através liberação de metais pesados e contaminantes orgânicos. Em relação à reciclagem, aborda os métodos mais comuns: processos mecânicos, pirometalúrgico, hidrometalúrgico, biometalúrgico, eletroquímico e termoquímico. Os autores verificaram que dentre as categorias de impacto usualmente analisadas estão o potencial de aquecimento global, toxicidade humana, ecotoxicidade, consumo de energia e emissões atmosféricas. Destacam ainda, a necessidade de padronização metodológica e aplicação sólida de análises de incertezas, principalmente em abordagens de ACV consequencial voltadas para políticas públicas. Por outro lado, afirmam que ACV desempenha um papel fundamental para o avanço da sustentabilidade dentro do crescente setor de reciclagem de REEE.

O artigo de Jaunich *et al.* (2020), apresenta uma análise quantitativa para estimar os impactos ambientais e os custos associados ao gerenciamento de EEE, com base em dados do programa EPR (*Extended Producer Responsibility*) no estado

de Washington, nos Estados Unidos. O estudo modela o sistema de coleta, transporte, processamento e o descarte de REEE. Três estratégias distintas de gerenciamento foram comparadas. O estudo identificou que as emissões de CO₂ associadas ao transporte da comunidade até os pontos de coleta, são responsáveis por uma parte significativa dos impactos, reforçando a necessidade de soluções logísticas mais eficientes. Em relação à reciclagem, as emissões evitadas pelo uso de materiais reciclados superaram os impactos da cadeia logística e de processamento. Outro ponto relevante desse estudo é a aplicação da metodologia para comparar a inconstância dos impactos ambientais, a partir de análises de sensibilidade, considerando variações nos parâmetros de entrada e nas eficiências dos processos. A unidade funcional foi definida como 1 kg de REEE considerando a composição média de produtos eletrônicos descartados no estado. Entre os principais benefícios ambientais identificados destacam-se a recuperação de materiais, a redução da demanda por matérias-primas virgens e o menor impacto ambiental em relação ao envio para aterros sanitários.

Diante do exposto, retifica-se a importância da ACV no gerenciamento de resíduos, especialmente por sua capacidade de conduzir indicadores quantitativos que apoiam a avaliação ambiental de sistemas e produtos. Em atenção aos REEE, a ACV vem sendo amplamente utilizada para comparar diferentes estratégias de tratamento, recuperação e disposição final, além de oferecer subsídios técnicos para decisões de planejamento, regulação e inovação industrial.

1.1 Justificativa para Tese

O cenário global atual enfrenta grandes desafios ambientais e econômicos, que exigem uma transição para modelos de produção mais sustentáveis e eficientes. No setor de eletroeletrônicos, tradicionalmente associado a altos níveis de desperdício e impactos ambientais, a adoção de práticas como economia circular, logística reversa, certificações ambientais e desperdício zero surgem como uma estratégia essencial para garantir a sustentabilidade.

A economia circular (EC) propõe uma reconfiguração dos processos produtivos, com foco na reutilização de produtos e na reciclagem de materiais, reduzindo a extração de recursos naturais e minimizando a geração de resíduos. Porém, barreiras tecnológicas, culturais e econômicas dificultam a transição de modelos lineares tradicionais (extração, produção, consumo e descarte) para sistemas circulares mais sustentáveis.

Dentro desse contexto, a logística reversa complementa a economia circular ao possibilitar o retorno dos produtos ao ciclo produtivo, ampliando a vida útil dos materiais e minimizando o desperdício. As certificações ambientais, além de buscarem comprovar o compromisso das empresas com práticas sustentáveis, também agregam valor aos produtos, atendendo à crescente demanda dos consumidores por responsabilidade ambiental.

Outro conceito relevante é o de desperdício zero, que busca eliminar totalmente os resíduos por meio da otimização dos processos produtivos, reduzindo custos operacionais e promovendo a preservação ambiental. A eliminação total dos resíduos é o grande objetivo da economia circular.

Embora a EC e a ACV estejam amplamente presentes na literatura como ferramentas estratégicas para mitigar impactos ambientais, estudos aplicados em ambientes produtivos reais — como parques fabris — ainda são escassos, o que reforça a originalidade e a relevância do estudo.

Esta pesquisa apresenta seu caráter inédito ao aplicar a ACV para avaliar diferentes cenários de gestão de resíduos sólidos industriais justamente num parque fabril, onde uma empresa é a maior fornecedora de matéria-prima para a outra empresa e também a grande consumidora do material recuperado por ela. São incluídas alternativas com maior ou menor desempenho ambiental, focando na

redução do envio para aterro sanitário e no aumento da taxa de reciclagem. Ao simular esses diferentes cenários, o estudo permite não apenas a compreensão dos benefícios concretos das práticas sustentáveis, mas também das limitações e desafios que as empresas enfrentam ao tentar integrar essas práticas de forma eficaz.

Outro aspecto inovador é a análise da simbiose industrial que existe entre as duas empresas. Assim, essa simbiose é uma estratégia complementar à economia circular, explorando a troca de subprodutos e resíduos entre diferentes processos industriais e empresas.

Os resultados podem fornecer *insights* valiosos para a academia, a indústria e os formuladores de políticas públicas, além de servir como base para futuras pesquisas sobre a integração de tecnologias sustentáveis na produção industrial.

2. OBJETIVOS E ESTRUTURA DA TESE

O objetivo geral desta pesquisa foi analisar o comportamento da gestão de resíduos sólidos industriais em um parque fabril, que já adota práticas de economia circular. O estudo foi conduzido em uma planta industrial real, do setor de eletroeletrônicos, localizada na Região Metropolitana de Sorocaba.

Por meio da aplicação da ferramenta de ACV, foram integrados indicadores ambientais para avaliar como os impactos ambientais variaram à medida que a taxa de reciclagem foi intensificada e a destinação final de resíduos para aterros sanitários é reduzida.

2.1 Objetivos Específicos

a) Avaliar a composição e a quantidade de resíduos sólidos gerados pelas empresas do parque industrial ao longo do período de oito anos (2015-2022), destacando as mudanças significativas ocorridas nesse período;

b) Analisar as práticas de segregação e destinação dos resíduos, incluindo o encaminhamento para reciclagem, compostagem e aterros sanitários, e avaliar os resultados alcançados em cada uma dessas categorias;

c) Identificar as ações específicas adotadas nas diferentes áreas da empresa, como restaurante e unidades de produção, com foco na redução do desperdício e na promoção de uma gestão mais eficiente dos resíduos.

d) Elaborar cenários com base em:

1. PNRS (Política Nacional de Resíduos Sólidos), seguindo as prioridades estabelecidas no Art. 9º da legislação: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final ambientalmente adequada dos resíduos.
2. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), focando especialmente nos: ODS 8: Melhorar a eficiência dos recursos no consumo e produção, dissociando o crescimento econômico da degradação ambiental; ODS 11: Reduzir o impacto ambiental negativo per capita das cidades, com foco na gestão de resíduos e qualidade do ar; ODS 12: Reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio de prevenção, redução, reciclagem e reuso.

e) Analisar o desempenho ambiental dos cenários elaborados, comparando os impactos em diferentes abordagens de gestão de resíduos, como a destinação dos resíduos também para coprocessamento;

f) Investigar a sinergia entre as unidades do parque industrial, explorando o papel de cada unidade na gestão de resíduos, incluindo a troca de materiais e a aplicação dos princípios da economia circular.

2.2 Estrutura da Tese

Esta tese foi organizada por meio das seguintes etapas:

- Capítulo 3 – Revisão de Literatura: Apresenta uma fundamentação teórica sobre os principais temas relacionados à pesquisa, incluindo Gestão de Resíduos Sólidos, Equipamentos Elétricos e Eletroeletrônicos, Economia Circular e Logística Reversa; Avaliação do Ciclo de Vida e Estudos que abordam ACV com REEE.
- Capítulo 4 – Metodologia: Define os aspectos metodológicos adotados para a condução do estudo e o alcance dos objetivos propostos. São descritos os cenários avaliados, a contextualização das práticas de gestão de resíduos no estudo de caso e a modelagem aplicada à ACV.
- Capítulo 5 – Resultados e Discussões: Apresenta os resultados da Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV), incluindo análises de sensibilidade e incertezas, com suas respectivas interpretações e implicações.
- Capítulo 6 – Conclusões: Sistematiza as conclusões gerais do estudo, com base nas análises realizadas e nos objetivos inicialmente propostos.
- Capítulo 7 – Recomendações para Pesquisas Futuras: Propõe sugestões e direções para estudos futuros que possam ampliar ou aprofundar os achados desta pesquisa.
- Apêndice: Contém informações complementares, como detalhes metodológicos e resultados adicionais que, por razões de coerência textual, não foram incluídos no corpo principal do texto, mas são relevantes para a compreensão integral do trabalho.

3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

3.1 Gestão de Resíduos Sólidos

O desafio no gerenciamento de resíduos sólidos industriais (RSI) destaca-se como uma preocupação crescente para as organizações, seja em termos de conformidade com a legislação vigente, investimentos consideráveis na área ambiental e em iniciativas socioambientais nas comunidades onde estão integradas. Nesse contexto, a busca por soluções sustentáveis que sejam acessíveis, que protejam o meio ambiente e contribuam para uma economia circular, representa alguns dos desafios da gestão de resíduos industriais (MULLER, *et al.*, 2022).

A relevância ambiental torna-se clara pelo fato que a gestão de resíduos sólidos é responsável por 4% das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE) no Brasil (BRASIL, 2022). Esse impacto é ainda mais significativo em países com grande extensão territorial, como o Brasil, onde as longas distâncias logísticas e a falta de infraestrutura adequada dificultam a implementação de soluções sustentáveis (SILVA e FONTANA, 2021).

Uma transição dos modelos tradicionais de gestão de resíduos para a gestão sustentável de resíduos sólidos pode minimizar o esgotamento de recursos não renováveis e reduzir os impactos ambientais (ABDULLAH e ANWAR, 2021). É necessário, para tanto, o conhecimento das fontes de geração desses resíduos. Isso permite determinar possíveis tratamentos e manejo apropriado da disposição final com base em suas propriedades físico-químicas e biológicas, composição química e potencial de separação dos materiais (ZHANG *et al.*, 2022).

Segundo estimativas da Associação Internacional de Resíduos Sólidos (ISWA), o custo da inércia na gestão de resíduos (ou seja, agir para resolver um problema causado pelo mau gerenciamento de resíduos) é de três a cinco vezes maior que a quantia necessária para investimento e custeio das soluções adequadas (ABREMA, 2021).

Além disso, a experiência de países industrializados demonstra que a redução das emissões de GEE não é prejudicial ao crescimento econômico. A diminuição dessas emissões pode ser alcançada por meio de estratégias, como o tratamento de resíduos orgânicos por digestão anaeróbia e usinas de compostagem, a instalação de

sistemas de captação de metano em aterros sanitários e o uso de energia limpa em atividades como coleta, triagem e tratamento, entre outros (ABREMA, 2022).

Diante desse panorama, o conceito de gerenciamento integrado de RSI surge como uma alternativa viável para dissolver os custos e proporcionar o cumprimento dos requisitos legais (MULLER, *et al.* 2022). Os conceitos de simbiose industrial ou eco parque industrial, derivados da ecologia industrial, são particularmente relevantes, uma vez que esses grupos de indústrias cooperam entre si, compartilhando conhecimentos e recursos em prol do objetivo comum de promover o desenvolvimento sustentável (TREVISAN *et al.*, 2016).

3.2 Equipamentos Elétricos e Eletrônicos – EEE

Dentre os diversos tipos de RSI, os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) vêm ganhando destaque não apenas pelo seu crescimento acelerado, mas também pela sua complexidade material, valor econômico e riscos ambientais associados.

Os equipamentos eletroeletrônicos (EEE) são definidos como

Equipamentos cujo adequado funcionamento depende de correntes elétricas ou campos eletromagnéticos, bem como os equipamentos para geração, transferência e medição dessas correntes e campos, concebidos para utilização com uma tensão nominal não superior a 1.000 V para corrente alternada e 1.500 V para corrente contínua (União Europeia, 2003, art. 3º).

No Brasil, o Acordo Setorial para Implantação de Sistema de Logística Reversa de Resíduos Eletroeletrônicos de Uso Doméstico e Seus Componentes, descreve esses equipamentos como dispositivos de uso familiar que operam com eletricidade e foram projetados para funcionar adequadamente com tensão de até 240 V (BRASIL, 2019; PLANARES, 2022). Ainda que o acordo setorial para eletroeletrônicos não traga uma divisão clara por tipo de equipamento, como acontece na legislação europeia, um de seus anexos apresenta uma lista com mais de 200 produtos comercializados no Brasil (BRASIL, 2019).

A ampla diversidade dos EEE exige uma categorização específica para fins de gestão e logística reversa. A União Europeia os classifica em dez categorias distintas, que vão desde grandes e pequenos eletrodomésticos até equipamentos médicos e de monitoramento (FORTI *et al.*, 2020). No Brasil, embora não haja uma classificação normativa padronizada, adota-se amplamente a divisão em quatro grupos — linha

branca, marrom, verde e azul — proposta pela Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI) (SOUZA *et al.*, 2025), baseada na expectativa de vida útil, porte e complexidade tecnológica dos equipamentos, conforme Quadro I.

Quadro 1 – Classificação dos EEE

Categorias	Exemplos de equipamentos	Vida Útil
Linha verde	Computadores desktops e notebooks , tablets , telefones móveis e acessórios de informática.	Curta (~2 a 5 anos)
Linha marrom	Monitores e TVs (tubo, plasma, LCD, LED), aparelhos de som, equipamentos de VHS e DVD, filmadoras e máquinas fotográficas.	Média (~5 a 13 anos)
Linha branca	Congeladores e refrigeradores, fogões, ventiladores, condicionadores de ar, máquinas de lavar louça e roupa, fornos de microondas.	Longa (~10 a 15 anos)
Linha azul	Liquidificadores, batedeiras, cafeteiras, ferros elétricos, furadeiras, secadores de cabelo, processadores de alimentos e aspiradores de pó.	Longa (~10 a 15 anos)

Fonte: (ABDI, 2013)

A composição dos EEE é heterogênea e rica em recursos. Metais como cobre, ouro, prata, paládio, tungstênio e cobalto são amplamente utilizados, além de materiais como plásticos, vidro e cerâmica (SOUZA *et al.*, 2025). Por exemplo, em uma impressora multifuncional (impressora, copiadora e scanner) de 3,5 kg foram encontradas 251 peças compostas de 22 materiais diferentes, sendo 11 tipos de plásticos e 6 tipos de metais, além de vidro, papel e 3 compósitos diferentes (polímeros reforçados com fibra de vidro) (BARBOSA *et al.*, 2022)

No Brasil, a geração anual é de 2,4 milhões de toneladas, posicionando o país como o segundo maior gerador das Américas — atrás apenas dos Estados Unidos (BALDÉ *et al.*, 2024). Contudo, o volume crescente de REEE evidencia a urgência por soluções eficazes. Em 2022, a geração global desses resíduos atingiu 62 milhões de toneladas, com previsão de alcançar 82 milhões até 2030. Entretanto, apenas 22,3% desse total foi reciclado adequadamente, resultando na perda de recursos estimada em US\$ 62 bilhões e ampliando os riscos de contaminação ambiental (BALDÉ *et al.*, 2024).

Além da baixa taxa de reciclagem, desafios como o consumo acelerado, os ciclos de vida curtos dos produtos, o design pouco sustentável e a limitação da

infraestrutura de coleta dificultam avanços significativos. A percepção social também contribui para o cenário. Segundo a pesquisa Resíduos Eletrônicos no Brasil – 2023, embora 88% dos entrevistados conheçam o conceito de “lixo eletrônico”, 33% ainda o confundem com “lixo digital”, como *spam*. E embora 72% já tenham descartado algum item corretamente, mais de 25% ainda os destinam ao lixo reciclável comum, sobretudo no caso de pilhas e baterias (GREEN ELETRON, 2023).

Portanto, os REEE representam tanto um desafio quanto uma oportunidade concreta para promover modelos industriais mais circulares e resilientes. Sua gestão eficaz depende de políticas públicas articuladas, investimentos em infraestrutura e, sobretudo, de conscientização coletiva quanto à responsabilidade compartilhada no ciclo de vida dos produtos.

3.3 Economia Circular e Logística Reversa

Foi constatado que o conceito de EC é interpretado e implementado de diversas maneiras e que mesmo enriquecendo os debates, gerava diferentes interpretações conceituais, comprometendo a consolidação do termo. Embora alguns trabalhos tenham discutido essas divergências em contextos específicos, ainda não havia uma análise sistemática e abrangente que avaliasse se tal consolidação havia ocorrido como um todo (KIRCHHERR *et al.*, 2017).

Após analisarem 221 definições recentes de EC, Kirchherr *et al.* (2023) suprimiram essa lacuna e identificaram pontos relevantes: (1) o conceito passou simultaneamente por processos de consolidação e diferenciação nos últimos cinco anos; (2) essas definições tem maior contribuição na produção acadêmica do que na aplicação prática; (3) a academia tem enfatizado mudanças no sistema, especialmente nas cadeias de suprimentos; (4) o principal objetivo considerado da EC é o desenvolvimento sustentável; e (5) a transição para a EC requer o engajamento de múltiplos setores, como indústrias, consumidores, formuladores de políticas e pesquisadores.

Para a implementação da EC são considerados três princípios fundamentais: (1) planejar para evitar a geração de resíduos; (2) incentivar a diversidade e a transição para energias renováveis; e (3) adotar uma perspectiva sistêmica e interligada (EMF, 2013). Nesse sentido, a EC se destaca como ferramenta para atingir os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, ao incentivar modelos

de produção e consumo mais responsáveis e inclusivos (WALKER *et al.*, 2021; UNEP, 2019).

Rosa, Sassanelli e Terzi (2019) indicam que os impactos da EC podem ser compreendidos a partir do conceito do *Triple Bottom Line* (TBL):

- Econômico: redução de custos, aumento de margens de lucro, novos mercados e fontes de receita.
- Ambiental: cumprimento da legislação, redução de impactos ambientais e uso mais eficiente de recursos.
- Social: valorização da marca, geração de empregos e desenvolvimento de capacidades.

A valorização dos REEE como insumo se alinha diretamente aos objetivos da logística reversa (LR), pois sua fabricação demanda materiais estratégicos e críticos para a indústria tecnológica, exigindo processos específicos de destinação.

A logística reversa atua como um mecanismo para encerramento do ciclo de vida de produtos e materiais. Nesse sentido, a EC se apoia nesse processo, permitindo que os resíduos gerados no fim da vida útil dos produtos, ou mesmo durante manutenções, sejam reintegrados aos ciclos de (ALMEIDA *et al.*, 2022).

Diversos países têm adotado leis específicas para incentivar a LR e limitar o uso de substâncias perigosas nos REEE (ROCHA e PENTEADO, 2021). Na União Europeia, por exemplo, a Diretiva 2012/19/EU trata diretamente dos REEE, com o objetivo de proteger a saúde das pessoas, melhorar a qualidade do meio ambiente e promover o uso eficiente dos recursos naturais (EUROPEAN UNION, 2012). Além disso, a Diretiva 2011/65/EU — conhecida como Restrição de Certas Substâncias Perigosas (RoHS) — impõe restrições ao uso de determinadas substâncias perigosas na fabricação de EEE (EUROPEAN UNION, 2011)."

No Japão, a Lei para a Promoção da Utilização Eficaz dos Recursos (LPDD), estabeleceu uma estrutura para os fabricantes, desenhou regras obrigatórias de devolução, cotas de reciclagem, diretrizes de reutilização e limites de resíduos de subprodutos (JAPAN, 2001a). Além disso, a Lei para a Reciclagem de Tipos Específicos de Eletrodomésticos (LPLD), busca o tratamento adequado dos REEE, onde os consumidores devolvam os aparelhos de ar condicionado, televisores, geladeiras e freezers, além de máquinas de lavar e secar roupas aos fabricantes, e exige que os fabricantes aceitem e reciclem os produtos devolvidos (JAPAN, 2001b).

Apesar da ausência de uma legislação federal abrangente sobre o assunto nos Estados Unidos, 25 dos 50 estados possuíam leis específicas para promover a reciclagem de REEE (ROCHA e PENTEADO, 2021). Em Michigan, a Lei de Retorno dos Produtos Eletrônicos, visa fomentar a reutilização e a reciclagem adequada de eletrônicos (EGLE, 2022).

No Brasil, em 2010 foi promulgada a Lei Federal nº 12.305, a qual institui a PNRS (BRASIL, 2010). A PNRS no seu artigo 33, entre outras abordagens, definiu a implantação de um sistema de logística reversa de equipamentos eletroeletrônicos, considerando o crescente número desses resíduos gerados (BRASIL, 2010). Em fevereiro de 2020, entrou em vigor no país o Decreto 10.240/2020, buscando a estruturação, a implementação e a operacionalização de sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico e seus componentes.

Definiu a responsabilidade compartilhada entre todos os atores da cadeia como fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, além dos consumidores, para a destinação adequada dos produtos. As metas do Acordo Setorial e do Decreto Federal no 10.240/20 são:

1. Quantitativa: o documento distribui metas para os próximos cinco anos para que ocorra a coleta e a destinação ambientalmente adequada de produtos eletroeletrônicos, com base no peso total de produtos colocados no mercado em 2018 (ano-base). O cronograma para atendimento da meta percentual a ser coletada e destinada anualmente começou com 1% em 2021, escalonando-se em 3% em 2022, 5% em 2023, 12% em 2024 e 17% em 2025.

2. Geográfica: Até 2025, todas as cidades brasileiras com mais de 80 mil habitantes — cerca de 400 municípios — devem contar com PEVs instalados em locais de fácil acesso à população, atendendo aproximadamente 15% dos brasileiros.

No dia 12 de janeiro de 2022, foi editado o Decreto nº 10.936, que detalha pontos da Lei 12.305/2010 (PNRS), oferecendo maior segurança legal às ações que têm sido implementadas nos últimos anos. Dentre as principais inovações do decreto, destaca-se a criação do Programa Nacional de Logística Reversa, que pode ser entendido como a coleta e a reciclagem de produtos e seus resíduos após serem utilizados pelo consumidor final (BRASIL, 2022).

Passados 12 anos desde a promulgação da PNRS, o governo federal apresentou o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Decreto 11.043 de 13 de abril de

2022), uma ferramenta de gestão que estabelece diretrizes, objetivos, estratégias e ações para aprimorar a gestão dos resíduos sólidos (PLANARES, 2022).

Com relação ao sistema de logística reversa de REEE, o PLANARES determina que este deve ser implementado até 2025 nos 400 maiores municípios do Brasil. O cronograma para essa implementação deveria ser gradual. A previsão era de que, em cinco anos, 17% dos equipamentos eletroeletrônicos tivessem sido recolhidos e que as cidades deveriam ter pelo menos um ponto de coleta a cada 25 mil habitantes. Apesar de não haver dados novos de 2025 até a finalização desta Tese, é bastante provável que essas metas não tenham sido alcançadas.

Para esse fim, existem duas entidades responsáveis por gerenciar esse fluxo: a Associação Brasileira de Reciclagem de Eletroeletrônicos e Eletrodomésticos (Abree) e a Gestora para Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos Nacional (GREEN ELETRON, 2023; PLANARES, 2022).

No Brasil, a ABDI realizou um levantamento para analisar a viabilidade da logística reversa de REEE, porém esse estudo concentrou-se apenas em aspectos econômicos, legais e logísticos (ABDI, 2013). A sinergia entre EC e LR se fortalece ainda mais com o desenvolvimento de tecnologias voltadas à separação e recuperação de componentes. Além disso, a EC também se articula com o conceito de ecossistema de negócios, que pressupõe a colaboração entre empresas, consumidores, fornecedores e outros agentes para criar soluções integradas e sustentáveis (MOORE, 1993; PIDUN; REEVES; SCHÜSSLER, 2022). Exemplos práticos dessa integração são observados nos estudos de De Langen, Sornn-Friese e Hallworth (2020), que analisaram a circularidade de um porto em Amsterdã, e de Hsieh *et al.* (2017), que abordaram o papel de empresas líderes na reciclagem de vidro em Taiwan.

No Brasil, um marco recente foi a promulgação da Estratégia Nacional de Economia Circular (ENEC), em junho de 2024. O decreto, coordenado pelo Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC), estabelece diretrizes para a transição do modelo linear para o circular. Entre seus objetivos estão a redução do uso de recursos naturais, o estímulo à inovação sustentável e a promoção de cadeias produtivas mais eficientes (BRASIL, 2024).

O Fórum Nacional de Economia Circular, estabelecido como uma instituição de gestão conjunta sob a ENEC, reúne indivíduos do governo, indústria, academia e

sociedade civil. Seu objetivo é aconselhar e propor as linhas principais do Plano Nacional de Economia Circular (PNEC), que servirão como uma estrutura para as ações do governo que visam alcançar a circularidade. A ideia é orientar os Estados e Municípios, incentivando a padronização de leis e a criação de ambientes produtivos mais sustentáveis, com ênfase em áreas importantes como eletroeletrônicos, plásticos, construção e têxtil.

Dessa forma, o Brasil consiga formalizar a EC como política pública abrangente, unindo desenvolvimento industrial, inovação e gestão de resíduos em um único sistema regulatório (BRASIL, 2024).

A metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida pode complementar a EC em dois importantes momentos:

1. Identificar os pontos críticos ao longo do ciclo de vida, destacando as etapas com maior potencial para redução de impactos ambientais a partir da implementação de práticas circulares;
2. Mensurar os benefícios e/ou impactos ambientais de ações de circularidade, sejam elas potenciais ou já aplicadas, comparando seus resultados com outras soluções circulares ou com modelos tradicionais de produção e consumo (lineares) (RAICV, 2024).

3.4 Avaliação do Ciclo de Vida

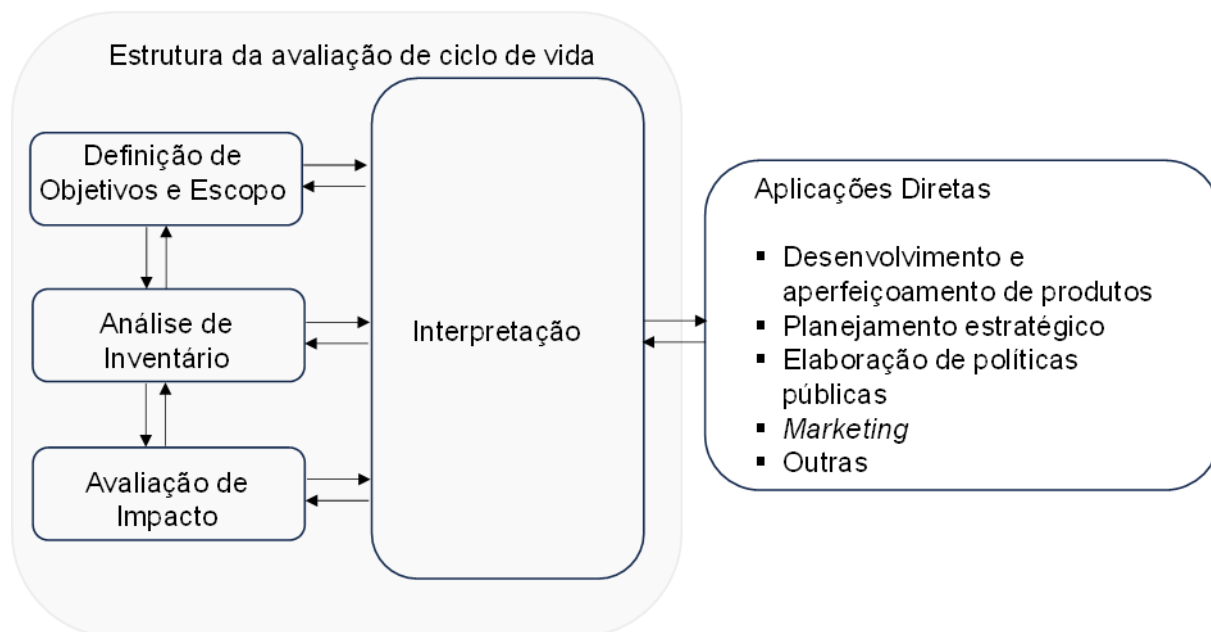
A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) compreende

a compilação e a avaliação de entradas, saídas e impactos ambientais potenciais de um sistema de produto por todo seu ciclo de vida” (ABNT, 2014a, b).

A fundamentação metodológica de um estudo de ACV é descrita pelas normas ABNT NBR ISO 14040 e 14044, que seguem as diretrizes estabelecidas pela Organização Internacional para Padronização (ISO).

Essas etapas são delineadas na Figura 1.

Figura 1 - Estrutura da ACV com seus estágios e aplicações diretas da técnica



Fonte: adaptado (ABNT, 2014)

A seguir alguns detalhes de cada etapa da ACV:

1. Definição de Objetivos e Escopo:

a. No objetivo devem estar declarados a aplicação pretendida para o estudo, as razões para sua execução, o público-alvo e se existe a intenção de divulgar os resultados publicamente (ABNT, 2014a).

b. No escopo, o sistema do produto é identificado e definido com detalhes, incluindo sua função, unidade funcional e fluxo de referência, além de estabelecer os limites do sistema. Também são determinados os requisitos metodológicos, de qualidade de dados, relatórios, e a necessidade de revisão do estudo, conforme os aspectos definidos (ABNT, 2014b).

2. Análise de inventário do ciclo de vida (ICV): constitui a segunda fase que se concentra na coleta detalhada de dados referentes aos insumos e emissões associados a um produto, processo ou serviço ao longo de seu ciclo de vida. A qualidade e a consistência dos dados obtidos nesta fase são cruciais para garantir a fundamentação dos resultados gerados. A elaboração do inventário abrange duas práticas distintas: a coleta de dados e o tratamento dos mesmos (ABNT, 2014b).

A coleta de dados compreende a obtenção de informações quantitativas ou qualitativas relacionadas ao objeto da análise. Este processo pode englobar a

utilização de diversas fontes, como medições diretas, registros, questionários, entrevistas e dados experimentais, entre outros. Esses dados podem ser classificados como primários, quando decorrentes de medições ou experimentos realizados diretamente no sistema de produto em análise. Existem também os dados secundários, quando obtidos a partir de outras fontes, em especial bibliográficas, tais como artigos, revistas, relatórios e manuais, sendo naturalmente menos representativos das condições sob avaliação (ABNT, 2014).

3. Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV): é uma fase crucial da análise que visa categorizar e identificar a magnitude e significância dos potenciais impactos ambientais para cada item inventariado (ABNT, 2014b). Esta etapa é composta por três fases operacionais obrigatórias: seleção das categorias de impacto, classificação e caracterização. Além disso, existem elementos opcionais, como normalização, ponderação e agrupamento (ABNT, 2014b).

4. Interpretação dos resultados: desempenha um papel crucial na identificação e avaliação das vulnerabilidades inerentes a um estudo de ACV. Seu principal objetivo é avaliar aspectos estruturais do estudo, a fim de fornecer *insights* sobre a robustez e a confiabilidade dos resultados obtidos. Para isso, são utilizados critérios e premissas que se aplicam à definição de objetivo e escopo, aos dados utilizados para a composição do inventário do ciclo de vida (ICV) e aos métodos e categorias de impacto adotados (ABNT, 2014b).

Bisinella *et al.* (2024), enfatiza a importância da fase de interpretação dos estudos de ACV, que ainda raramente incorpora análises de sensibilidade e incerteza de forma sistemática. Tal omissão pode comprometer a robustez dos resultados e limitar o uso dos estudos como ferramenta efetiva de apoio à tomada de decisão em contextos complexos de gestão de resíduos.

As análises de sensibilidade e de incertezas são ferramentas distintas, mas complementares numa ACV. A análise de sensibilidade foca em como mudanças em parâmetros específicos, por exemplo com cenários hipotéticos a partir de um cenário base, afetam os resultados da ACV. Já a análise de incertezas avalia a alteração nos resultados a partir, por exemplo, da variação dos dados de inventário, ou seja, uma forma de tentar aferir a qualidade dos dados.

Sempre que um estudo de ACV incluir processos que geram múltiplos produtos ou envolver reuso e reciclagem, é necessário fazer uma análise de sensibilidade para verificar como diferentes escolhas de alocação de impactos afetam os resultados

(RAICV, 2019). Dessa forma, a análise de sensibilidade identifica quais parâmetros de entrada exercem influência significativa nos resultados, contribuindo para conclusões mais robustas e recomendações mais precisas.

Para garantir a acuracidade e qualidade é sugerida a realização da análise de incertezas a partir de métodos estatísticos, como a Matriz de Pedigree. Esta avalia qualitativamente os dados em relação a cinco indicadores: (i) confiabilidade na fonte, (ii) completude, (iii) correlação temporal, (iv) correlação geográfica e (v) correlação tecnológica. Tais indicadores são pontuados numericamente, expressando diferentes graus de qualidade e incerteza dos dados. Quanto menor for a pontuação atribuída aos indicadores de qualidade, maior será a qualidade e menor a incerteza associadas aos dados (COSTANTINI *et al.*, 2020).

Um dos métodos para avaliar o impacto das incertezas nos resultados é simulação de Monte Carlo, que corresponde à abordagem numérica de propagação de incerteza e estima a firmeza e a dispersão dos resultados de ACV. Seu princípio básico consiste na repetição de cálculos usando valores estimados para cada parâmetro de entrada. Em outras palavras, essa técnica fornece um conjunto de resultados possíveis utilizando uma distribuição de probabilidade para uma variável que tenha uma incerteza associada. De modo geral, pode ser descrita por três etapas: (i) geração de amostras de valores aleatórios para todas as variáveis de entrada, (ii) aplicação do modelo nos valores gerados para obter a saída do modelo em termos de resultados de ACV, e (iii) análise estatística da saída do modelo.

Os resultados obtidos a partir da Matriz Pedigree são agregados às incertezas básicas dos respectivos processos ou produtos originando assim um vetor de incerteza com sete dimensões, que representa a variabilidade e a confiabilidade dos dados do inventário (COSTANTINI *et al.*, 2020).

3.5 Estudos que abordam as ACV e REEE

Em atenção aos trabalhos que aplicam ACV à gestão de REEE, observa-se um crescimento significativo na última década, nas pesquisas que avaliam os impactos ambientais associados às diferentes etapas do gerenciamento, incluindo coleta, transporte, desmontagem, reciclagem e destinação final. A seguir alguns estudos nacionais e internacionais que buscam caminhos para a valorização dos REEE e a

transição para economia circular no setor apoiados na técnica de avaliação do ciclo de vida.

No âmbito brasileiro, Souza, Guarnieri e Vieira (2025) analisaram qualitativamente os desafios pertinentes a transição para a economia circular no setor de REEE no Brasil. A pesquisa permitiu identificar e estruturar gargalos ao longo da cadeia de revalorização dos produtos, através da abordagem *Strategic Options Development and Analysis* (SODA). Cinco barreiras foram mapeadas: logísticas, regulatórias, comportamentais, tecnológicas e de mercado. A desunião entre os setores formal e informal, a ausência de incentivos voltados ao *ecodesign* e à circularidade dos produtos, bem como a escassez de políticas públicas, se mostraram relevantes para a tomada de decisões. Embora o estudo não tenha aplicado diretamente a metodologia ACV, suas conclusões apresentam benefícios atrelados a transição para a economia circular no setor de EEE.

Ainda no contexto brasileiro, a Tese de Rocha (2020) aplicou a ACV para avaliar os impactos e benefícios ambientais da logística reversa dos resíduos eletroeletrônicos de pequeno porte (REEE de PP) na região de Campinas-SP. A unidade funcional foi a destinação de 1 tonelada de REEE. As fronteiras do sistema limitaram-se aos processos de coleta, manufatura reversa, processos de reciclagem de plásticos, vidros, metais e PCIs, transporte e disposição final dos rejeitos (15%) em aterro sanitário.

Foram estudadas 16 categorias de impacto: aquecimento global; acidificação; uso de recursos – fósseis; respiração de inorgânicos; eutrofização água doce; oxidação fotoquímica; escassez de água; eutrofização terrestre; eutrofização marinha; uso do solo; radiação ionizante - saúde humana; depleção da camada de ozônio; toxicidade humana – efeito cancerígeno; toxicidade humana – efeito não cancerígeno e ecotoxicidade água doce. Os resultados possibilitaram identificar que aproximadamente 80% de todos os benefícios ambientais da logística reversa estão associados às categorias de uso de recursos-minerais e metais, sendo de maior relevância (64% dos benefícios), acidificação, aquecimento global, toxicidade humana – efeito cancerígeno e toxicidade humana – efeito não cancerígeno.

Rocha e Penteado (2017) aplicaram a ACV para avaliar o gerenciamento de 1 tonelada de REE de uma empresa de manufatura reversa, com dados da literatura e de base de dados disponíveis nos *softwares*. Para o estudo, consideraram as etapas de coleta, transporte, desmontagem, separação, reciclagem e destinação final. Foram

utilizados dois métodos: (i) CML 2001 (versão base) - para as categorias esgotamento de recursos abióticos, esgotamento de recursos abióticos combustíveis fósseis, acidificação, mudanças climáticas, eutrofização, depleção da camada de ozônio, e oxidação fotoquímica, e (ii) USEtox - para as categorias de toxicidade humana - efeito não cancerígeno, ecotoxicidade e toxicidade humana - efeito cancerígeno. Os impactos ambientais foram evitados na maioria das categorias, destacando-se aquecimento global, uso de recursos fósseis e acidificação. A reciclagem das placas de circuitos impressos (PCIs), mesmo esse material ser pouco representativo em termos de massa, apresentou os maiores benefícios ambientais.

Arduin *et al.* (2016), realizaram um estudo de caso de um carregador de celular em dois países diferentes: França e Brasil. A ACV foi dividida em duas etapas: (i) os impactos dos cenários de fim de vida avaliados individualmente e, na sequência, (ii) os impactos dos cenários comparados com a produção de matéria-prima virgem. O objetivo do estudo foi avaliar os ganhos da reciclagem em relação a extração de novos recursos naturais. Para isso, foram simulados três cenários: otimista (reciclagem com as melhores tecnologias), conservador (reciclagem com os canais existentes) e pessimista (disposição em aterro - Brasil ou incineração - França). A ACV foi conduzida com o método *ReCiPe Midpoint* e foram analisadas as categorias de impacto: aquecimento global, depleção de metais, ecotoxicidade aquática, toxicidade humana e eutrofização aquática.

Na primeira etapa, para o perfil Brasil, o cenário otimista exibiu impactos ambientais maiores em relação aos cenários conservador e pessimista nas categorias de aquecimento global, esgotamento de metais e eutrofização aquática. O consumo de energia e transportes necessários aos processos de reciclagem contribuíram para esses impactos. Já as categorias de impacto de ecotoxicidade aquática e toxicidade humana tiveram impactos menores, uma vez que se considerou uma reduzida quantidade de material encaminhada para o aterro sanitário (ARDUIN *et al.*, 2016).

Ainda nesta etapa, para o perfil da França, o cenário otimista, assim como no Brasil, também mostrou impactos superiores nas categorias de esgotamento de metais e eutrofização aquática. Para as categorias de impacto de aquecimento global, ecotoxicidade aquática e toxicidade humana, o cenário pessimista foi pior, tendo em vista que uma grande quantidade de materiais foi encaminhada para incineração.

Na segunda etapa, onde os cenários dos dois países foram comparados com

a produção de matéria-prima virgem, de maneira geral, pode-se dizer que os impactos da produção de matéria-prima virgem são superiores ao tratamento de fim de vida (ARDUIN *et al*, 2016).

Campolina (2015) analisou a reciclagem de plásticos provenientes de REEE, especialmente HIPS (poliestireno de alto impacto) e ABS (acrilonitrila butadieno estireno), em comparação à produção de polímeros virgens em uma empresa de reciclagem na cidade de Sorocaba no período de 2014-2015. O estudo foi realizado com o auxílio da metodologia ACV, no *software* Demo SimaPro, onde buscou mensurar as emissões atmosféricas, os resíduos sólidos, o consumo energético e efluentes líquidos, bem como os impactos ambientais relacionados às emissões de CO₂ dos processos de reciclagem. A redução no consumo de energia, em 90%, se sobressaiu dentre os aspectos ambientais avaliados. Em relação às emissões de CO₂, houve decréscimo de 87% com a reciclagem do ABS, e 84% com a reciclagem do HIPS. Esses resultados corroboram que o reaproveitamento dos plásticos em REEE, principalmente com triagem eficiente e infraestrutura adequada, são primordiais para a diminuição da produção de polímeros virgens.

No cenário internacional, o estudo de Bisinella *et al.* (2024) pondera sobre as mudanças nas sociedades e nas indústrias e como essas modificações podem afetar a gestão e modelagem de ACV aplicada à gestão de resíduos. Aborda também que tanto a gestão como a modelagem serão desafiadas a atender metas sustentáveis.

O trabalho foi organizado em torno das diferentes fases da ACV, discutindo os desafios atuais e com cenários buscando antecipar futuras alterações. Os principais pontos abordados referem-se à modelagem dos sistemas de resíduos, entrada de resíduos, tecnologias de tratamento de resíduos, trocas de energia, troca de nutrientes, quantificação e interpretação dos impactos ambientais (BISINELLA *et al.*, 2024)

Em atenção a modelagem dos sistemas, um dos aspectos levantados foi a necessidade de redefinição da função dos sistemas de gestão de resíduos, contemplando novas demandas sociais, valorização de materiais, recuperação de nutrientes, entre outros. No que diz respeito à entrada de resíduos, os autores destacam a importância de planejar, entender e adequar as tecnologias e sistemas de gerenciamento de resíduos. As entradas variam ao longo do tempo e da localização devido a padrões sociais, geográficos e culturais. Futuramente, alterações nos padrões e práticas de consumo deverão afetar a composição dos resíduos, em termos

de tipo, frações e composição. O fornecimento de um modelo específico e direcionado para cada entrada depende das quantidades e composições dos resíduos (BISINELLA *et al.*, 2024).

Sobre as tecnologias de tratamento de resíduos, o artigo as apresenta como parte do sistema de primeiro plano em uma ACV de resíduos e podem ser representadas de duas maneiras: (i) frações de material (por exemplo, plástico, papel) nas entradas e suas composições físico-químicas (poder calorífico e teor de água, p.ex.) são relacionadas às emissões e resíduos dos processos de tratamento e (ii) inventários genéricos, que são baseados em fluxos de referência predeterminados para representar os desempenhos médios de uma tecnologia de tratamento de resíduos. No tocante às trocas de energia, os sistemas de gestão de resíduos tanto consomem (uso de eletricidade, calor e combustíveis para operar o sistema) quanto produzem energia (energia recuperada entregue à sociedade do entorno). A ACV deve considerar não apenas a quantidade e tipo de energia recuperada, mas também as fontes energéticas substituídas (BISINELLA *et al.*, 2024).

Além disso, o estudo destaca a importância crescente da recuperação de nutrientes, nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), frente à necessidade de reduzir a dependência de fertilizantes fósseis. A recuperação de nutrientes pode desempenhar um papel diferente no futuro, à medida que os impactos relacionados a produtos fósseis e energia diminuem, os impactos da aplicação e substituição de nutrientes podem aumentar significativamente.

Por fim, o artigo propõe uma série de recomendações práticas para aprimorar a robustez dos modelos de ACV de resíduos, e deseja que a gestão de resíduos possa desempenhar papel estratégico na sustentabilidade e não só cumpra metas ambientais.

Maphosa e Maphosa (2024) realizaram uma revisão sistemática da literatura sobre EC e REEE, no período de 2014 a 2023, analisando 949 publicações. O objetivo principal do artigo, foi explorar a EC e o cenário atual de pesquisa sobre REEE. O objetivo secundário visou identificar os temas centrais que dominam a pesquisa sobre EC e REEE. Diversas lacunas foram identificadas na literatura, sendo uma das principais, as pesquisas sobre a reciclagem de componentes específicos, como baterias de íon-lítio. Outra lacuna de pesquisa está na aplicação dos princípios da economia circular frente à evolução tecnológica. São sugeridas pesquisas futuras

sobre o design de equipamentos eletrônicos, como fácil desmontagem, reciclagem e reaproveitamento e em desenvolvimento de políticas públicas que incentivem modelos de negócios circulares, bem como produção e consumo sustentáveis.

Ghisellini; Passaro e Ulgiati (2023) publicaram um trabalho onde avaliam os impactos ambientais e sociais da gestão de REEE (coleta e reciclagem) na região da Campânia - Itália, com base em dados reais do ano de 2020. O estudo confronta os impactos da reciclagem com os da produção primária dos materiais recuperados. Os materiais incluem metais ferrosos (como ferro e aço), metais não ferrosos (cobre e alumínio), plásticos mistos, vidros e pequenas quantidades de metais preciosos (ouro, prata e paládio). A coleta dos resíduos no local é realizada por meio de pontos municipais autorizados, onde a população pode levar gratuitamente os resíduos. Posteriormente são recolhidos e encaminhados a instalações especializadas para triagem, desmontagem e reciclagem, como a empresa Ri-Plastic, de onde foram obtidos os dados primários do estudo. Após a triagem feita pela Ri-Plastic, os materiais (especialmente metais e plásticos) são encaminhados a recicladores industriais especializados. Os REEE foram divididos em 5 categorias, sendo R1: refrigeradores e equipamentos de resfriamento; R2: grandes eletrodomésticos (máquinas de lavar, fogões); R3: monitores e telas; R4: pequenos eletrodomésticos e R5: lâmpadas e iluminação. A ACV Ambiental foi aplicada seguindo a norma ISO 14040/14044 com modelagem no *software OpenLCA 2.0*, utilizando o método *ReCiPe 2016 Midpoint* para avaliar 18 categorias de impacto. Algumas das principais categorias estudadas foram: potencial de aquecimento global; ecotoxicidade marinha e de água doce; toxicidade humana – efeito cancerígeno e toxicidade humana – efeito não cancerígeno; eutrofização (marinha, terrestre e de água doce); formação de ozônio; escassez de recursos fósseis e minerais; acidificação; uso da terra; consumo de água; formação de material particulado; depleção da camada de ozônio e radiação ionizante. A ACV Social foi baseada nas diretrizes do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP), aplicando uma abordagem qualitativa com entrevistas e dados de campo sobre os *stakeholders* "comunidade local" e "sociedade".

Ao comparar a reciclagem dos metais com a produção primária, os resultados mostram a reciclagem de metais a partir do REEE gera impactos significativamente menores em todas as categorias quando comparado à extração e refino de materiais primários (mineração). O estudo também apresenta os materiais com maior contribuição para impactos: (i) ferro e cobre foram responsáveis por mais de 80% dos

impactos nos grupos R1 e R2; (ii) vidro e alumínio foram os maiores contribuidores em R5 e (iii) materiais de alto valor econômico (ouro, prata, paládio) têm baixa massa, mas alto impacto econômico e social. Os principais resultados da ACV Social são os impactos positivos predominantes para a sociedade e comunidade local (geração de empregos locais, engajamento em projetos comunitários) e os desafios sociais identificados são a ausência de incentivos econômicos à reciclagem e a desigualdade na infraestrutura de coleta entre municípios.

No contexto asiático, Mangmeechai (2022) avaliou o sistema de gestão de REEE na Tailândia, ano base 2019, por meio da integração entre ACV (focada em emissões de gases de efeito estufa) e Análise de Custo do Ciclo de Vida (LCC). O gerenciamento de resíduos eletrônicos no país envolve a coleta, desmontagem, transporte, reciclagem e descarte. Os principais REEE descartados são: tubos de raios catódicos (CRTs) de TV, computadores de mesa, condicionadores de ar e telefones celulares e, dessa maneira, foram os REEE avaliados. Na Tailândia, as famílias não possuem diretrizes para o descarte de REEE. No setor industrial os REEE são enviados para indústrias de desmontagem e reciclagem, na sua maioria filiais estrangeiras. Os materiais de maior valor, como placas de circuito impresso e bateria, são exportados para recicladores estrangeiros (Cingapura e Coreia do Sul). Os materiais de menor valor (plástico, metais ferrosos) são reciclados no país. A ACV foi realizada através do *software* SimaPro e o método utilizado foi o Eco-indicator 99 com alocação padrão. Os resultados apontam o gerenciamento de resíduos de aparelhos de ar condicionado geram as maiores quantidades e GEE, embora tenham a menor receita para os recicladores tailandeses. Os principais fatores que afetam os GEE do ciclo de vida são as distâncias de transporte da geração de resíduos até as áreas de desmontagem e as empresas de reciclagem.

Pokhrel; Lin e Tsai (2020), com o auxílio da metodologia de ACV analisaram os impactos ambientais causados pelos processos de reciclagem de placas de circuito impresso (PCI) pós-consumo, em Taichung, Taiwan, República da China. Foram considerados nove metais (alumínio, cobre, ouro, chumbo, níquel, prata, estanho, zinco e ferro) e dois materiais não metálicos (resina e fibra de vidro). Foram apresentados dois processos para a reciclagem de PCIs: separação mecânica, que utiliza energia elétrica como fonte de energia e é responsável por uma pequena parcela de emissões; e purificação, que utiliza ácidos fortes bem como outros produtos

químicos, causando maiores impactos ambientais. A ACV foi realizada usando o *software* SimaPro (versão 9.0.0.49) e o sistema internacional de referência de dados do ciclo de vida (ILCD) 2011 *Midpoint+* juntamente com o banco de dados Ecoinvent-3.

As PCIs foram tratadas através de processos mecânicos (tritador, peneirador, soprador de vento, separador magnético e de correntes parasita). Posteriormente, os metais e não metais foram separados. Na sequência, os metais passam pelo processo de purificação. Foram analisadas 16 categorias de impacto: mudanças climáticas; depleção de ozônio; toxicidade humana (efeitos cancerígenos); toxicidade humana (efeitos não cancerígenos); material particulado; radiação ionizante; formação fotoquímica de ozônio; acidificação; eutrofização terrestre e marinha; ecotoxicidade de água doce; uso da terra; depleção de recursos hídricos e recursos minerais; fósseis e renováveis (POKHREL; LIN; TSAI, 2020).

A recuperação de ouro apresentou menor impacto ambiental do que a mineração convencional. Ao ser comparado com os demais metais como estanho, zinco, esses tiveram impactos ambientais quatro vezes superiores em relação ao ouro. Os resultados apontam que as categorias de impacto toxicidade humana, tanto os efeitos cancerígenos quanto os não cancerígenos, a ecotoxicidade da água doce e o esgotamento dos recursos minerais, fósseis e naturais, são os principais contribuintes para os impactos ambientais da reciclagem das placas de circuito impresso. Na categoria de impacto mudanças climáticas, os metais com maiores impactos foram o estanho, zinco e ferro, nessa categoria, o ouro teve o menor impacto. Já na categoria toxicidade humana – efeito cancerígeno, o metal ouro teve a maior contribuição, os metais ferro e prata tiveram os menores impactos. Todos os metais reciclados apresentaram benefício econômico líquido positivo, sendo o ouro o mais rentável (POKHREL; LIN; TSAI, 2020).

Entre os trabalhos analisados, apenas o estudo de Arduin *et al.* (2016) incorporou análise de sensibilidade, considerando três cenários distintos — otimista, pessimista e conservador. Isso evidencia que essa abordagem, essencial para comparar diferentes desempenhos ambientais, econômicos ou sociais diante de incertezas, ainda é pouco explorada na literatura sobre o tema.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Objetivo e Escopo

4.1.1 Objetivo

O objetivo deste estudo de caso é analisar a performance ambiental de uma organização com Operações de Manufatura (Unidade 1) e Sistema de Logística Reversa de Equipamentos Eletroeletrônicos (Unidade 2), alinhadas aos princípios da Economia Circular. Cenários com diferentes propostas como regressão (100% destinação para aterros sanitários) e progressão história (0% destinação para aterros sanitários), foram examinados para identificar os pontos críticos e ganhos.

4.1.2 Escopo

4.1.2.1 Caracterização da Area de Estudo

A área estudada compreende uma instalação de montagem de eletroeletrônicos de marcas reconhecidas, ocupando uma área de 600 mil m². Essa instalação possui cerca de 2.200 colaboradores e é localizada a uma distância de 100 km da capital paulista, e será referida como Unidade 1 - Manufatura.

A Unidade 2 - Logística Reversa, tem extensão de 220.000 m² e mais de 100 colaboradores, é responsável por coletar, reciclar e transformar equipamentos, peças e componentes eletrônicos em matérias-primas para novos produtos. A distância entre as duas Unidades é de aproximadamente 1 km.

As unidades industriais analisadas contam com diversas certificações internacionais que validam a conformidade e a robustez dos sistemas de gestão em diversas áreas. Certificações através da *International Organization for Standardization* (ISO): Sistema de Gestão da Qualidade (ISO 9001), Gestão Ambiental (ISO 14001), Sistema de Gestão da Segurança da Informação (ISO 27001), Sistema de Gestão de Saúde e Segurança Ocupacional (ISO 45001), Gestão de Energia (ISO 50001). Também possuem certificações como reciclagem responsável (R2) *Zero Waste*

(*Underwriters Laboratories- UL 2799 – Platinum*), Yellow Card para resinas plásticas, além de reconhecimentos em responsabilidade social corporativa e clima organizacional.

Em 2023, essas unidades receberam prêmios e reconhecimentos relevantes, como a distinção “Farol de Sustentabilidade” pela *Global Lighthouse Network* (GLN) do Fórum Econômico Mundial, o Selo Ouro do Programa Brasileiro *GHG Protocol* (escopos 1, 2 e 3) e o Prêmio Eco Amcham na área de sustentabilidade.

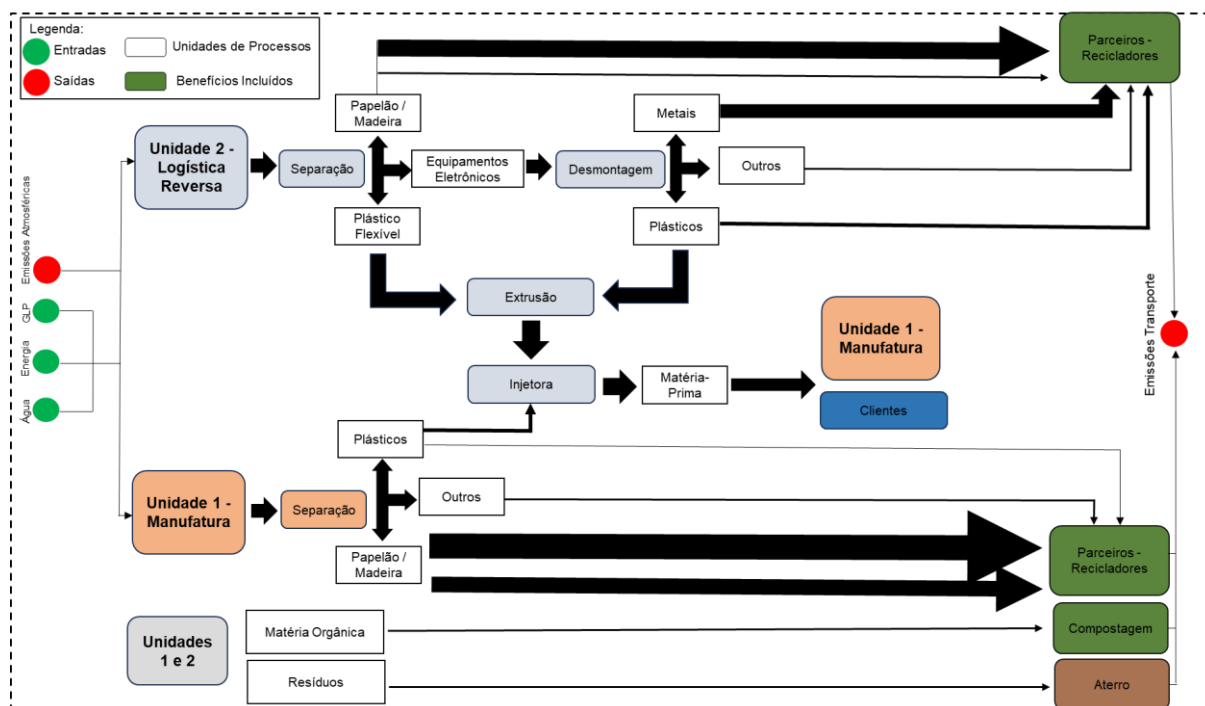
4.1.2.1.1 Unidade 1 – Manufatura

Todos os materiais gerados na Unidade 1, como sobras da linha de produção, papel, papelão, vidro, madeira, metais, entre outros, são coletados e separados por tipo e enviados para parceiros recicladores. De acordo com as informações fornecidas pela empresa, esses parceiros são auditados periodicamente, afim de garantir que a destinação final seja correta. Peças fora de especificação e pedaços de plástico, feitos de ABS (copolímero de acrilonitrila, butadieno e estireno), HIPS (poliestireno de alto impacto), PP (polipropileno), PE (polietileno) e PC-ABS (policarbonato/ABS) são enviados para a Unidade 2 para serem reciclados, conforme a Figura 2, que apresenta o Sistema de Produto do parque fabril estudado, com os fluxos de entradas e saídas de produtos e materiais.

A Unidade 1 contém uma Central de Resíduos que recebe as embalagens (papelão e plásticos, principalmente PE), peças fora de especificação e em fim de vida (peças plásticas, PCIs - placas de circuitos impressos e outros componentes) e os classifica e armazena por tipo de material.

Equipamentos como aglutinador e prensas auxiliam na preparação desses resíduos para a destinação final. Enquanto as prensas para papelão e plásticos compactam os materiais e os transformam em fardos, o aglutinador densifica filmes plásticos (polietileno, em geral), valorizando o material, viabilizando operações posteriores. O último estágio dentro da Central é área de Estoque, onde o material aguarda a destinação final.

Figura 2 – Fluxograma Resíduos Sólidos no Parque Fabril estudado, constituído da Unidade 1 (montagem de eletroeletrônicos) e Unidade 2 (logística reversa)



Fonte: Autoria Própria

4.1.2.1.2 Unidade 2 – Logística Reversa

A Unidade 2 é responsável pelo recebimento de resíduos eletrônicos pós-consumo (Logística Reversa) de mais de 450 pontos de coleta distribuídos em todo país. Conforme mencionado anteriormente, a Unidade 2 também recebe materiais plásticos provenientes da Unidade 1, conforme descrito acima, os quais chegam já separados e são destinados à reciclagem.

Entrelaçando os conceitos de economia circular e a Indústria 4.0, um dispositivo de transmissão de dados, notifica quando as caixas coletoras atingem 70% de sua capacidade, acionando automaticamente uma ordem de coleta, em fase de implantação, não instalado em 100% das caixas. Permitindo que os veículos de coleta sejam deslocados apenas quando necessário, gerando impactos ambientais positivos, como a redução no consumo de combustível.

Quando da entrada dos equipamentos pós-consumo (Logística Reversa) na Unidade 2, ocorre a retirada de todas as embalagens (geralmente de papelão, papel e plástico). Na sequência é realizada a triagem (separação dos equipamentos

descartados por tipo e modelo). Para a identificação, utiliza-se a tecnologia RFID (etiquetas inteligentes com chips de identificação por radiofrequência).

Após o processo de triagem, os materiais são encaminhados para as linhas de desmontagens, seja manual ou automática. Estes são então desmontados em peças ou pedaços de materiais, como ABS, HIPS, PP e outros plásticos, bem como metal ferroso, cobre, alumínio, vidros, baterias e placas de circuito impresso.

Nesse momento da descaracterização, qualquer vestígio de conteúdo sigilosos ou não, é destruído.

Para alguns tipos de produto, onde a desmontagem manual é inviável ou até impossível, foi desenvolvido em parceria com uma empresa alemã, uma máquina capaz de triturar todo o material sem distinção, e o separa automaticamente entre plásticos, metais ferrosos e não ferroso. Essa separação não é tão detalhada nem criteriosa quanto a separação manual, mas é suficiente para dar o correto destino aos materiais gerados (SINCTRONICS, 2019).

Desse processo, são obtidos alguns materiais que beneficiam um outro nicho de mercado. Pedaços de plástico misturados com etiquetas, partes metálicas ou mesmo plásticos de baixa qualidade, que não atendem aos padrões exigidos pela indústria eletroeletrônica, são misturados entre si e esse composto gera um material que pode ser usado de diversas formas, como uma madeira plástica.

Os materiais plásticos de HIPS e ABS (os mais comuns em resíduos eletroeletrônicos) são triturados separadamente, sendo obtidos pequenos flocos que são encaminhados para o processo de extrusão.

Na etapa de extrusão o plástico triturado é fundido, resfriado e cortado em pequenos grânulos (pellets), formato ideal para processamento em quase todos os equipamentos que transformam plásticos em peças finais.

Em atenção aos cabos dos equipamentos, a separação do metal (cobre e alumínio) da capa isolante (PVC, PP, PE, borracha, etc) é realizada através do moedor industrial (máquina de reciclagem de cobre).

4.1.2.2 Função, unidade funcional, fluxo de referência e abordagem

A função do sistema de produto é gerenciar os resíduos com o propósito de separá-los e, quando necessário, submetê-los a algum tipo de tratamento. Dessa

forma, a ideia é encaminhar praticamente todos os resíduos disponíveis para reciclagem e compostagem, reservando apenas quantidades mínimas para aterramento ou a tecnologias térmicas (coprocessamento). A certificação “Aterro Zero” que a empresa possui estabelece um limite máximo de 3% de resíduos encaminhados a aterro e incineração/coprocessamento para se obter o nível *Platinum*, o maior (UL 2799, 2017).

Estabeleceu-se como a Unidade funcional do sistema de produto o gerenciamento, separação encaminhamento para reciclagem e tratamento de 5,5 mil toneladas por ano de resíduos. Esse valor é a média anual do total absoluto do período em estudo gerenciado pelo parque fabril estudado, conforme pode ser visto no item 4.3.

O fluxo de referência da unidade funcional foi definido como: 1 tonelada de resíduos sólidos industriais.

A abordagem de modelagem do estudo é atribucional, ou seja, a modelagem dos fluxos de entrada e saída do sistema é atribuída à função que o sistema exerce.

Para estudos comparativos, a equivalência funcional dos sistemas deve ser garantida e o mesmo escopo deve ser adotado, de tal maneira que sejam utilizadas a mesma unidade funcional e considerações metodológicas, tais como, fronteira do sistema, desempenho, procedimentos de alocação, qualidade dos dados, regras para decisões quanto à avaliação de entradas e saídas e avaliação de impacto (REDE ACV, 2022).

Além disso, é recomendado que as incertezas associadas aos resultados da ACV (indicadores de categoria de impacto) sejam estimadas com o uso de métodos estatísticos (por exemplo, propagação de incertezas via simulação de Monte Carlo). Análises de sensibilidade podem ser utilizadas como um método complementar para avaliar as incertezas do estudo (REDE ACV, 2022).

4.1.2.3 Fronteiras do sistema de produto

O sistema de produto considera o ciclo de vida dos resíduos do portão-a-portão, ou seja, das Unidades 1 e 2 até a destinação final (outras empresas). O transporte até o destino final foi contabilizado.

Na Figura 2 é apresentado graficamente o sistema de produto estabelecido e seus fluxos de entradas e saídas, onde destacam-se que:

- Resíduos dos refeitórios (embalagens de alimentos muito sujas e guardanapos sujos, p.ex.), de banheiros e de varrição e limpeza são encaminhados para Aterro Sanitário.
- Resíduos do preparo das refeições, bem como sobras dos pratos e restos de alimentos nas cubas e de jardinagem, são encaminhados à Compostagem.
- Para o funcionamento das centrais são necessários: água, eletricidade e gás liquefeito de petróleo (para as empilhadeiras) e são gerados, materiais separados, emissões atmosféricas e resíduos sólidos, destinados a reciclagem/parceiros.
- Os transportes externos dos resíduos sólidos para os destinos finais são realizados por caminhões movidos a óleo diesel.

Os diferentes tipos de reciclagem para cada material, a compostagem e o aterramento não foram considerados neste estudo.

4.2 Cenários utilizados na Análise de Sensibilidade

Diante dos resultados apresentados no item 5.2, que envolve o cenário atual do parque fabril estudado (91% reciclagem, 4% aterro sanitário e 5% compostagem), foram propostos outros cenários para mensurar os impactos ambientais das ações de melhorias ambientais implementadas e comparar com outras soluções circulares e também com soluções lineares, tendo como base os objetivos específicos da pesquisa:

1. Impactos em uma regressão histórica

O foco é uma abordagem do passado, ou seja, maior porcentagem de disposição em aterro sanitário.

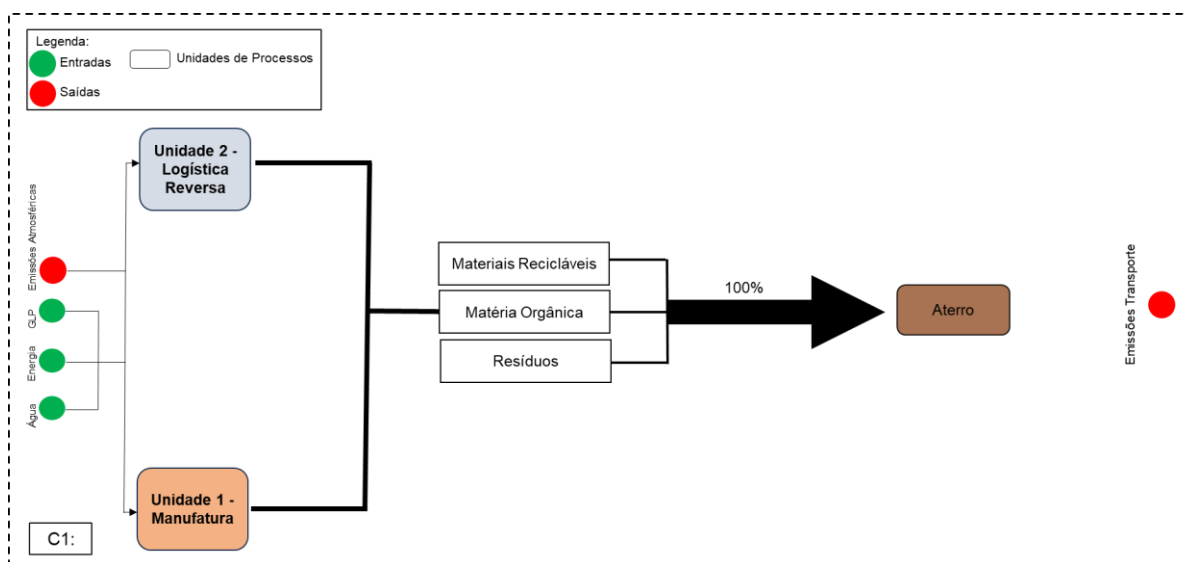
2. Impactos em uma progressão histórica

Explorar possíveis cenários futuros, considerando tratamento térmico, por meio de incineradores.

- **Cenários com regressão histórica para destinação dos resíduos:**

C1: 0% reciclado - 100% aterro sanitário: neste cenário, independente de sua origem e de sua reciclabilidade, todos os materiais são destinados ao aterro sanitário, conforme Figura 3.

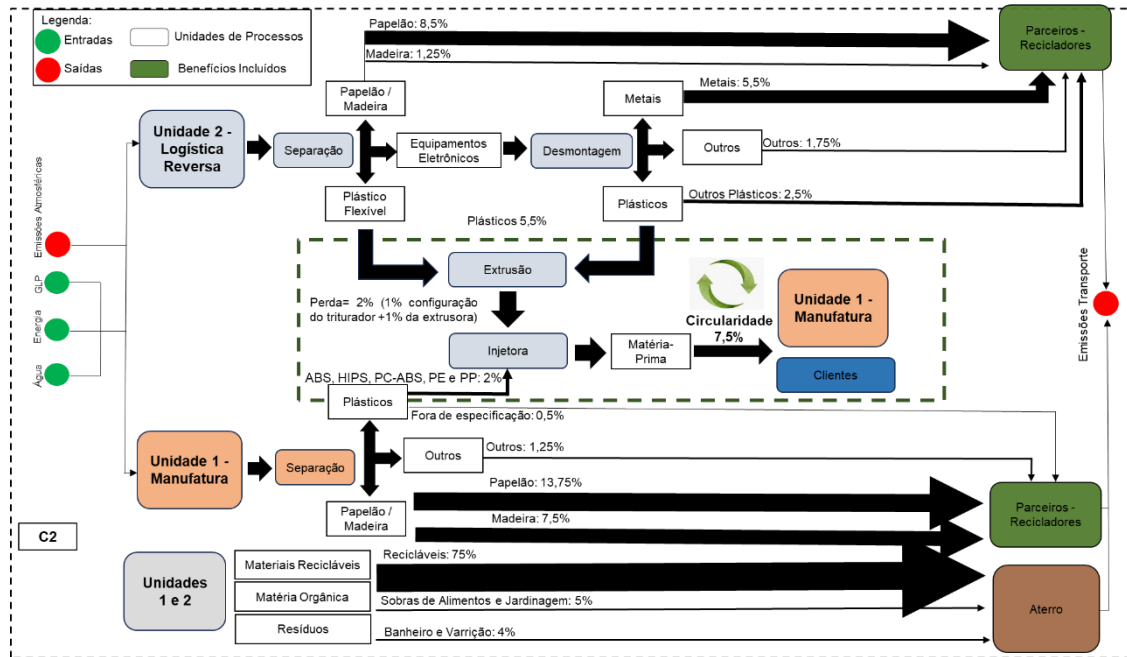
Figura 3 - Sistema de Produto e Fronteiras do Sistema do Cenário 1, no qual se considera 0% de reciclagem e 100% de aterramento



Fonte: Autoria Própria

C2: 25% reciclagem - 75% aterro sanitário: assume-se a fração de reciclagem (25%) dos materiais separados nas Unidades 1 e 2. A fração 75% dos resíduos não-recicláveis (como de banheiros e de refeitório com alimentos impregnados) e resíduos de alimentos dos refeitórios e jardinagem - ver item 4.3, se somam a uma grande quantidade de recicláveis que não foram separados, e todos são enviados para aterros sanitários, conforme apresentado na Figura 4.

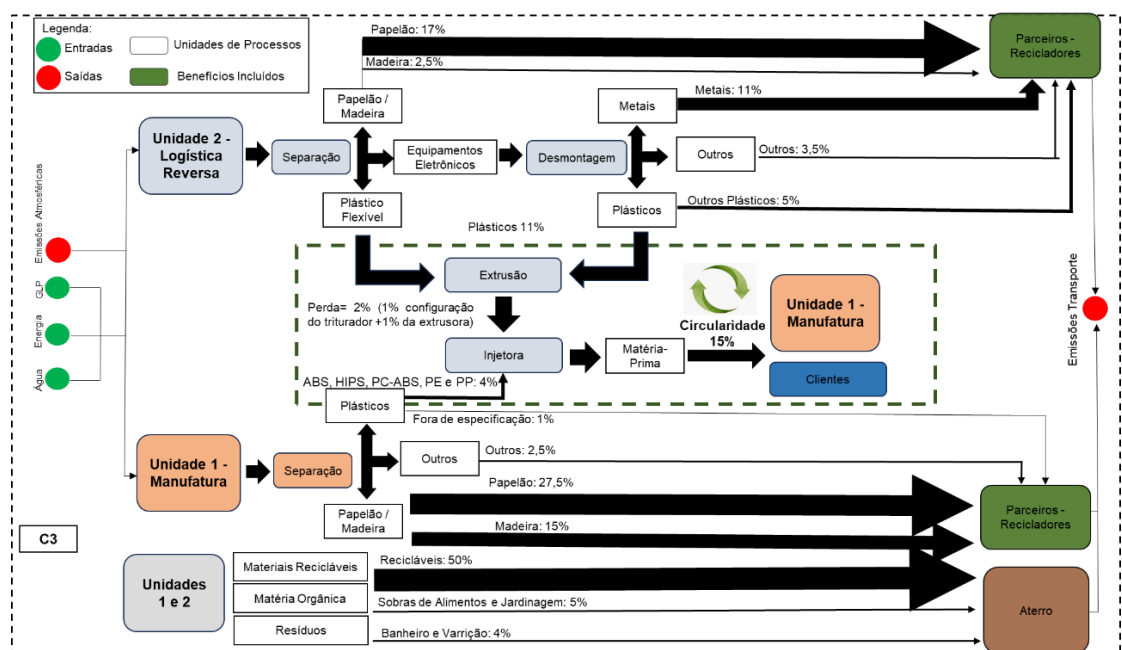
Figura 4 - Sistema de Produto e Fronteiras do Sistema do Cenário 2, no qual se considera 25% de reciclagem e 75% de aterramento



Fonte: Autoria Própria

C3: 50% reciclagem - 50% aterro sanitário: mesmas diretrizes do cenário C2, alterando a fração média de envio para reciclagem e aterro sanitário, conforme Figura 5.

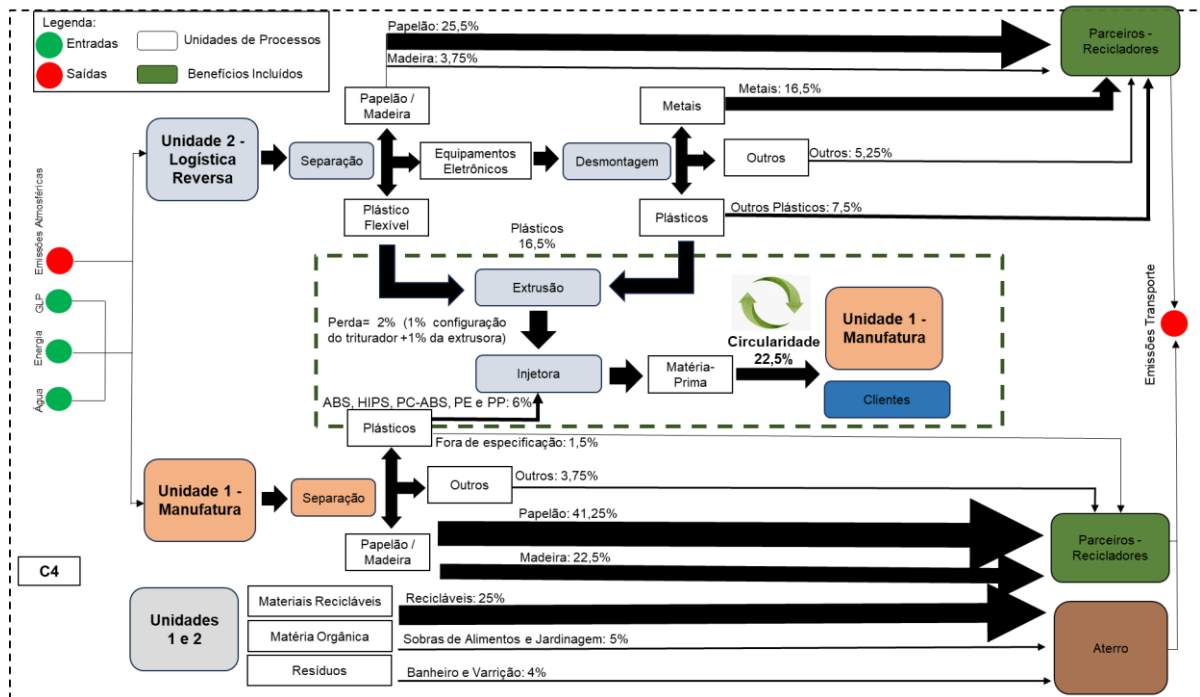
Figura 5 - Sistema de Produto e Fronteiras do Sistema do Cenário 3, no qual se considera 50% de reciclagem e 50% de aterramento



Fonte: Autoria Própria

C4: 75% reciclagem - 25% aterro sanitário: mesmas diretrizes do cenário C2, alterando a fração média de envio para reciclagem e aterro sanitário, ver Figura 6.

Figura 6 - Sistema de Produto e Fronteiras do Sistema do Cenário 4, no qual se considera 75% de reciclagem e 25% de aterramento



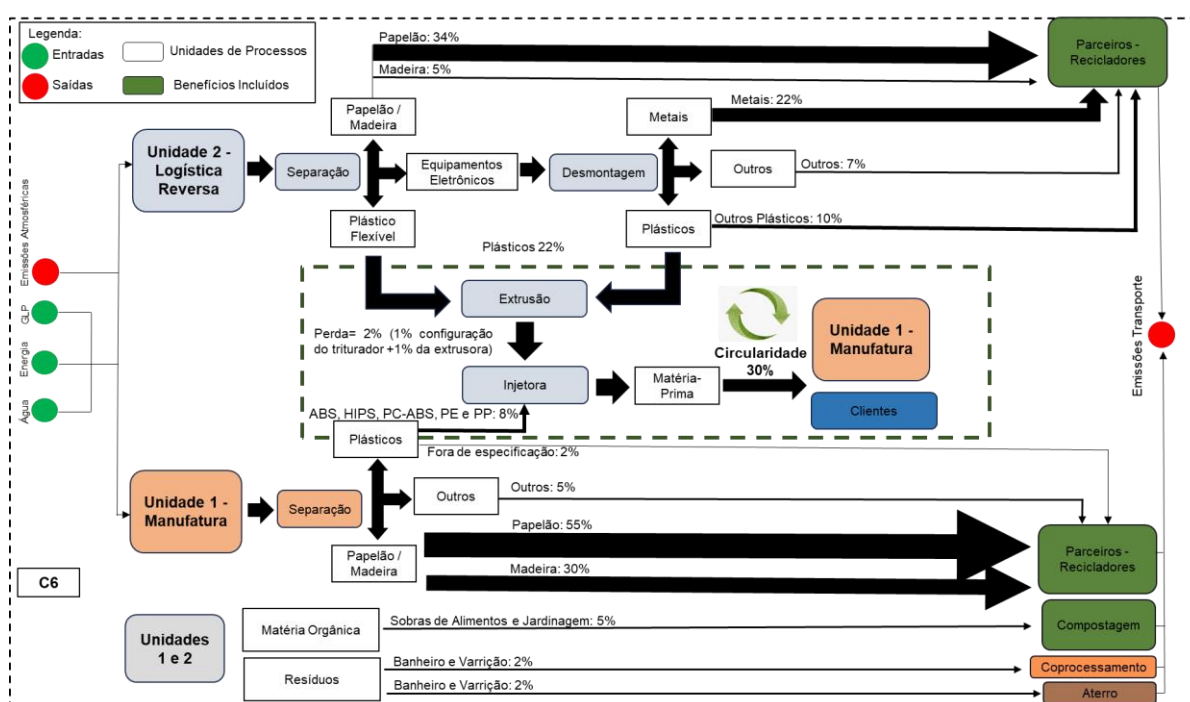
Fonte: Autoria Própria

C5 – Base – Atual. Neste cenário, ilustrado na Figura 2, consideram-se as frações médias anuais observadas ao longo do período em estudo. A reciclagem corresponde a 91%, em média, dos materiais provenientes tanto da Logística Reversa (Unidade 2) quanto da Manufatura (Unidade 1). Cerca de 5% dos resíduos orgânicos, oriundos dos refeitórios e das atividades de jardinagem (conforme detalhado na Seção 4.3), são destinados à compostagem. Já a fração restante, equivalente a 4% dos resíduos não recicláveis — tais como os provenientes de sanitários e resíduos alimentares não compostáveis (também descritos na Seção 4.3) — é encaminhada para disposição final em aterros sanitários.

- **Cenários com progressão histórica para destinação dos resíduos:**

C6: 91% reciclagem - 2% aterro sanitário - 2% coprocessamento - 5% compostagem: mesmas diretrizes do cenário C5 em atenção a reciclagem e compostagem. Em relação aos resíduos não-recicláveis (como de banheiros e de refeitório não compostáveis, 50% continua sendo enviados para aterros e os outros 50% são direcionados para queima com recuperação de energia conforme Figura 7.

Figura 7 - Sistema de Produto e Fronteiras do Sistema do Cenário 6, onde se considera 91% de reciclagem, 2% de aterramento, 2% coprocessamento e 5% compostagem



Fonte: Autoria Própria

C7: 91% reciclagem - 0% aterro sanitário - 4% coprocessamento - 5% compostagem: mesmas diretrizes do cenário C5 em atenção a reciclagem e compostagem. Em relação aos resíduos não-recicláveis (como de banheiros e de refeitório não compostáveis), 100% são direcionados para a queima com recuperação de energia, ver Figura 8.

Figura 8 - Sistema de Produto e Fronteiras do Sistema do Cenário 7, onde se considera 91% de reciclagem, 0% de aterramento, 4% coprocessamento e 5% compostagem

Os seis cenários definidos, além do atual, foram desenvolvidos e modelados em conformidade com:

- A Política Nacional de Resíduos Sólidos estabelecida pela Lei 12.305/2010 e pelo Decreto Federal no 10.936/2022: destacando estratégias para não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, com disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos;
- Metas do Acordo Setorial e Decreto Federal no 10.936/2022: prevê que as empresas deviam, em 2021, coletar e destinar corretamente 1%, em peso, do que colocaram no mercado em 2018, ano definido como base. Nos anos seguintes, as metas subiam para 3%, 6%, 12%, e chegaram a 17% em 2025; e
- Princípios da Economia Circular: os resíduos deixam de ser descartados e passam a ser reaproveitados como matéria-prima, possibilitando a criação de novos produtos, a geração de valor econômico e a redução dos impactos ambientais.

Em relação ao inventário do ciclo de vida dos cenários propostos (C1, C2, C3, C4, C6 e C7), como premissa deste estudo, foram mantidas as quantidades dos resíduos sólidos separados anualmente nas Unidades de Manufatura – 1 e de Logística Reversa - 2, no período de 2015-2022, do Cenário Atual (C5), conforme Tabelas 3 e 4.

4.3 Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

A seguir, apresenta-se a modelagem do Inventário do Ciclo de Vida (ICV), construída a partir da integração de diferentes tipos e fontes de dados, tanto primários quanto secundários. Para o mapeamento dos fluxos e processos, foram utilizados dados obtidos diretamente das unidades analisadas, informações da literatura especializada, bases de dados de inventários de ACV reconhecidas e ferramentas computacionais para cálculos. O Quadro 2 exemplifica os principais tipos e fontes de dados utilizados no projeto.

Quadro 2 – Tipos e Fontes de dados relacionados à geração de resíduos no parque fabril estudado

Entradas	Descrição		Tipo de Dado	Destinação Final
Materiais Recicláveis	Peças Plásticas	ABS - Acrilonitrila butadieno estireno HIPS - Poliestireno de alto impacto PE - Polietileno PP - Polipropileno Outros - peças de PC (Policarbonato), PS (poliestireno) e blendas de PC-ABS.	Primário	Reciclagem
	Alumínio			
	Bateria			
	Cobre			
	Madeira			
	Metal Ferroso	Aço carbono e Inox		
	Papelão			
	PCI			
	Vidro			
	Outros Componentes	Partes não plásticas de mouse, teclado, câmeras, etc		
Matéria Orgânica	Resíduos de sobra e preparo das refeições + jardinagem		Primário	Compostagem
Resíduos	Resíduos de banheiro + varrição		Primário	Aterro Sanitário
Água	Consumo de água nas Centrais de Resíduos		Primário	-
Energia Elétrica	Consumo de eletricidade nas Centrais de Resíduos		Primário	-
GLP - Gás liquefeito de petróleo	Consumo de GLP nas Centrais de Resíduos		Primário	-
Transporte	Transporte Externo das Centrais para a Destinação Final		Primário / Secundário	-

Fonte: Autoria Própria

Observação: foram nomeados como “primários” os dados internos das empresas e que foram disponibilizados para esta Tese a pedido da pesquisadora, embora ela não tenha os gerado diretamente. Isso se deu para que estes fossem diferenciados dos dados obtidos de literatura, por exemplo.

As entradas de água, energia elétrica e gás liquefeito de petróleo (GLP) contemplam as atividades integradas das Centrais de Resíduos nas Unidades 1 (Manufatura) e 2 (Logística Reversa). Na Unidade 1, a água é utilizada em estruturas de apoio, como sanitários, bebedouros e equipamentos como o aglutinador. A energia elétrica, por sua vez, é essencial para o funcionamento de equipamentos operacionais e administrativos, como prensas de papelão e plástico, computadores e demais dispositivos auxiliares.

Na Unidade 2, além do uso em sanitários e bebedouros, a água é aplicada diretamente nos processos produtivos, como na extrusão de plásticos, onde o resfriamento do material recém-processado ocorre por imersão em tanques. A energia elétrica abastece as etapas do processo, incluindo triagem (tecnologia RFID),

moagem (moinhos) e extrusão (extrusoras, silos, picotadores, mesas vibratórias, torres de resfriamento de água, entre outros).

A água utilizada no resfriamento do plástico durante a etapa de extrusão opera em um sistema de circuito fechado, sem geração de efluentes líquidos. Esse sistema é equipado com uma torre de resfriamento, responsável pelo controle da temperatura da água antes de sua recirculação no processo.

Em ambas as unidades, o GLP é destinado ao abastecimento das empilhadeiras utilizadas nas operações logísticas.

A modelagem das entradas foi conduzida com base em processos disponíveis em bancos de dados de inventário do ciclo de vida (LCI), como o *Ecoinvent 3* e o *U.S. Life Cycle Inventory (LCI) Database*, ambos reconhecidos internacionalmente por oferecerem conjuntos de dados padronizados e abrangentes sobre fluxos de materiais, energia e emissões em diversas cadeias produtivas, com suporte do *software* SimaPro 9.4.0.2®.

O modelo de sistema APOS - alocação no ponto de substituição, segue uma abordagem atribucional, onde assume-se que os materiais recuperados no sistema — como metais, plásticos ou composto orgânico — substituem produtos equivalentes que, de outra forma, seriam produzidos por processos convencionais, ver Quadro 3. Trata-se então de uma abordagem em que as cargas ambientais são divididas entre o produto primário e o resíduo recuperado que será reciclado. Além disso, foram utilizadas bibliotecas de dados especializadas, como o *WEEE LCI Database – Waste Electrical and Electronic Equipment*, voltada especificamente ao tratamento e destinação de resíduos de eletroeletrônicos. A biblioteca *Carbon Minds 2021* versão 1, que disponibiliza dados voltados aos principais produtos químicos e plásticos responsáveis por aproximadamente 75% das emissões industriais globais de gases de efeito estufa.

A biblioteca *Datasmart US-EI 2.2 (Packaging)*, 2016, agregou mais de 700 processos adicionais em setores como têxtil, embalagens, biomateriais, metais e laticínios, além de oferecer novos cenários de disposição final de resíduos. Por fim, a *Industry Data 2.0* (2015) contribuiu com mais de 300 conjuntos de dados específicos dos setores de plásticos, surfactantes, detergentes e aço.

As distâncias relacionadas ao transporte externo (modal rodoviário) foram estimadas por meio de ferramentas geoespaciais online, como o Rota Brasil, utilizando os Códigos de Endereçamento Postal (CEP) dos locais de destinação final.

Os dados primários foram obtidos junto ao parque industrial estudado, por meio de relatórios internos fornecidos em planilhas do *Microsoft Excel*. Esses dados foram coletados diretamente com os responsáveis pelo controle de entrada e saída de materiais, baseando-se em notas fiscais e sistemas internos de planejamento. Ressalta-se que tais dados apresentam alta dinamicidade, visto que novos clientes, produtos e parceiros são continuamente inseridos ou removidos do portfólio da empresa, o que torna o processo de sistematização e análise dos dados complexo.

Para lidar com essa variabilidade, foi utilizado o software *Microsoft Power BI*, que oferece ferramentas de visualização e análise de dados. O período analisado compreende os anos de 2015 a 2022, sendo que as entradas de materiais recicláveis, matéria orgânica e resíduos (conforme o Quadro 3) foram organizadas por ano, parceiro e destino final (reciclagem, compostagem ou aterro sanitário). Essa categorização foi necessária, considerando que um mesmo parceiro pode atuar com diferentes tipos de materiais ou que determinados materiais apresentem variações, como no caso de plásticos de diferentes cores.

Quadro 3 – Processos do inventário do ciclo de vida – ICV do parque fabril estudado de 2015 a 2022 relacionado as entradas às unidades de processo existentes no *software*

Entradas	Descrição		Unidade	Base de dados do Software
Materiais Recicláveis	Peças Plásticas	ABS - Acrilonitrila butadieno estireno	t	EoL, Small Household Elec Equip. ABS with BFR, Substitution benefits included
		HIPS - Poliestireno de alto impacto	t	Waste polystyrene {BR} market for waste polystyrene APOS, S
		PE - Polietileno	t	EoL, Small Household Elec Equip. PE within wire, Substitution benefits included
		PP - Polipropileno	t	EoL, Small Household Elec Equip. PP with BFR, Substitution benefits included
		Outros - peças de PC (Policarbonato), PS (poliestireno) e blendas de PC-ABS.	t	EoL, Small Household Elec Equip. PS with BFR, Substitution benefits included EoL, Small Household Elec Equip. ABS-PC with BFR, Substitution benefits included Mixed plastics (waste treatment) {GLO} recycling of mixed plastics APOS, S
	Alumínio		t	EoL, Small Household Elec Equip. Aluminium, Substitution benefits included
	Bateria		t	Non-Fe-Co-metals, from Li-ion battery, hydrometallurgical processing {GLO} market for APOS, S
	Cobre		t	EoL, Small Household Elec Equip. Copper, Substitution benefits included
	Madeira		t	EoL, Small Household Elec Equip. Wood, Substitution benefits included
	Metal Ferroso	Aço carbono e Inox	t	EoL, Small Household Elec Equip. Steel, Substitution benefits included
	Papelão		t	Paper (waste treatment) {GLO} recycling of paper APOS, S
	PCI		t	EoL, Small Household Elec Equip. PCB Support, Substitution benefits included
	Vidro		t	EoL, Small Household Elec Equip. Glass, Substitution benefits included
	Outros Componentes	Partes não plásticas de mouse, teclado, câmeras, etc	t	Não contabilizado - inferior a 1%, componentes não específicos
Matéria Orgânica	Resíduos de sobra e preparo das refeições + jardinagem		t	Compost {RoW} treatment of biowaste, industrial composting APOS, S
Resíduos	Resíduos de banheiro + varrição		t	Municipal solid waste {RoW} treatment of, sanitary landfill APOS, S
Coprocessamento	Resíduos de banheiro + varrição		t	Municipal solid waste {RoW} treatment of, incineration APOS, S
Água	Consumo de água nas Centrais de Resíduos		Kg	Tap water {BR} market for tap water APOS, S
Energia Elétrica	Consumo de eletricidade nas Centrais de Resíduos		KWh	Electricity, low voltage {BR-South-eastern grid} market for electricity, low voltage APOS, S
GLP - Gás liquefeito de petróleo	Consumo de GLP nas Centrais de Resíduos		Kg	Liquefied petroleum gas {BR} market for liquefied petroleum gas APOS, S
Transporte	Transporte Externo das Centrais para a Destinação Final		t.km	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {BR} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 APOS, S

Fonte: Autoria Própria

A unidade t.km (tonelada-quilômetro) é usada para medir o transporte de cargas e representa o deslocamento de uma tonelada de material por um quilômetro de distância.

4.4 Avaliação de Impactos

A avaliação dos potenciais impactos ambientais foi conduzida utilizando o método *ReCiPe* 2016 *Midpoint* (H) v1.07, que representa a versão hierarquistada do *ReCiPe*. Vale destacar que a infraestrutura, como a construção de edificações, não foi considerada no modelo, de modo a manter o foco exclusivo nas operações e fluxos diretamente relacionados ao sistema de produto em análise.

A seleção das categorias de impacto é um passo fundamental na ACV, devendo ser justificada de forma coerente com os objetivos do estudo e contemplar um conjunto amplo e representativo das questões ambientais relevantes (ABNT, 2014b; EC-JRC, 2010). A abordagem adotada garante que as categorias escolhidas cubram os principais aspectos ambientais ligados às atividades do parque fabril estudado.

Dentre os indicadores mais frequentemente adotados nas avaliações de impacto, destacam-se a eutrofização da água, a acidificação terrestre, o potencial de aquecimento global e a formação de ozônio fotoquímico. Também se evidenciam como relevantes os indicadores relacionados ao uso e ocupação do solo, toxicidade humana, consumo de recursos e eficiência energética.

Nos estudos de Avaliação do Ciclo de Vida aplicados aos REEE, constata-se a utilização recorrente de um conjunto padrão de categorias de impacto. Essas categorias estão organizadas tanto no nível de ponto final — como danos à saúde humana, perda de biodiversidade e escassez de recursos — quanto no nível de ponto médio, como aquecimento global, acidificação, toxicidade humana, eutrofização e esgotamento de recursos.

As categorias de impacto analisadas neste estudo, no nível de ponto médio (*Midpoint*), estão listadas na Tabela 2, enquanto a Tabela 13, no Apêndice D, fornece um resumo dos impactos potenciais associados a cada categoria, conforme disponibilizados no método *ReCiPe* 2016.

Tabela 2 - Categorias de impacto, do método *ReCiPe* 2016, utilizadas no estudo de caso

Áreas de Proteção	Categoria de impacto	Fator de caracterização	Unidade de medida
Ecosistema	Depleção da camada de ozônio estratosférico	Potencial de destruição de ozônio	Kg CFC11 eq
Ecosistema	Acidificação terrestre	Potencial de acidificação terrestre	Kg SO2 eq
Ecosistema	Eutrofização de água doce	Potencial de eutrofização de água doce	Kg P eq
Ecosistema / Saúde Humana	Aquecimento Global	Potencial de aquecimento global (GWP)	Kg CO2 eq
Saúde Humana	Toxicidade humana, cancer	Potencial de toxicidade humana	kg 1,4-DCB
Recursos Naturais	Uso da terra	Potencial de ocupação de terras agrícolas	m2a crop eq

Fonte: Autoria Própria

4.5 Análises de Sensibilidade e Incerteza

A análise de sensibilidade consistiu em promover as alterações determinadas no item 4.2, rodar nova avaliação de impacto e realizar a análise comparativa do

desempenho ambiental de cada um dos seis cenários hipotéticos em relação ao cenário base (C5).

Posteriormente, os dados do inventário de ciclo de vida (ICV) foram inseridos no *software* SimaPro considerando as informações de qualidade e incerteza atribuídas por meio da Matriz Pedigree (Apêndice B).

Para garantir a robustez dos resultados, a análise de incerteza foi completada por meio da simulação de Monte Carlo, também no *software* SimaPro, com 1.000 iterações e intervalo de confiança de 95%, adotando a distribuição log-normal. Essa distribuição é adequada para representar variáveis positivas e assimétricas, comuns em inventários de ciclo de vida. A modelagem das incertezas foi baseada na definição do valor central (média geométrica) e da amplitude de variação, especificada no *software* como “2 dp” (dois desvios-padrão), intervalo usado para definir limites em torno da média. Para isso, foram utilizados os percentis 2,5% (mínimo) e 97,5% (máximo), que representam o intervalo de confiança de 95%. A partir desses valores, foi possível estimar o parâmetro “2 dp” necessário para a construção das barras de incerteza nos resultados de impacto ambiental gerados pela simulação em cada um dos cenários.

Conforme visto no item 4.2, a diferença entre os cenários considera desde a completa ausência de reciclagem (Cenário 1) nas duas unidades estudadas até a eliminação total, por parte das duas empresas, do envio de resíduos a aterros sanitários (Cenário 7). A comparação estatística foi conduzida de forma par a par entre os seguintes confrontos: (i) pior cenário (C1) versus cenário atual (C5), (ii) pior cenário (C1) versus melhor cenário (C7), e (iii) cenário atual (C5) versus melhor cenário (C7).

Os cenários intermediários (C2, C3, C4 e C6) representam variações incrementais ou alternativas intermediárias ao longo do espectro entre regressão (C1: 100% destinação para aterros sanitários) e progressão histórica (C7: 0% destinação para aterros sanitários). Embora sejam relevantes para ilustrar tendências e sensibilidades, esses cenários não constituem os extremos críticos que fundamentam a análise decisória. A seleção dos cenários C1, C5 e C7 para os testes estatísticos focou, portanto, nos pontos de inflexão estratégica: a situação de maior impacto ambiental negativo (C1), a situação operacional vigente (C5), e o cenário com maior desempenho ambiental projetado (C7). Essa abordagem é justificada tanto pela relevância gerencial quanto pela aderência à lógica de comparação entre referências

contrastantes, permitindo identificar com clareza os ganhos potenciais e as lacunas críticas de desempenho ambiental.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Contextualização das práticas de gestão de resíduos no parque fabril (Unidades Manufatura e Logística Reversa)

A Tabela 3 apresenta a distribuição relativa das quantidades de resíduos sólidos segregados nas Unidades 1 (Manufatura) e 2 (Logística Reversa), no período de 2015 a 2022.

Tabela 3 - Quantidade relativa dos resíduos separados nas Unidades 1 e 2 de 2015-2022

Unidades 1 e 2	Unidades	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Materiais Recicláveis	t/ano	0,86	0,87	0,93	0,91	0,93	0,95	0,94	0,93
Matéria Orgânica	t/ano	0,08	0,06	0,04	0,06	0,04	0,02	0,04	0,04
Outros Resíduos	t/ano	0,06	0,07	0,03	0,04	0,03	0,03	0,02	0,03

Fonte: Autoria Própria

Considerando a média per capita brasileira de geração anual de resíduos de 381 kg por / habitante por ano (ABREMA, 2022), os resíduos sólidos gerados pelas duas unidades somadas equivalem à geração de resíduos sólidos urbanos (domésticos + limpeza pública) de uma cidade de 11 mil (2020) a 20 mil habitantes (2017). Ao longo dos oito anos considerados foram manejadas mais de 45 mil toneladas de resíduos pelas duas centrais.

Em sequência, as Tabelas 4 e 5 detalham, as entradas de insumos (recursos naturais e energéticos) e as saídas de materiais (resíduos recicláveis, orgânicos e outros rejeitos), provenientes das Central de Resíduos das Unidade 1 – Manufatura e Unidade 2 – Logística Reversa, respectivamente. Evidenciando a evolução dos processos de separação, reaproveitamento e destinação dos diferentes materiais recicláveis ao longo dos anos.

Tabela 4 - Entradas de insumos e saídas de materiais da Central de Resíduos da Unidade 1 – Manufatura, durante o período de 2015 a 2022

Entradas									
Recursos	Unidade	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Água	Kg	69.257,50	133.307,50	136.345,00	156.937,50	158.500,00	140.477,50	110.280,00	136.419,17
Energia Elétrica	KWh	64.449,20	62.318,35	82.380,23	73.819,01	72.554,24	70.989,97	57.913,82	67.152,67
GLP	Kg	3.440,00	2.080,00	2.820,00	4.860,00	2.460,00	2.380,00	2.060,00	2.300,00
Saídas									
Recicláveis	Unidade	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
ABS	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
Alumínio	(%)	-	-	-	-	0,89	0,74	0,33	0,13
Bateria	(%)	-	-	-	-	-	0,16	0,05	-
Cobre	(%)	-	-	-	-	0,47	0,30	0,17	0,01
HIPS	(%)	-	-	-	-	0,13	0,58	0,16	0,00
Madeira	(%)	24,05	26,36	51,82	46,23	25,88	22,51	21,98	19,60
Metal Ferroso	(%)	1,87	4,32	2,57	2,36	4,20	4,20	5,23	2,69
Outros Componentes	(%)	-	-	-	-	0,07	0,10	0,01	-
Outros Plásticos	(%)	14,57	14,52	14,42	0,38	3,91	3,65	7,15	6,22
Papelão	(%)	59,51	54,80	31,19	51,03	63,94	64,98	55,58	64,03
PCI	(%)	-	-	-	-	0,12	0,26	0,60	0,27
PE	(%)	-	-	-	-	-	-	7,45	6,93
PP	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
Vidro	(%)	-	-	-	-	0,39	2,51	1,30	0,12
Total Recicláveis	t	1.651,39	3.268,58	3.533,23	1.881,26	3.574,86	2.529,48	2.934,84	2.644,95
Transporte Externo	t.Km	57.720,24	132.493,58	205.073,36	179.318,05	388.801,73	230.077,82	291.543,80	246.917,76
Matéria Orgânica	ton	470,28	340,30	274,90	319,09	290,95	109,31	177,86	192,71
Transporte Externo	t.Km	28.734,11	20.792,33	16.796,39	19.496,40	17.777,05	6.678,84	10.867,25	11.774,38
Outros Resíduos	ton	208,08	361,19	190,82	162,60	143,91	92,86	76,23	104,33
Transporte Externo	t.Km	8.323,20	14.447,60	7.632,80	6.504,00	5.756,40	3.714,40	3.049,20	4.173,33

Fonte: Autoria Própria

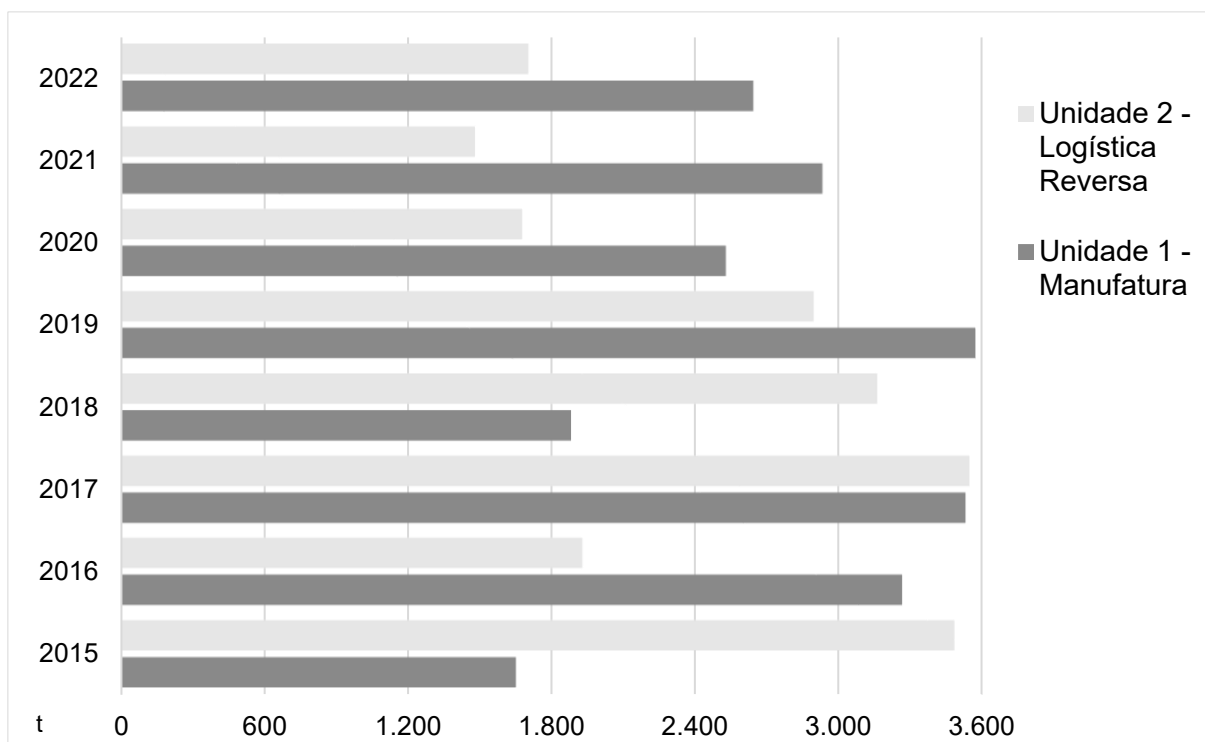
Tabela 5 - Entradas de insumos e saídas de materiais da Central de Resíduos da Unidade 2 – Logística Reversa, durante o período de 2015 a 2022

Entradas									
Recursos	Unidade	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Água	Kg	286.800,00	517.650,00	646.800,00	733.650,00	841.290,00	897.900,00	669.750,00	802.980,00
Energia Elétrica	KWh	226.430,10	219.343,56	239.621,85	254.043,00	321.690,45	229.893,96	271.637,85	274.407,72
GLP	Kg	1.100,80	665,60	902,40	1.555,20	776,98	764,40	411,77	651,05
Saídas									
Recicláveis	Unidade	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
ABS	(%)	3,71	5,42	6,01	7,12	20,35	9,49	7,63	7,99
Alumínio	(%)	0,91	2,43	2,06	0,62	0,74	1,09	0,58	0,24
Bateria	(%)	0,00	1,72	0,29	0,88	0,67	0,30	0,50	0,75
Cobre	(%)	1,45	3,19	1,06	1,72	2,08	2,12	1,85	2,36
HIPS	(%)	3,04	3,46	2,96	6,88	13,97	12,02	13,17	27,58
Madeira	(%)	13,38	8,74	1,68	2,88	3,34	5,43	8,22	3,69
Metal Ferroso	(%)	16,31	27,40	25,51	12,02	17,54	22,95	20,38	23,64
Outros Componentes	(%)	1,28	2,85	0,77	0,90	0,55	0,89	1,97	3,48
Outros Plásticos	(%)	12,16	9,51	4,88	6,75	17,62	15,93	11,98	9,93
Papelão	(%)	40,15	28,25	50,58	56,20	19,50	25,18	25,35	15,83
PCI	(%)	6,88	5,75	3,00	3,29	2,50	3,57	5,70	3,51
PE	(%)	0,03	0,02	0,06	0,07	0,03	-	0,01	-
PP	(%)	0,16	0,05	0,66	0,17	0,17	0,26	0,86	0,57
Vidro	(%)	0,54	1,21	0,48	0,51	0,95	0,79	1,78	0,44
Total Recicláveis	t	3.486,27	1.928,07	3.550,16	3.164,35	2.896,74	1.676,80	1.479,96	1.702,42
Transporte Externo	t.Km	532.691,66	152.081,59	678.312,60	692.516,40	1.350.018,99	239.707,38	141.463,50	154.508,24
Outros Resíduos	t	176,50	66,27	35,99	36,62	54,42	18,56	16,80	29,93
Transporte Externo	t.Km	7.060,00	2.650,80	1.439,60	1.464,80	2.176,80	742,40	672,00	1.197,09

Fonte: Autoria Própria

Através da Figura 9, pode-se observar o desempenho das Unidades 1 e 2 em relação à segregação e destinação de resíduos recicláveis ao longo do período de 2015 a 2022.

Figura 9 - Geração de Resíduos Recicláveis nas Unidades 1 e 2 de 2015 a 2022



Fonte: Autoria Própria

Durante o desenvolvimento da pesquisa, por meio de entrevistas e análise de dados fornecidos pelo parque fabril, foi possível verificar que, em 2015, a Unidade 2 apresentou um aumento expressivo na quantidade de resíduos recicláveis processados, registrando um crescimento de 90%. Esse volume se aproximou do pico máximo observado, alcançado em 2017.

No ano de 2016, observou-se uma queda acentuada na quantidade de resíduos beneficiados pela Unidade 2 – Logística Reversa. Essa redução, em torno de 50% em relação ao ano anterior, deveu-se principalmente à diminuição nos volumes de papelão e madeira processados. Em 2017, a Unidade 2 apresentou um aumento significativo no volume total de resíduos reciclados, impulsionado pela inclusão de novos materiais como cartuchos, suprimentos e caixas eletrônicos de bancos, resultado de parcerias estabelecidas com empresas do setor financeiro. Ainda em 2017, uma nova cooperação com fabricantes de impressoras possibilitou a recuperação de minérios presentes em placas eletrônicas, ampliando a diversidade de resíduos processados.

Durante o período da pandemia de COVID-19 (2020–2021), embora especialistas previssem um aumento no consumo e descarte de eletroeletrônicos, o comportamento variou conforme o nível de renda dos países. Nos países de baixa

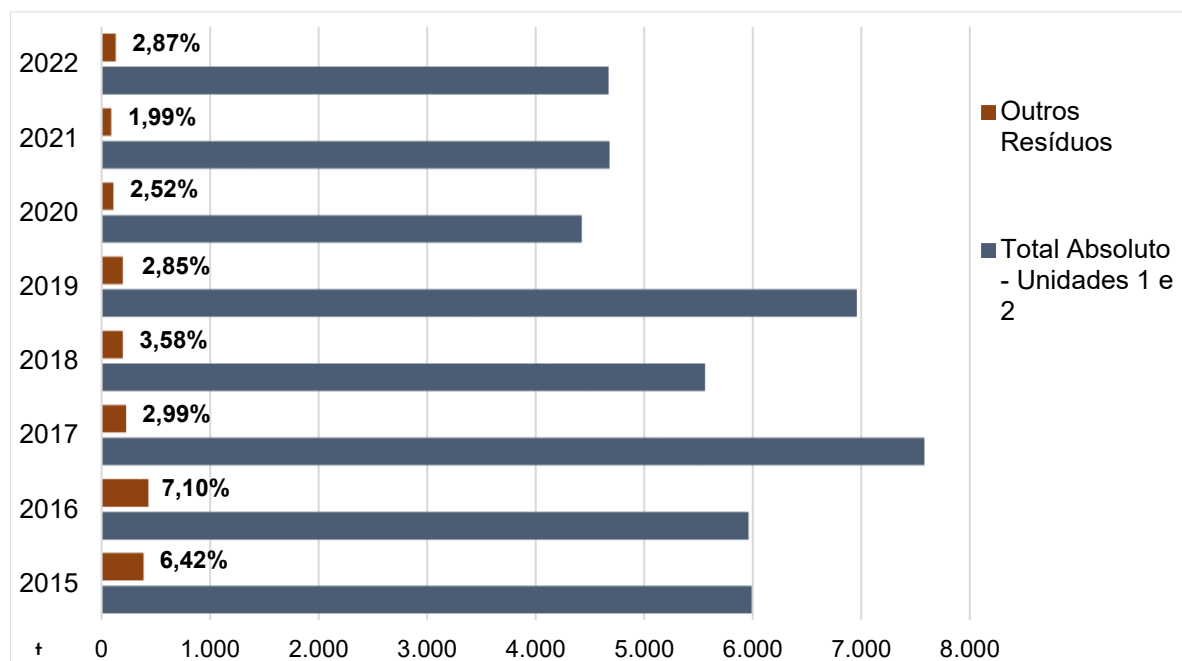
renda, o consumo caiu 30% nos três primeiros trimestres de 2020, em função do acesso limitado às tecnologias. Em contraste, a redução foi de apenas 5% nos países de alta renda. Esse cenário afetou diretamente as atividades da Unidade 2 de Logística Reversa, que enfrentou dificuldades na coleta de produtos pós-consumo destinados à desmontagem e reciclagem, especialmente durante os dois primeiros trimestres de 2020, devido à restrição de circulação de pessoas.

Em paralelo, a Unidade 1 – Manufatura participou de uma iniciativa coordenada pelo Ministério da Saúde para a produção de respiradores mecânicos utilizados em hospitais em resposta à pandemia. Esse novo produto somou-se à linha de produção existente, gerando resíduos adicionais vinculados ao seu processo de fabricação.

Os efeitos desses fatores refletem-se nos dados apresentados na Figura 9, com uma queda nas quantidades de resíduos manejados por ambas as unidades em 2020, quando comparado a 2019. Já em 2021, verifica-se um aumento na produção da Unidade 1, indicando retomada das atividades.

Quanto ao gerenciamento total dos resíduos sólidos – incluindo recicláveis, matéria orgânica e resíduos não aproveitáveis – a Figura 10 destaca os “Outros resíduos”, categoria destinada ao aterro. O percentual correspondente representa a taxa de aterramento praticada pelas unidades analisadas.

Figura 10 - Soma de todos os resíduos produzidos pelas duas unidades de 2015 a 2022 e a quantidade (absoluta e percentual) de “Outros Resíduos”, ou seja, a taxa de envio de resíduos para aterramento



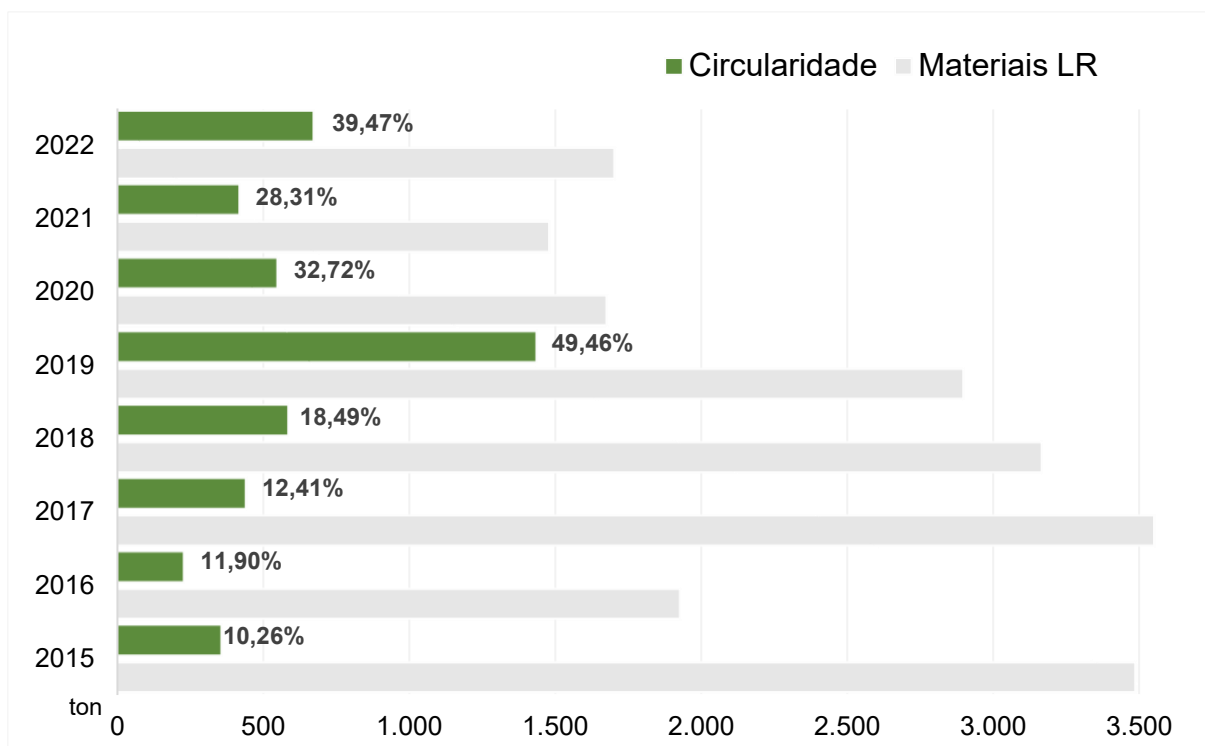
Fonte: Autoria Própria

A partir de 2017, observa-se uma redução significativa na taxa de envio de resíduos para aterro sanitário, estabilizando-se em torno de 3%, conforme mostrado na Figura 10. Tal desempenho evidencia que, mesmo antes da obtenção da certificação “Aterro Zero” (2018), já estavam em curso práticas sistemáticas de melhoria contínua na gestão de resíduos.

Ainda em 2018, a mudança no modelo de atendimento nos refeitórios corporativos — com a adoção de porções individuais — contribuiu para a redução do desperdício alimentar, impactando diretamente o volume de resíduos orgânicos destinados à compostagem.

Na Figura 11, nota-se uma evolução expressiva na Circularidade Interna ao longo do período analisado. Em 2019, o indicador atingiu 49,46%, resultado do aumento significativo na geração de plásticos recicláveis (ABS e HIPS) na Unidade 1, que foram reprocessados internamente pela Unidade 2. Tal desempenho coincide com o maior volume de resíduos recicláveis gerados no período analisado, conforme Figura 11, destacando 2019 como o ano de maior produtividade em termos de reaproveitamento interno de materiais.

Figura 11 - Circularidade interna: quantidade de resíduos da Unidade 1, em relação ao total, reciclada na Unidade 2 nos anos de 2015 a 2022



Fonte: Autoria Própria

Na etapa de desmontagem, realiza-se uma triagem detalhada dos materiais, promovendo a segregação com base em características específicas como cor, tipo, qualidade e fabricante. Essa classificação minuciosa permite agregar valor aos materiais segregados, ampliando as possibilidades de comercialização com margens mais elevadas, especialmente para clientes com exigências técnicas específicas. Um exemplo é o poliestireno de alto impacto (HIPS) que, quando não reciclado internamente na Unidade 2, é subdividido em até 14 categorias distintas, considerando variáveis como coloração e origem da resina.

A Tabela 6 apresenta a quantidade de tipos e variações de materiais recicláveis segregados nas centrais de resíduos das unidades analisadas em 2022. Na Unidade 1, foram identificados 24 tipos distintos, enquanto a Unidade 2 registrou 69 variações. Dentre esses, 14 tipos são comuns a ambas as unidades, totalizando 79 categorias de materiais recicláveis, das quais 57 correspondem exclusivamente a peças plásticas.

Esse elevado grau de detalhamento na separação, apesar de representar desafios operacionais quanto ao armazenamento e à logística interna, tem como principal motivação a agregação de valor. A classificação minuciosa permite que os materiais atendam a especificações técnicas exigidas por determinadas cadeias de reciclagem, possibilitando a comercialização a preços mais elevados,

Tabela 6 - Quantidade de tipos e variações de que cada material foi subdivido nas Unidades 1 e 2 estudadas em 2022

Materiais Recicláveis		Tipos e Variações		
		Unidade 1	Unidade 2	Comuns
Peças Plásticas	ABS	-	7	-
	HIPS	1	14	1
	PE	3	1	-
	PP	-	3	-
	Outros - peças de PC, PS e blendas de PC-ABS.	9	19	2
Alumínio		1	2	1
Bateria		2	3	2
Cobre		2	5	2
Madeira		1	1	1
Metal Ferroso	Aço carbono e Inox	1	1	1
Papelão		2	2	2
PCI		1	10	1
Vidro		1	1	1

Fonte: Autoria Própria

A partir de 2017, como parte de iniciativas voltadas à melhoria contínua, iniciou-se uma estratégia de racionalização dessa rede, priorizando a proximidade geográfica e a consolidação de volumes por parceiro. Em 2022, observou-se uma redução significativa no número de recicladores parceiros, que passou a ser de apenas 20, dos quais apenas um estava localizado fora de São Paulo, ver Tabela 7. Este parceiro específico atua em colaboração com as Unidades 1 e 2 em um projeto de inovação voltado à produção de embalagens sustentáveis de polpa moldada, utilizando papel reciclado como matéria-prima.

Ainda que essa reorganização da cadeia de reciclagem não tenha resultado em um aumento substancial na taxa de desvio de resíduos de aterro sanitário, os benefícios ambientais indiretos são notáveis. Entre eles, destaca-se a redução das emissões de dióxido de carbono (CO₂) associadas ao transporte de resíduos, em função da menor distância percorrida até o destino final.

Tabela 7 - Quantidade de parceiros recicladores diferentes das Unidades 1 e 2 ao longo do período em estudo

Estados	Parceiros Recicladores (2015-2021)	Parceiros Recicladores (2022)
Alagoas	1	-
Amazonas	1	-
Bahia	1	-
Minas Gerais	2	1
São Paulo	78	19

Fonte: Autoria Própria

A Tabela 7 apresenta a relação completa dos parceiros recicladores identificados entre 2015 e 2022, incluindo a distância em quilômetros (km) entre cada parceiro e o parque industrial, calculada com base nos respectivos Códigos de Endereçamento Postal (CEPs). Além disso, são contabilizados também a empresa responsável pelo encaminhamento dos resíduos para o aterro sanitário quanto o parceiro encarregado da compostagem.

A análise revela grande variação nas distâncias percorridas para destinação dos resíduos ao longo do período estudado. Foram identificados cinco parceiros localizados a menos de 10 km das unidades industriais, favorecendo a logística reversa de curto alcance. Em contrapartida, houve registros de rotas com distâncias superiores a 3.900 km, indicando fluxos logísticos complexos e intensivos em emissões de transporte.

No entanto, em 2022, observa-se uma concentração mais eficiente dos destinos. O parceiro mais distante nesse ano situava-se a 375 km, e dois parceiros estavam localizados a menos de 10 km das instalações, indicando uma consolidação da estratégia de regionalização dos fluxos de resíduos. Os nomes dos parceiros ativos em 2022 são destacados em negrito na Tabela 8, facilitando a identificação das mudanças promovidas na rede logística e sua correlação com a estratégia de redução de emissões.

Tabela 8 - Localização e distância dos parceiros de destinação de resíduos em relação ao parque industrial (2015–2022)

Parceiros	Estado	Distância (Km)
Parceiro - Reciclador 1	Alagoas	2.387,0
Parceiro - Reciclador 2	Amazonas	3.956,8
Parceiro - Reciclador 3	Bahia	2.000,3
Parceiro - Reciclador 4	Minas Gerais	375,4
Parceiro - Reciclador 5	Minas Gerais	332,7
Parceiro - Reciclador 6	São Paulo	8,6
Parceiro - Reciclador 7	São Paulo	15,8
Parceiro - Reciclador 8	São Paulo	100,2
Parceiro - Reciclador 9	São Paulo	109,6
Parceiro - Reciclador 10	São Paulo	63,0
Parceiro - Reciclador 11	São Paulo	129,9
Parceiro - Reciclador 12	São Paulo	165,5
Parceiro - Reciclador 13	São Paulo	471,9
Parceiro - Reciclador 14	São Paulo	73,4
Parceiro - Reciclador 15	São Paulo	100,1
Parceiro - Reciclador 16	São Paulo	111,8
Parceiro - Reciclador 17	São Paulo	139,1
Parceiro - Reciclador 18	São Paulo	72,9
Parceiro - Reciclador 19	São Paulo	32,3
Parceiro - Reciclador 20	São Paulo	66,8
Parceiro - Reciclador 21	São Paulo	84,1
Parceiro - Reciclador 22	São Paulo	90,4
Parceiro - Reciclador 23	São Paulo	74,1
Parceiro - Reciclador 24	São Paulo	103,5
Parceiro - Reciclador 25	São Paulo	73,8
Parceiro - Reciclador 26	São Paulo	32,1
Parceiro - Reciclador 27	São Paulo	219,0
Parceiro - Reciclador 28	São Paulo	93,0
Parceiro - Reciclador 29	São Paulo	150,6
Parceiro - Reciclador 30	São Paulo	119,5
Parceiro - Reciclador 31	São Paulo	87,2
Parceiro - Reciclador 32	São Paulo	148,7
Parceiro - Reciclador 33	São Paulo	36,3
Parceiro - Reciclador 34	São Paulo	81,9
Parceiro - Reciclador 35	São Paulo	8,4
Parceiro - Reciclador 36	São Paulo	147,7
Parceiro - Reciclador 37	São Paulo	157,3
Parceiro - Reciclador 38	São Paulo	97,1
Parceiro - Reciclador 39	São Paulo	31,7
Parceiro - Reciclador 40	São Paulo	84,1
Parceiro - Reciclador 41	São Paulo	110,2
Parceiro - Reciclador 42	São Paulo	105,3
Parceiro - Reciclador 43	São Paulo	118,8

Parceiros	Estado	Distância (Km)
Parceiro - Reciclador 44	São Paulo	114,8
Parceiro - Reciclador 45	São Paulo	98,4
Parceiro - Reciclador 46	São Paulo	71,6
Parceiro - Reciclador 47	São Paulo	52,9
Parceiro - Reciclador 48	São Paulo	94,1
Parceiro - Reciclador 49	São Paulo	65,2
Parceiro - Reciclador 50	São Paulo	132,3
Parceiro - Reciclador 51	São Paulo	6,1
Parceiro - Reciclador 52	São Paulo	55,5
Parceiro - Reciclador 53	São Paulo	73,2
Parceiro - Reciclador 54	São Paulo	113,4
Parceiro - Reciclador 55	São Paulo	99,0
Parceiro - Reciclador 56	São Paulo	71,8
Parceiro - Reciclador 57	São Paulo	106,8
Parceiro - Reciclador 58	São Paulo	80,1
Parceiro - Reciclador 59	São Paulo	70,0
Parceiro - Reciclador 60	São Paulo	6,5
Parceiro - Reciclador 61	São Paulo	6,5
Parceiro - Reciclador 62	São Paulo	34,8
Parceiro - Reciclador 63	São Paulo	36,0
Parceiro - Reciclador 64	São Paulo	11,4
Parceiro - Reciclador 65	São Paulo	100,2
Parceiro - Reciclador 66	São Paulo	22,2
Parceiro - Reciclador 67	São Paulo	82,5
Parceiro - Reciclador 68	São Paulo	52,7
Parceiro - Reciclador 69	São Paulo	72,7
Parceiro - Reciclador 70	São Paulo	105,6
Parceiro - Reciclador 71	São Paulo	175,1
Parceiro - Reciclador 72	São Paulo	15,8
Parceiro - Reciclador 73	São Paulo	92,4
Parceiro - Reciclador 74	São Paulo	60,5
Parceiro - Reciclador 75	São Paulo	138,8
Parceiro - Reciclador 76	São Paulo	148,2
Parceiro - Reciclador 77	São Paulo	94,7
Parceiro - Reciclador 78	São Paulo	138,4
Parceiro - Reciclador 79	São Paulo	72,3
Parceiro - Reciclador 80	São Paulo	110,4
Parceiro - Reciclador 81	São Paulo	180,3
Parceiro - Reciclador 82	São Paulo	123,5
Parceiro - Reciclador 83	São Paulo	73,6
Parceiro - Aterro Sanitário	São Paulo	40,00
Parceiro - Compostagem	São Paulo	61,10

Fonte: Autoria Própria

A Tabela 9 apresenta a quantidade de parceiros recicladores responsáveis pela aquisição de diferentes tipos de peças plásticas segregadas nas Unidades 1 e 2, no ano de 2022. No total, a empresa mantinha 20 parceiros ativos para comercialização dos materiais recicláveis, distribuídos conforme a especialização e capacidade de absorção de cada tipo de resíduo.

Observa-se uma considerável pulverização de parceiros para o material ABS, onde as quantidades de ABS não absorvidas pelo sistema de reciclagem da empresa, foi direcionado a nove diferentes recicladores.

É comum encontrar situações em que um mesmo parceiro lida com mais de um tipo de material ou alguns itens dentro de um mesmo material, aproveitando sua expertise específica. Esses detalhes evidenciam a complexidade do gerenciamento de resíduos, que demanda uma administração estruturada para ser eficaz. No entanto, os benefícios econômicos tendem a ser consideráveis com uma separação criteriosa seguida pela venda dos materiais.

Tabela 9 - Quantidade de parceiros recicladores por tipo de material das unidades estudadas, ano base 2022

Materiais Recicláveis		Parceiros Recicladores	
		Unidade 1	Unidade 2
Peças Plásticas	ABS	-	9
	HIPS	1	9
	PE	7	1
	PP	-	4
	Outros - peças de PC, PS e blendas de PC-ABS.	10	14
Alumínio		1	1
Bateria		1	1
Cobre		1	2
Madeira		3	3
Metal Ferroso	Aço carbono e Inox	3	3
Papelão		1	3
PCI		1	2
Vidro		1	1

Fonte: Autoria Própria

A comercialização de resíduos sólidos por meio de diversos parceiros implica em um nível significativamente maior de complexidade quando comparada à prática de destinar todos os materiais a um único comprador. Esta última estratégia é comumente adotada por empresas que, embora demonstrem interesse em obter

certificações ambientais, não dispõem da infraestrutura básica — como espaço físico, equipamentos adequados e equipe especializada — para realizar a triagem e a negociação com múltiplos recicladores.

Nesses casos, o parceiro único normalmente é uma empresa especializada em gestão de resíduos, responsável por executar a separação dos materiais em suas próprias instalações e/ou redirecioná-los a diferentes recicladores, assegurando a destinação ambientalmente adequada dos resíduos. A escolha entre essas duas abordagens está fortemente atrelada ao volume de resíduos gerados, bem como ao nível de comprometimento e investimento direcionado à estruturação de um sistema próprio de gestão.

Essa decisão estratégica impacta diretamente os resultados econômicos obtidos com a comercialização dos resíduos, podendo influenciar tanto na rentabilidade quanto na rastreabilidade e eficiência ambiental do processo.

Em atenção as quantidades de resíduos recicláveis anualmente estão demonstradas no Apêndice A - Geração material reciclável gerados no Parque Fabril (2015-2022), observa-se uma predominância do papelão, que representa aproximadamente 45% do total de resíduos comercializados, seguido pela madeira (18%) e pelos metais ferrosos (11%). Conforme mencionado anteriormente, o papelão tem como principal origem as embalagens das matérias-primas utilizadas nos processos produtivos da indústria. Em contrapartida, a maior parte da madeira é proveniente de pallets danificados, descartados após o uso logístico.

Cerca de 500 toneladas de plásticos são recicladas anualmente na Unidade 2, das quais aproximadamente 300 toneladas têm origem na Unidade 1 e outras 200 toneladas são resultantes do sistema de logística reversa de equipamentos eletroeletrônicos descartados.

Os metais ferrosos, por sua vez, são oriundos de componentes específicos dos equipamentos, tais como parafusos, molas, eixos e engrenagens.

5.2 Avaliação de Impactos no Ciclo de Vida (AICV)

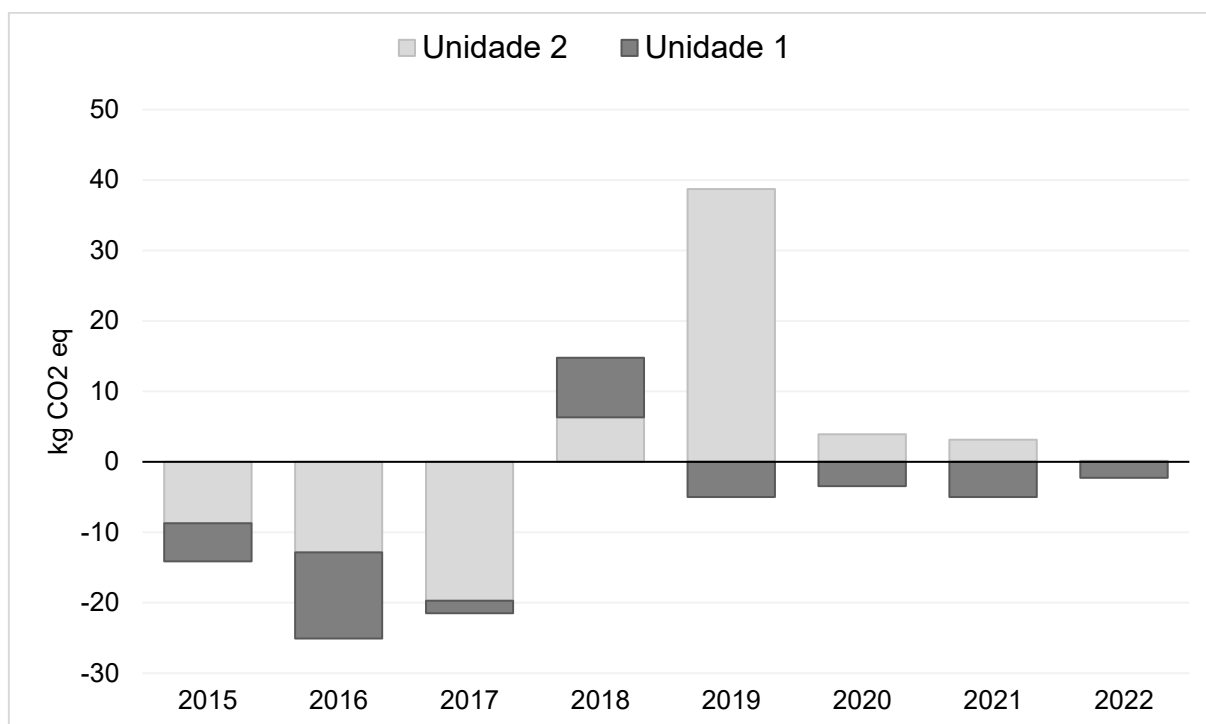
A seguir, realiza-se a análise dos impactos ambientais conforme as categorias consideradas: Aquecimento Global; Depleção da Camada de Ozônio Estratosférico,

Eutrofização da Água Doce; Toxicidade Humana Cancerígena; Acidificação Terrestre e Uso da Terra, no cenário atual (C5) do parque fabril, no período de 2015-2022.

5.2.1 Aquecimento Global

Na Figura 12, tem-se as contribuições da Unidade 1- Manufatura e da Unidade 2 - Logística Reversa para o impacto de Aquecimento Global (kg CO₂ eq) - 2015 a 2022.

Figura 12 – Contribuições das Unidades 1 e 2 de 2015 a 2022, para a categoria de impacto Aquecimento Global



Fonte: Autoria Própria

A análise dos processos que contribuem para a categoria de impacto Aquecimento Global evidenciada na Figura 12 mostra que, em 2015, balanço total de emissões resultou em -16,4 kg CO₂ eq. Obviamente as atividades das Unidades 1 e 2 geraram impactos associados ao aquecimento global nesse ano (principalmente pelo uso de energia/combustíveis), porém os benefícios ambientais suplantaram os impactos gerados em 16,4 kg CO₂ eq. Nesse caso, os processos de fim de vida de

equipamentos eletroeletrônicos, juntamente com a logística reversa realizados na Unidade 2 e o reaproveitamento de materiais pela Unidade 1 geraram benefícios ambientais pela substituição de materiais virgens por reciclados. Isto fez com que as duas unidades apresentassem um saldo em kg CO₂ eq. que permite afirmar que nesse ano, assim como em 2016 e 2017 onde a Figura mostra comportamento semelhante, as duas unidades reduziram emissões de gases de efeito estufa em uma escala global, reforçando o potencial da economia circular para reduzir impactos climáticos na fase pós-consumo.

Com base na análise dos processos que contribuem para a categoria de impacto Aquecimento Global, apresentada no Apêndice F – Tabela 26, observa-se que determinados materiais provenientes do fim de vida útil (*End of Life – EoL*) dos equipamentos eletroeletrônicos — especialmente aqueles contendo retardantes de chama bromados (BFR), como ABS, ABS-PC e PS — apresentam contribuições significativas em termos de emissões de CO₂ equivalente, mesmo quando considerados os benefícios de substituição.

Por exemplo, o processo “*ABS with BFR, Substitution benefits included*” contribui com 81,1 kg CO₂ eq (linha n°. 5 – Apêndice F – Tabela 26), enquanto “*Wood, Substitution benefits included*” apresenta um impacto ainda mais elevado, de 84,8 kg CO₂ eq (linha n°. 14 – Apêndice F – Tabela 26). Esse comportamento se torna particularmente evidente a partir de 2018, destacando-se em 2019, quando houve uma intensificação das atividades de reciclagem desses polímeros com BFR, principalmente ABS e ABS-PC, conforme indicado nas Tabelas 4 e 5. Em grande parte, à natureza dos processos de reciclagem empregados, que envolvem etapas de trituração, lavagem e extrusão, as quais demandam altas temperaturas e, conseqüentemente, elevado consumo de energia.

Dessa forma, embora a reciclagem evite a extração de matérias-primas virgens e promova benefícios ambientais, os processos necessários para viabilizá-la ainda representam uma fonte de emissões atmosféricas.

No caso da madeira, o elevado impacto pode ser atribuído não apenas à massa manejada pelas Unidades 1 e 2, mas também às condições logísticas envolvidas. Entre 2016 e 2019, um dos parceiros responsáveis pela reciclagem da madeira encontrava-se a aproximadamente 2.400 km da unidade fabril, em concordância com Mangmeechai (2022), onde no seu estudo relata que os principais fatores que afetam

os GEE do ciclo de vida são as distâncias de transporte (geração de resíduos – áreas de desmontagem).

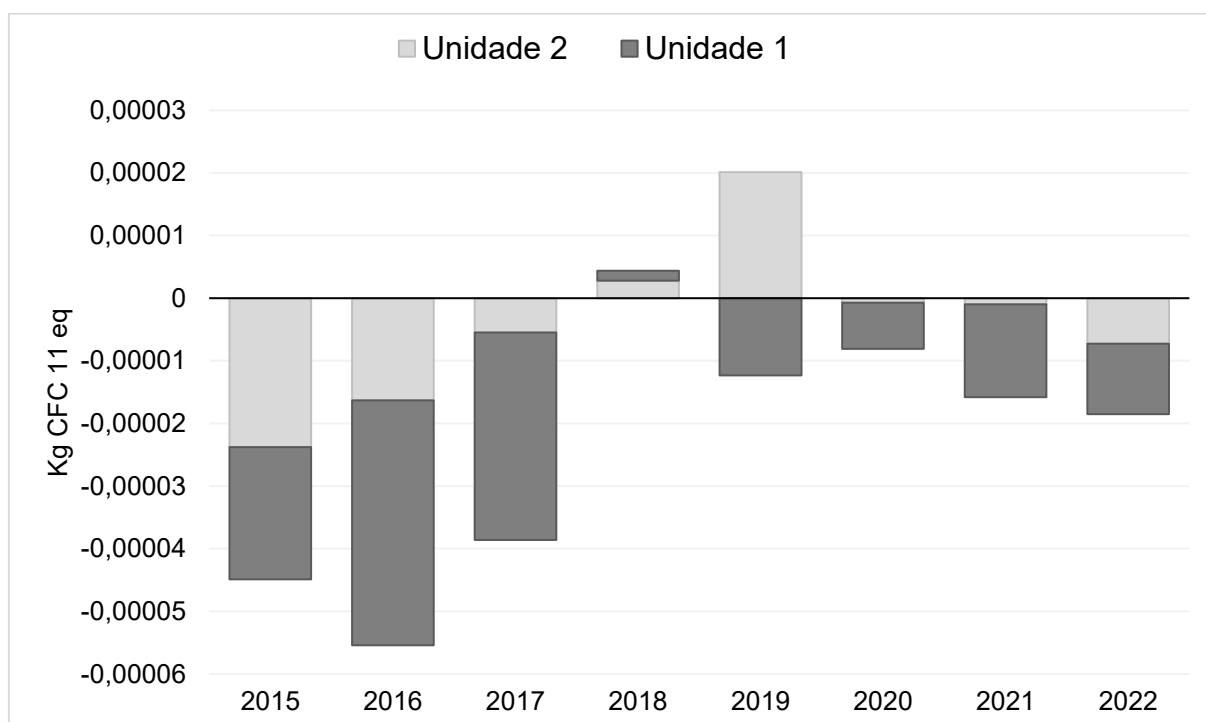
Arduin *et al.* (2016) em seu estudo, na primeira etapa - perfil Brasil, conclui que um cenário foi pior (maiores impactos) na categoria de aquecimento global, em função do consumo de energia e transportes necessários aos processos de reciclagem, ratificando os valores encontrados no presente estudo.

5.2.2 Depleção da Camada de Ozônio Estratosférico

A Figura 13, apresenta as contribuições da Unidade 1- Manufatura e da Unidade 2 - Logística Reversa para o impacto de Depleção da Camada de Ozônio Estratosférico (kg CFC11 eq) - 2015 a 2022.

Observa-se pela Figura que, à exceção dos anos de 2018 e 2019 (nesse último ano houve um expressivo aumento no material processado pela Unidade 2), em todos os outros anos o complexo industrial estudado apresentou benefícios ambientais em relação à Depleção da Camada de Ozônio.

Figura 13 – Contribuições das Unidades 1 e 2 de 2015 a 2022, para a categoria de impacto Depleção da Camada de Ozônio



Fonte: Autoria Própria

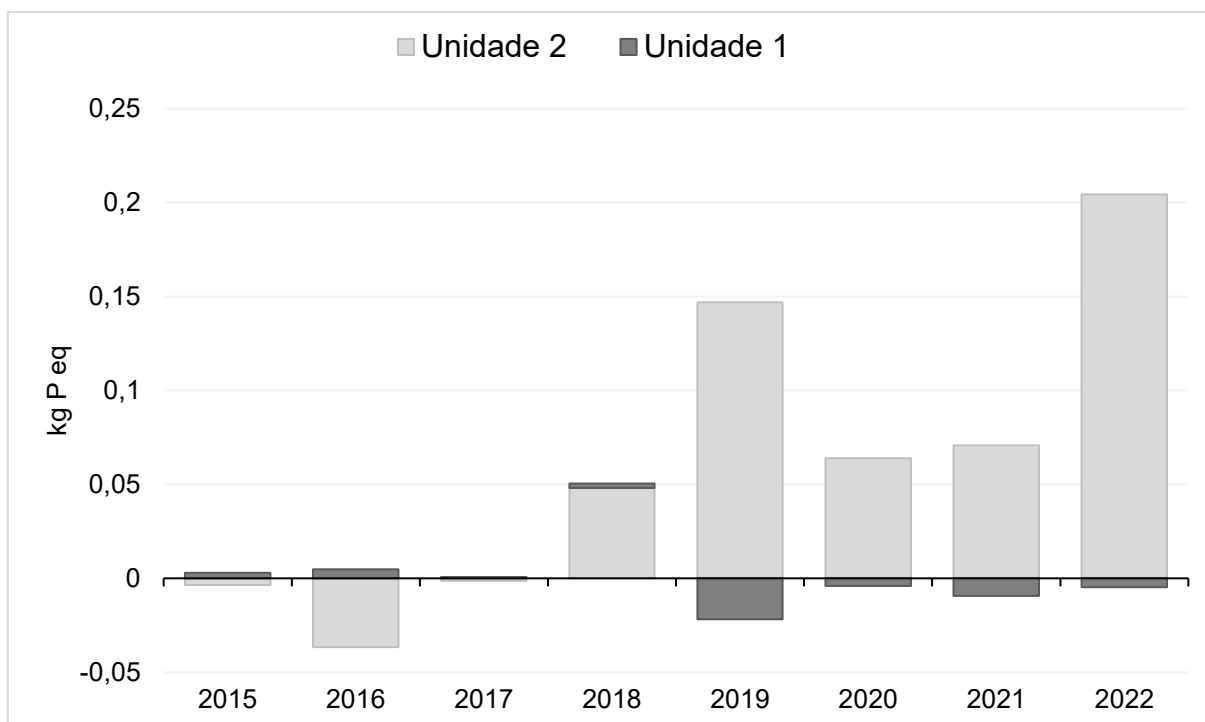
Ao analisar a planilha apresentada no Apêndice F – Tabela 27, verifica-se que os mesmos processos que apresentaram contribuição significativa para a categoria de impacto aquecimento global — especialmente aqueles associados ao fim de vida útil de materiais contendo retardantes de chama bromados (BFR), como ABS, ABS-PC e madeira — também foram responsáveis por impactos relevantes na categoria de depleção da camada de ozônio. Isso se deve, na sua maioria, à ocorrência de emissões de compostos halogenados durante etapas de tratamento térmico, como a extrusão, que envolvem temperaturas que podem volatilizar substâncias bromadas e cloradas presentes nos materiais.

Apesar das contribuições individuais elevadas de certos materiais — como ABS com BFR, ABS-PC com BFR e madeira — para a categoria de impacto depleção da camada de ozônio, o resultado global revela um impacto negativo total de -0,00017 kg CFC11 eq (Apêndice F – Tabela 27, segunda linha - “*Total of all processes*”). Esse valor sugere que os benefícios associados à substituição de matérias-primas virgens por reciclados superaram os impactos negativos diretos gerados pelos processos de reciclagem.

5.2.3 Eutrofização da Água Doce

A Figura 14 apresenta os impactos da categoria Eutrofização da Água Doce (kg P eq) no período estudado.

Figura 14 – Contribuições das Unidades 1 e 2 de 2015 a 2022, para a categoria de impacto Eutrofização da Água Doce



Fonte: Autoria Própria

A Figura 14 mostra a evolução anual do impacto ambiental na categoria de eutrofização da água doce (kg P eq) para duas unidades de um parque fabril de eletroeletrônicos: Unidade 1 (Manufatura) e Unidade 2 (Logística Reversa), no período de 2015 a 2022. Dois picos de impacto se destacam nos anos de 2019 e 2022, ambos atribuídos exclusivamente à Unidade 2. Esses aumentos são diretamente associados ao tratamento de resíduos de poliestireno de alto impacto (HIPS), conforme evidenciado na tabela detalhada de processos (ver Apêndice F – Tabela 28 – última linha).

O processo modelado para o descarte do HIPS — *"Waste polystyrene {BR}| market for waste polystyrene | APOS, S"* — representa uma mistura de tecnologias de disposição final ambientalmente ineficientes (aterros, lixões). Essa escolha foi considerada a mais adequada dentre os dados disponíveis por sua coerência com a realidade brasileira de gestão de resíduos plásticos e sua compatibilidade com os materiais poliméricos do grupo do HIPS.

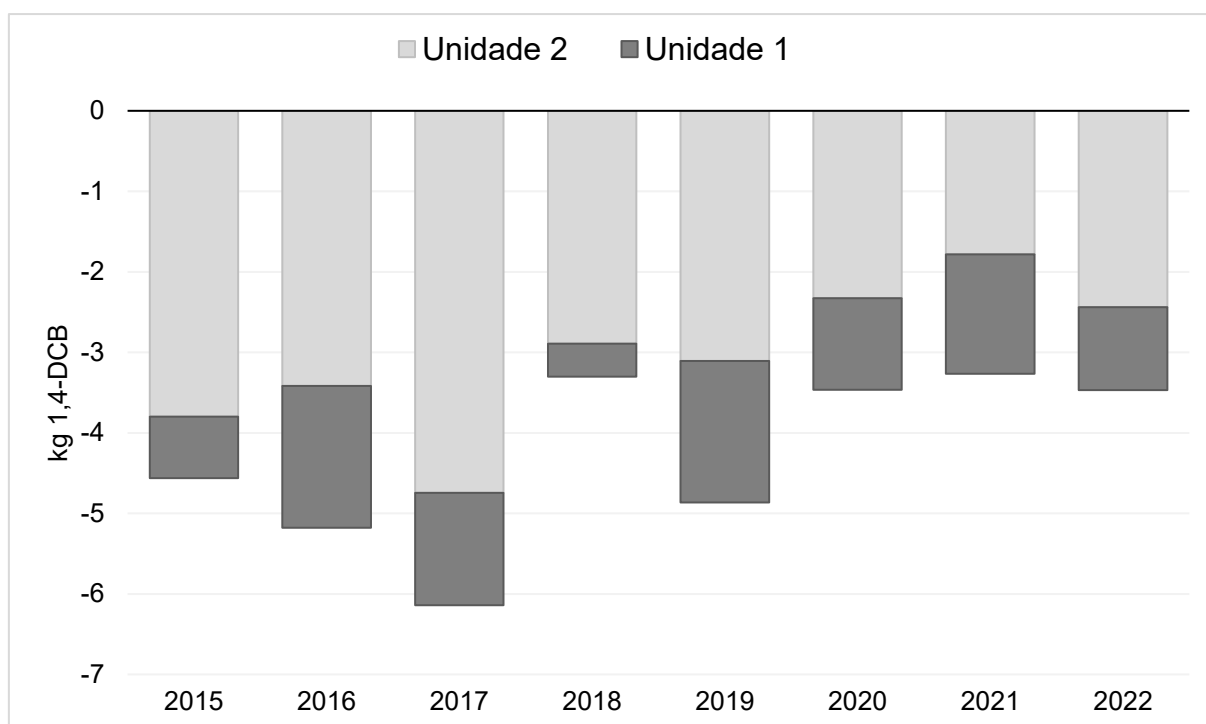
A participação elevada de tecnologias de disposição sem controle de lixiviados ou gases gera potenciais emissões de nutrientes (como fósforo e nitrogênio), contribuindo significativamente para a eutrofização da água doce. Isso se reflete especialmente no ano de 2022, quando a Unidade 2 registrou o maior impacto do período analisado, superando 0,2 kg P eq.

Em contraste, a Unidade 1 (Manufatura) apresentou impactos negativos em 2019, indicando créditos ambientais por reciclagem de metais — especialmente cobre e materiais ferrosos — que evitam a extração e processamento de matérias-primas virgens. Esses processos são intensivos em recursos e geradores de efluentes ricos em nutrientes, cuja substituição favorece a redução da eutrofização.

5.2.4 Toxicidade Humana Cancerígena

A Figura 15 apresenta os impactos da categoria Toxicidade Humana, com efeito cancerígeno, no período estudado.

Figura 15 – Contribuições das Unidades 1 e 2 de 2015 a 2022, para a categoria de impacto Toxicidade Humana Cancerígena



Fonte: Autoria Própria

Conforme ilustrado na Figura 15 e detalhado na Tabela 29 (Apêndice F), a categoria de impacto Toxicidade Humana – efeitos cancerígenos (kg 1,4-DCB eq) apresentou valores negativos (impactos evitados) durante todo o período analisado

(2015–2022), tanto para a Unidade 1 – Manufatura quanto para a Unidade 2 – Logística Reversa.

Os resultados apresentam um valor total mais significativo da Unidade 2 em relação a Unidade 1, sobretudo nos primeiros anos, com uma média anual de cerca de -4,0 kg 1,4-DCB eq (segunda linha – “*Total of all processes*”), enquanto a Unidade 1 contribuiu em menor magnitude, com valores entre -0,5 e -2,0 kg 1,4-DCB eq ao ano (segunda linha – “*Total of all processes*”).

Essa contribuição positiva está associada aos créditos ambientais da reciclagem de metais ferrosos e não ferrosos, com destaque para o cobre e o aço, que, quando reciclados, evitam os danos ambientais associados à produção primária desses materiais. O processo de reciclagem substitui etapas de alto impacto como extração mineral, trituração, flotação, fundição e refino eletrolítico, especialmente no caso do cobre, cuja produção primária a partir de minérios como calcopirita é intensiva em energia e em insumos químicos potencialmente tóxicos.

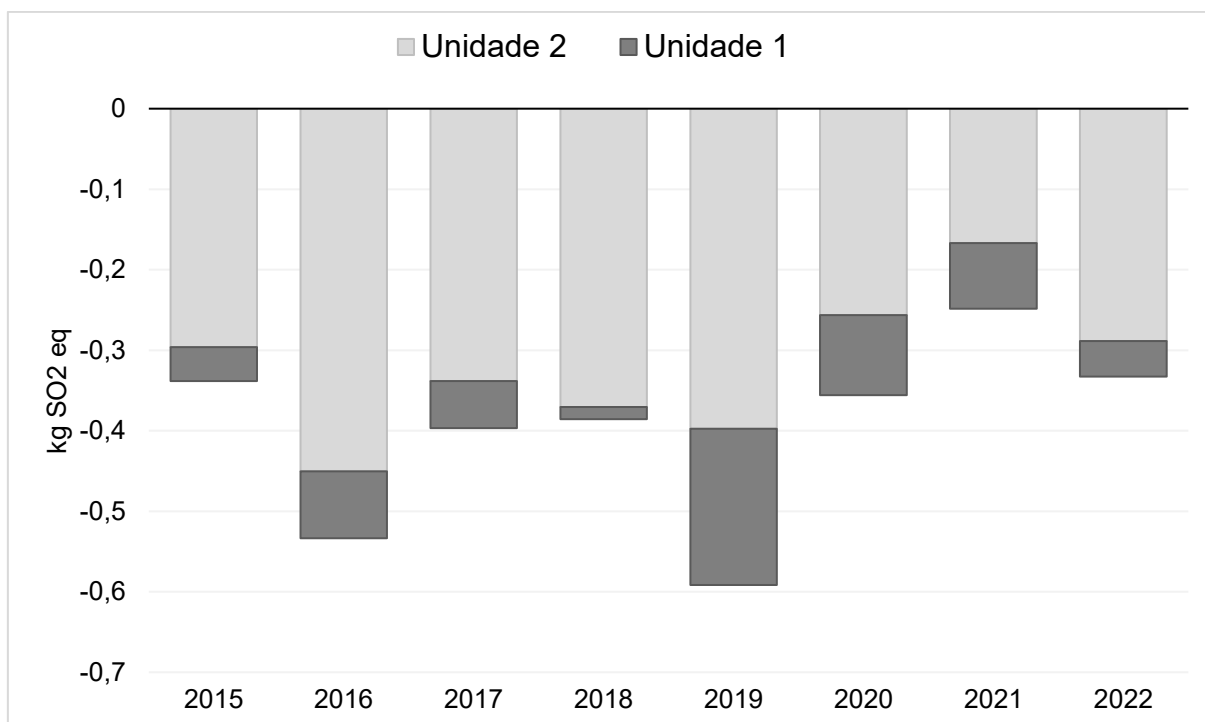
O refino do cobre, por exemplo, envolve o uso de ácidos fortes e eletrólitos, gerando emissões atmosféricas de arsênio, mercúrio, chumbo e outros metais pesados, além do potencial de contaminação de águas superficiais e subterrâneas, devido a efluentes contendo sulfetos, metais solúveis e compostos orgânicos complexos. Tais poluentes representam riscos à saúde humana por via hídrica e alimentar.

Ainda que certos materiais presentes nos REEE, como plásticos com retardantes de chama bromados (por exemplo, ABS com BFR) e placas de circuito impresso (PCIs), apresentem impactos positivos (contribuições negativas para o meio ambiente) nessa categoria, essas contribuições foram amplamente superadas pelos benefícios ambientais da reciclagem dos metais.

5.2.5 Acidificação Terrestre

A Figura 16 apresenta os impactos da categoria Acidificação Terrestre, no período estudado.

Figura 16 - Contribuições das Unidades 1 e 2 de 2015 a 2022, para a categoria de impacto Acidificação Terrestre



Fonte: Autoria Própria

A Figura 16 e a Tabela 30 – Apêndice F demonstram que, entre os anos de 2015 e 2022, a categoria de impacto Acidificação Terrestre apresentou consistentemente valores negativos, indicando impactos evitados nas duas unidades operacionais analisadas: Unidade 1 – Manufatura e Unidade 2 – Logística Reversa.

Esse padrão se alinha à tendência já observada na categoria Toxicidade Humana Cancerígena. A análise dos processos individuais (ver Tabela 30) destaca que os principais vetores de impacto evitado foram a reciclagem de metais ferrosos e não ferrosos, em especial aço e cobre, cujas rotas de substituição evitam etapas altamente poluentes dos processos primários — como fundição, flotação e refino eletrolítico — frequentemente associados à liberação de gases acidificantes (SO_2 , NO_x) e à degradação ambiental em áreas de mineração.

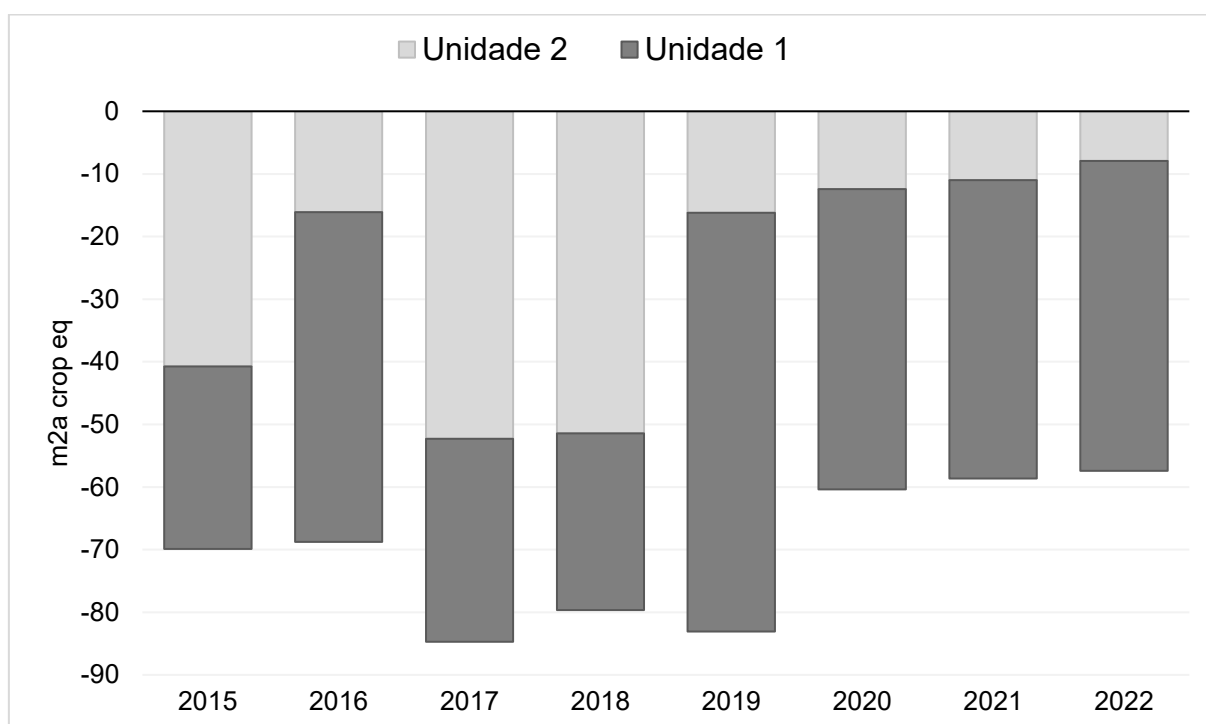
Por outro lado, alguns fluxos específicos apresentaram contribuições positivas, ou seja, aumentaram o potencial de acidificação. Destacam-se os impactos associados ao tratamento de placas de circuito impresso (PCIs) e de plásticos com retardantes de chama bromados (como ABS com BFR), cujos resíduos exigem processos termo físico-químicos com elevada emissão de gases acidificantes.

Ainda assim, os créditos ambientais associados à reciclagem de cobre e aço foram suficientes para compensar os efeitos adversos desses materiais problemáticos, assegurando um saldo líquido de impacto evitado na categoria.

5.2.6 Uso da Terra

A Figura 17 apresenta os impactos da categoria Uso da Terra, no período estudado.

Figura 17 - Contribuições das Unidades 1 e 2 de 2015 a 2022, para a categoria de impacto Uso da Terra



Fonte: Autoria Própria

A categoria de impacto relacionada ao uso da terra apresentou, no período de 2015 a 2022, uma tendência consistente de impactos evitados nas duas unidades analisadas — Unidade 1 (Manufatura) e Unidade 2 (Logística Reversa) — conforme ilustrado na Figura 17.

Embora ambas as unidades tenham contribuído positivamente para o resultado agregado, observa-se uma predominância relativa da Unidade 1 na totalidade dos impactos evitados ao longo do tempo. Esse comportamento contrasta com o verificado em outras categorias de impacto, como toxicidade humana – efeito cancerígeno e

acidificação terrestre (ver Seções 5.2.4 e 5.2.5), nas quais a Unidade 2 apresentou maior relevância em termos de contribuição ambiental.

A partir de 2019, intensifica-se a participação da Unidade 1 na mitigação dos impactos relacionados ao uso da terra, com valores médios anuais próximos de -50 m²a crop eq. Esse aumento está associado à implementação de um projeto de inovação voltado à produção de embalagens sustentáveis de polpa moldada, desenvolvido em parceria com as Unidades 1 e 2.

A principal contribuição negativa nesta categoria está associada à reciclagem, especialmente papel e papelão, que substituem a necessidade de produção de polpa de celulose virgem, processo altamente intensivo em uso de solo florestal. A substituição desse insumo é realizada predominantemente via resíduos da cadeia reversa de madeira e papel, como indicado no Apêndice F – Tabela 31. Essa substituição representa mais de 99% da contribuição negativa total da categoria, sendo identificada como o principal vetor de impacto evitado.

Adicionalmente, observou-se uma contribuição positiva, ainda que menos expressiva, proveniente da reciclagem de metais como aço e cobre. A recuperação desses materiais a partir de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (*End-of-Life* – *EoL*) evita processos extrativos primários — como mineração a céu aberto e subterrânea — que envolvem elevados impactos ambientais, incluindo a supressão de vegetação nativa e a utilização de grandes áreas para disposição de estéreis e rejeitos.

A produção de cobre primário é um processo altamente complexo, oneroso e ambientalmente intensivo, que exige múltiplas etapas com elevado consumo de recursos naturais e energia. Assim, mesmo em volumes relativamente modestos, a reciclagem desse metal proporciona ganhos ambientais substanciais, tanto pela redução do uso territorial indireto quanto pela mitigação de impactos ambientais correlatos. Como destacado por Jaunich et al. (2020), os benefícios ambientais associados ao uso de materiais reciclados superam os impactos gerados durante seu transporte e reprocessamento. Essa tendência também foi confirmada nesse estudo: embora alguns materiais específicos apresentem maiores impactos ambientais, o resultado final dos processos aponta para uma contribuição positiva, com emissões evitadas predominando sobre as geradas.

No estudo de Campolina (2015), foi identificado um decréscimo significativo nas emissões de CO₂ com a reciclagem de plásticos provenientes de equipamentos eletroeletrônicos — 87% no caso do ABS e 84% para o HIPS. Nesse trabalho, como esses dois materiais plásticos estão entre os mais representativos em termos de quantidades (toneladas), a presença de uma simbiose industrial envolvendo sua reciclagem reforça ainda mais a importância da circularidade e o potencial de redução de impactos ambientais.

De uma maneira geral, os resultados mostram que a reciclagem de metais (alumínio, cobre, prata), apresentam impactos evitados em todas as seis categorias estudadas, assim como observado por Ghisellini, Passaro e Ulgiati (2023) e Arduin *et al.* (2016).

Para Rocha (2020), os resultados possibilitaram identificar que aproximadamente 80% de todos os benefícios ambientais da logística reversa estão associados às categorias de uso de recursos-minerais e metais, toxicidade humana – efeito cancerígeno e não cancerígeno, acidificação e aquecimento global. No presente estudo, temos benefícios ambientais (impactos evitados) em 5 cinco categorias de impacto, somente na categoria eutrofização da água doce, ocorreu impacto positivo ambiental, considerando o total de processos.

5.3 Análises de Sensibilidade e Incerteza

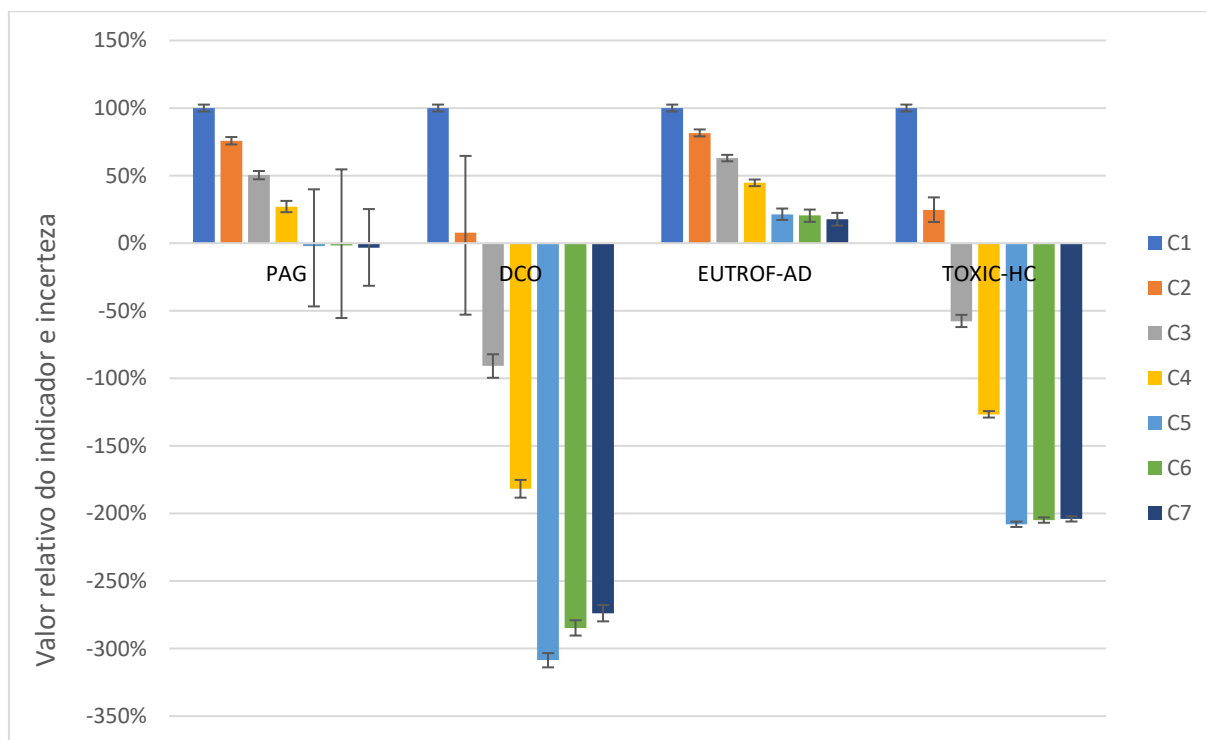
A Figura 18 apresenta as análises de sensibilidade (colunas coloridas) e incertezas (barras de erro) das categorias de impactos: Aquecimento Global, Depleção da Camada de Ozônio, Eutrofização da Água Doce e Toxicidade Humana – efeito cancerígeno para as unidades 1 e 2 conjuntamente.

O eixo vertical mostra os valores relativos dos indicadores, sendo que valores positivos (acima de 0%) indicam impactos gerados, enquanto os valores negativos (abaixo de 0%) representam impactos evitados. As colunas coloridas representam os valores obtidos na análise de sensibilidade, e as barras de erro associadas indicam o grau de incerteza dos resultados.

De forma geral, observa-se que o cenário 1 (C1) apresenta impactos ambientais mais elevados em todas as categorias, com colunas posicionadas na escala positiva, acima de 90%, evidenciando uma situação de maior impacto ambiental.

À medida que os cenários se tornam mais circulares — especialmente a partir de C5 até C7, que incorporam reciclagem e desvio de resíduos de aterros — verifica-se uma mudança significativa. Em algumas categorias, como para Depleção da Camada de Ozônio e Toxicidade Humana – efeito cancerígeno, os cenários mais avançados (C5, C6 e C7) apresentam valores expressivamente negativos, chegando a ultrapassar -300%, o que indica que os benefícios ambientais superaram com folga os impactos gerados.

Figura 18 - Análises de Sensibilidade e Incertezas dos valores relativos dos cenários propostos nas categorias Aquecimento Global (PAG), Eutrofização da Água Doce (EUTROF-AD), Toxicidade Humana (TOXIC-HC) e Depleção da Camada de Ozônio (DCO) para as unidades 1 e 2



Fonte: Autoria Própria

Em atenção as barras de erro, quanto mais amplas sinalizam maior incerteza nos resultados, o que exige cautela na interpretação e reforça a importância da qualidade dos dados utilizados.

Apesar de os cenários C5 a C7 apresentarem maiores barras de erro na categoria de impacto Aquecimento Global, indicando uma maior incerteza nos

resultados médios obtidos, a análise estatística realizada por meio do teste de hipótese com 1.000 amostragens da simulação de Monte Carlo (com 95% de confiança), conforme a Tabela 10, indica que C5 teve impactos maiores em 95,9% das simulações, demonstrando que, embora haja uma leve sobreposição nas incertezas, ainda é possível distinguir estatisticamente entre os dois cenários.

A comparação estatística entre os cenários não foi conduzida de forma exaustiva entre todos os pares possíveis, sendo priorizados apenas os confrontos entre o pior cenário (C1), o cenário atual (C5) e o melhor cenário (C7). Essa escolha metodológica está alinhada ao objetivo central deste estudo de caso.

A não inclusão dos demais cenários em testes estatísticos não compromete a robustez da análise, uma vez que os mesmos foram considerados em análises descritivas e qualitativas de apoio à interpretação geral dos resultados, ver itens 4.2 e 4.5.

Para efeito de comparação entre os valores relativos dos cenários, adotou-se o cenário 1 (C1) como referência, por apresentar os piores resultados em todas as categorias de impacto analisadas. As demais categorias foram expressas em relação percentual a esse cenário.

As categorias de impacto Acidificação Terrestre e Uso da Terra não foram plotadas devido às elevadas discrepâncias de valores (escalas) em relação ao cenário de referência, o que poderia distorcer a leitura gráfica dos demais resultados.

A Tabela 10 sumariza a análise comparativa de incerteza estatística do desempenho ambiental entre os cenários C1, C5 e C7. Os valores expressam a probabilidade, estimada pela simulação de Monte Carlo (1.000 iterações, 95% de intervalo de confiança), de um cenário apresentar impacto ambiental superior (pior desempenho) a outro.

Tabela 10 - Teste de hipótese estatística para comparação de cenários nas categorias avaliadas, usando 1.000 espaço amostral da simulação de Monte Carlo com intervalo de confiança de 95%

Categoria de Impacto	C1 > C5	C1 > C7	C5 > C7
	%		
Aquecimento Global	100	100	95,9
Depleção da Camada de Ozônio	100	100	0
Eutrofização da Água Doce	100	100	100
Toxicidade Humana Cancerígena	100	100	10,2
Acidificação Terrestre	100	100	50,8
Uso da Terra	100	100	49,6

Fonte: Autoria Própria

C5 – cenário real; C1 e C7- cenários propostos

Resultados estatisticamente confiáveis ($p < 0,05$) indicaram C1 como o cenário de maior impacto ambiental em todas as categorias analisadas (100% das simulações nas comparações com C5 e C7). Nas categorias Aquecimento Global e Eutrofização da Água Doce, a hierarquia de impacto $C1 > C5 > C7$ foi confirmada ($C5 > C7$ em 95,9% e 100% das simulações, respectivamente para Aquecimento Global e Eutrofização de Água Doce). Na categoria Aquecimento Global, C5 teve mais impacto que C7 na maioria dos casos, mas com alguma sobreposição de incerteza (aprox. 4,1%).

Para Depleção da Camada de Ozônio, a ordem foi $C1 > C7 > C5$ ($C5 > C7$ em 0% das simulações, indicando C5 com menor impacto que C7).

Em contrapartida, para Toxicidade Humana – efeitos cancerígenos, Acidificação Terrestre e Uso da Terra, embora C1 permanecesse como o pior cenário, a distinção entre C5 e C7 não atingiu significância estatística ($C5 > C7$ em 10,2%, 50,8% e 49,6% das simulações, respectivamente).

Conclusivamente, é possível afirmar que C1 é consistentemente o cenário de pior desempenho em todas as categorias avaliadas. Já o cenário C7 apresenta vantagens sobre C5 em Aquecimento Global e Eutrofização, enquanto C5 é preferível a C7 em Depleção da Camada de Ozônio. A ausência de distinção clara entre C5 e C7 em outras categorias (Toxicidade Humana, Acidificação Terrestre e Uso da Terra) sublinha a importância da análise de incerteza para a validade das conclusões em ACV. Os resultados gerais então mostram que, embora possa não ser considerado o ideal, o Cenário atual (5) tem bastante vantagens em termos de impactos ambientais. Isso sugere que novos investimentos para atingir um cenário mais circular ainda

devem ser pensados com cautela pois, enquanto levam à melhora de alguns impactos, podem levar à piora de outros.

6. CONCLUSÕES

Esta tese demonstrou que a gestão integrada de resíduos sólidos industriais, estruturada a partir dos princípios da economia circular, tem potencial para reduzir impactos ambientais relevantes em parques fabris do setor eletroeletrônico. Ao analisar o gerenciamento de mais de 45 mil toneladas de resíduos sólidos de 2015 a 2022 em duas unidades operacionais — manufatura e logística reversa — comprovou que a articulação entre elas pode favorecer estratégias de reaproveitamento de materiais, desvio de resíduos de aterros e redução de emissões associadas ao transporte.

A circularidade interna — caracterizada pela reciclagem de componentes plásticos da Unidade 1 pela Unidade 2, com posterior retorno desses materiais como matéria-prima para a própria Unidade 1 ou para parceiros — atingiu seu ponto mais alto em 2019, com um índice de 49,5%.

Ao longo da pesquisa, observou-se que o desempenho ambiental está condicionado não apenas ao tipo de material reciclado, mas também à infraestrutura logística, à rede de parceiros e ao grau de especialização dos processos de triagem e, conseqüentemente, de reciclagem. Por exemplo, a multiplicidade de categorias de materiais segregados, em 2022, foi de 79 categorias de materiais recicláveis em ambas as unidades, das quais 57 correspondem somente a peças plásticas.

Pode-se destacar que os esforços de regionalização, com a racionalização do número de recicladores, passando de uma rede extensa para apenas 20 recicladores ativos até 2022, com 90% deles localizados no estado de São Paulo, reduziram significativamente as distâncias de transporte, com o parceiro mais distante localizado a apenas 375 km do parque fabril (em contraste com mais de 3.900 km em anos anteriores), contribuindo para menores emissões no transporte — particularmente visíveis nas categorias de Aquecimento Global e Depleção da Camada de Ozônio.

Das seis categorias de impacto ambiental analisadas (Aquecimento Global, Depleção da Camada de Ozônio Estratosférico, Eutrofização da Água Doce, Toxicidade Humana – efeito cancerígeno, Acidificação Terrestre e Uso da Terra), cinco (exceto a categoria Depleção da Camada de Ozônio) apresentaram resultados com impactos evitados (valores negativos), o que demonstra que, mesmo com os efeitos ambientais associados à reciclagem de certos materiais — como os plásticos,

que exigem mais energia e podem gerar emissões durante o processamento —, os benefícios provenientes da reciclagem de metais ferrosos e não ferrosos, assim como da compostagem, foram suficientes para superar esses impactos e garantir um saldo ambiental positivo.

Foram idealizados 6 cenários (análise de sensibilidade) para comparar ambientalmente com o cenário real (C5), que reflete as práticas efetivamente adotadas pela empresa (91% de reciclagem, 5% de compostagem e 4% de destinação a aterro). A análise estatística com simulação de Monte Carlo (1.000 amostragens com 95% de confiança) confirmou a superioridade ambiental dos modelos circulares (C5 a C7). O cenário C1 – 100% destinação para aterro sanitário foi consistentemente o de maior impacto em 100% das simulações em todas as categorias. Na comparação entre C5 (atual) e C7 (0% envio para aterro), o C7 apresentou melhor desempenho em Aquecimento Global e Eutrofização da Água Doce, enquanto o C5 teve menor impacto em Depleção da Camada de Ozônio. Nas demais categorias, não houve diferenças estatisticamente significativas, indicando que o modelo atual já se encontra em um patamar maduro de desempenho ambiental.

Ao reunir dados empíricos, indicadores consistentes e diretrizes aplicáveis, a tese contribui de forma prática para o avanço do conhecimento sobre a gestão sustentável de resíduos sólidos industriais no Brasil e em contextos produtivos semelhantes.

7. SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Com o objetivo de expandir e complementar os resultados desta pesquisa, propõe-se a realização de estudos futuros que possam explorar novas dimensões e aprofundar a compreensão dos impactos ambientais, econômicos e sociais associados ao gerenciamento de resíduos sólidos industriais. Algumas sugestões para futuras linhas de pesquisa incluem:

- Estudos sobre ACV Ambiental com foco em não geração e redução de resíduos: Investigar estratégias que priorizem a não geração de resíduos e a redução na fonte como alternativas sustentáveis, além de explorar os desafios associados à implementação dessas práticas dentro do contexto industrial, promovendo uma abordagem mais preventiva e menos dependente de processos de tratamento e destinação final.

- Estudos de ACV Econômica, aplicados à Economia Circular nas empresas: Aprofundar a análise de ACV Econômica para avaliar o impacto das práticas de Economia Circular na viabilidade econômica das empresas, identificando oportunidades de redução de custos, incremento de eficiência e inovações tecnológicas que favoreçam a sustentabilidade financeira e a criação de valor a partir do reaproveitamento de recursos.

- Estudos sobre ACV Social, integrando indicadores ambientais, econômicos e sociais: Ampliar a abordagem da ACV Social, considerando a interação entre impactos ambientais, consequências econômicas e os efeitos sociais das práticas sustentáveis, com foco no bem-estar dos trabalhadores, impactos nas comunidades locais e a promoção de uma sustentabilidade inclusiva. Essa abordagem pode gerar insights importantes para o desenvolvimento de estratégias empresariais sustentáveis que atendam a múltiplos critérios de desempenho.

Esses estudos podem fornecer uma visão mais holística da Sustentabilidade do Ciclo de Vida, apoiando a implementação de modelos empresariais mais eficientes e equilibrados, que considerem as dimensões ambientais, econômicas e sociais de forma integrada.

REFERÊNCIAS

ABDI. AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (ABDI). **Logística Reversa de Equipamentos Eletroeletrônicos Análise de Viabilidade Técnica e Econômica**. Brasília - DF. 2013.

ABDULLAH, N. N.; ANWAR, G. **An Empirical Analysis of Natural Gas as an Alternative Fuel for Internal Transportation**. International Journal of English Literature and Social Sciences, v. 6, n. 1, 2021.

ABNT. Associação Brasileira e Normas Técnicas. **NBR ISO 14.040: 2009**. Gestão Ambiental – Avaliação de Ciclo de vida – Princípios e Estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a, versão corrigida 2014a.

ABNT. Associação Brasileira e Normas Técnicas. **NBR ISO 14.044: 2009**. Gestão Ambiental – Avaliação de Ciclo de vida – Princípios e Requisitos e Orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b, versão corrigida 2014b.

ABREMA. Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente. **O Futuro do Setor de Gestão de Resíduos: Tendências, Oportunidades e Desafios para a Década (2021-2030)**. São Paulo: 2021.

ABREMA. Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2022**. São Paulo: ABRELPE, 2022, 64 p. Disponível em: www.abrelpe.org.br. Acesso em: 29 ago 2023.

ALMEIDA, I. T. G. V.; RIBEIRO, A. R. B.; RAMALHO, L. L.; ARAUJO, R. S. C.; FLORIANO, L. S. **Economia circular e logística reversa: uma revisão sistemática**. In: Encontro Internacional Sobre Gestão Empresarial E Meio Ambiente (ENGEMA), 24, 2022, São Paulo. XXIV ENGEMA. São Paulo: USP, p. 1-16. 2022.

ARDUIN, R. H.; CHARBUILLET, C.; BERTHOUD, F. **Modelagem do fim da vida em avaliação do ciclo de vida: estudo de caso para cenários de resíduos eletroeletrônicos na França e no Brasil**. V Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida. 2016, Fortaleza. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/338937430>. Acesso em 26 mai 2023.

BALDÉ C.P.; KUEHR R.; YAMAMOTO, T.; MCDONALD R.; D'ANGELO E.; ALTHAF S.; BEL G.; DEUBZER O.; FERNANDEZ-CUBILLO E.; FORTI V.; GRAY V.; HERAT S.; HONDA S.; IATTONI G.; KHETRIWAL D.S.; CORTEMIGLIA V. L.; LOBUNTSOVA Y.; NNOROM I.; PRALAT N.; WAGNER M. **The Global E-waste Monitor 2024: Quantities, flows and the circular economy potential**. United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – co-hosted SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Rotterdam.

BARBOSA, J. T. L, MANCINI S. D., BELLI C., ANTUNES M. L. P., PAIVA J. M. F. **NEW POLYMER COMPOSITES MADE OF RECYCLED HIPS WITH RED MUD AND**

WIND BLADE WASTE: AN INDUSTRIAL ECOLOGY CASE. MATERIALS SCIENCE FORUM, 2022.

BISINELLA, V.; SCHMIDT, S.; VARLING, A.S.; LANER, D.; CHRISTENSEN, T.H. **Waste LCA and the future**. Waste Management, Volume 174, 53-75, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.11.021>. Acesso em 05 jul 2024.

BRASIL. Lei N° 12.305 de 02 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)**. Brasília - DF, 2010.

BRASIL. Centro de Tecnologia Mineral - CETEM. 2019. Acordo Setorial para Implantação do Sistema de Logística Reversa de Produtos Eletroeletrônicos de Uso Doméstico e seus Componentes. Disponível em: <https://www.cetem.gov.br/antigo/images/reminare/documentos/acordo-setorial.pdf>. Acesso em 24 jan 2024.

BRASIL. Decreto N° 10.240, de 12 de fevereiro de 2020. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, DF. 2022. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/decreto/d10240.htm. Acesso em: 02 out 2023.

BRASIL. Decreto N° 11.043, de 13 de abril de 2022. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Disponível em: <https://sinir.gov.br/informacoes/plano-nacional-de-residuos-solidos/>. Acesso em: 03 out 2023.

BRASIL. Decreto N° 12.082, de 27 de junho de 2024. **Estratégia Nacional de Economia Circular**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/decreto/D12082.htm#:~:text=D12082&text=Institui%20a%20Estrat%C3%A9gia%20Nacional%20de%20Economia%20Circular. Acesso em: 02 fev 2025.

CAMPOLINA, T. B. **Inventário do ciclo de vida do processo de reciclagem de plásticos de REEE**. 2015. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/8348>. Acesso em: 8 jul. 2024.

COSTANTINI, M.; LOVARELLI, D.; ORSI, L.; GANZAROLI, A.; FERRANTE, V.; FEBO, P.; GUARINO, M.; BACENETTI, J. **Investigating on the environmental sustainability of animal products: The case of organic eggs**. Journal of Cleaner Production, v. 274, p. 123046, 2020.

DE LANGEN, P. W.; SORNN-FRIESE, H.; HALLWORTH, J. **The Role of port development companies in transitioning the port business ecosystem; the case of port of Amsterdam's circular activities**. Sustainability (Switzerland), v. 12, n. 11, p. 1–16, 2020.

DESHPANDE, P.C.; HASKINS, C. (2021). **Application of Systems Engineering and Sustainable Development Goals towards Sustainable Management of**

Fishing Gear Resources in Norway. Sustainability, 13(9), 4914. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su13094914>. Acesso em: 25 abr 2024.

EC-JRC. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - **General guide for Life Cycle Assessment** - Detailed guidance. [S.l: s.n.], 2010.

EGLE - Department of Environment, Great Lakes, and Energy. **Electronic Waste Take Back Program.** Disponível em: <https://www.michigan.gov/egle/about/organization/materials-management/ewaste/takeback-program>. Acesso em: 02 jul. 2024.

EMF - ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards the circular economy - Vol. 2: Opportunities for the consumer goods sector.** 2013. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-2-opportunities-for-the-consumer-goods>. Acesso em: 02 fev 2022.

EUROPEAN UNION. **Directive 2011/61/Eu.** Of The European Parliament and Of the Council of 8 June 2011. On the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment. L 174 European Union Official Journal of the European Union, 1 jul. 2011.

EUROPEAN UNION. **Directive 2012/18/Eu.** Of The European Parliament and of the Council, of 4 July 2012. The control of major-accident hazards involving dangerous substances, amending and subsequently repealing Council Directive 96/82/EC. L 197 European Union Official Journal of the European Union, 24 jul. 2012.

FORTI, V.; BALDÉ, C.P.; KUEHR, R.; BEL, G. **The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential.** United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – co-hosted SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Rotterdam.

GHISELLINI, P.; PASSARO, R.; ULGIATI, S. **Environmental and Social Life Cycle Assessment of Waste Electrical and Electronic Equipment Management in Italy According to EU Directives.** Environments 2023, 10, 106. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/environments10070106>. Acesso em 20 abr 2024.

GREEN ELETRON. **Resíduos eletrônicos no Brasil, 2023.** Disponível em: https://greeneletron.org.br/download/RELATORIO_DADOS_2023.pdf. Acesso em: 25 jun 2024.

GUINÉE, J. B. **Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards.** *Int J LCA* 7, 311–313 (2002). <https://doi.org/10.1007/BF02978897>. Acesso em 03 mai 2024.

HE, Y.; KIEHBADROUDINEZHAD, M.; HOSSEINZADEH-BANDBAFHA, H.; GUPTA, V. K.; PENG, W.; LAM, S. S.; TABATABAEI, M.; AGHBASHLO, M. **Driving sustainable circular economy in electronics: A comprehensive**

review on environmental life cycle assessment of e-waste recycling. Journal of Environmental Pollution, v. 342, 123081, fev. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.123081>. Acesso em 05 mai 2024.

HSIEH, Y. C.; LIN, K.Y.; LU, C.; Rong, E. **Governing a sustainable business ecosystem in Taiwan's circular economy: the story of spring pool glass.** Sustainability (Switzerland), v. 9, n. 6, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su9061068>. Acesso em 03 mai 2024.

ISMAIL, H.; HANAFIAH, M. M. **An overview of LCA application in WEEE management: Current practices, progress and challenges** Journal of Cleaner Production, v. 232, p. 79-83, mai. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.329>. Acesso em 05 mai 2024.

ISO - International Organization for Standardization. **The economy of the future.** 2022. Disponível em: <https://www.iso.org/home.html>. Acesso em 25 mai 2024.

ISWA - International Solid Waste Association. **O futuro do setor de gestão de resíduos: tendências, oportunidades e desafios para a década (2021-2030).** 2021. Disponível em: <https://www.iswa.org/wp-content/uploads/2022/09/ISWA-Future-of-the-Waste-Management-Sector-Portuguese.pdf>. Acesso em 03 abr 2024.

ITU - International Telecommunication Union. **Final Acts of the Plenipotentiary Conference** (Dubay, 2018). Disponível em: https://www.itu.int/dms_pub/itu-s/opb/conf/S-CONF-ACTF-2018-R1-PDF-E.pdf. Acesso em 25 out 2024.

JAPAN. **Law for the Promotion of Effective Utilization of Resources, April 2001.** This Law aims at establishing a sound material-cycle economic system. abr. 2001a.

JAPAN. **Law for the Recycling of Specified Kinds of Home Appliances, April 2001.** Aiming to realize sound waste treatment and efficient use of resources through reduction of waste and full utilization of recyclable resources for the realization of a sound material-cycle society. abr. 2001b.

JAUNICH, M.K.; DECAROLIS, J.; HANDFIELD, R.; LIOGLU-ZIYA, E. K.; RANJITHAN, S.R.; MOHEB-ALIZADEH, H. **Life-cycle modeling framework for electronic waste recovery and recycling processes.** Resources, Conservation and Recycling, v. 161, 2020, 104841. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104841>. Acesso em 09 jun 2024.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. **Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions.** Resources, Conservation and Recycling, v. 127, 2017, 221-232. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>. Acesso em 09 jun 2024.

KIRCHHERR, J.; YANG, N. N.; SPÜNTRUP, F.; HEERINK, M.J.; HARTLEY, K. **Conceptualizing the Circular Economy (Revisited): An Analysis of 221 definitions.** Resources, Conservation and Recycling, v. 194, 2023, 107001.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107001>. Acesso em 09 jun 2024.

MANGMEECHAI, A. **The life-cycle assessment of greenhouse gas emissions and life-cycle costs of ewaste management in Thailand**. Sustainable Environment Research, 2022, 32:16. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s42834-022-00126-x>. Acesso em 6 nov 2023.

MAPHOSA, M.; MAPHOSA, V. **Using the Circular Economy to Mitigate the Global Electronic Waste Challenge: A Systematic Literature Review Approach**. European Journal of Social Impact and Circular Economy. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.13135/2704-9906/10799>. Acesso em 10 jan 2025.

MERCADER M.P.; PORRAS P.P.; LEVINTON, C. (2021). **Circular Economy and Regenerative Sustainability in Emergency Housing: Eco-Efficient Prototype Design for Subaşı Refugee Camp in Turkey**. Sustainability, 13(14), 8100. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su13148100>. Acesso em 03 set 2023.

MOORE, J. F. A New ecology of competition Harvard Business Review. **Harvard Business Review**, v. 71, n. 3, p. 75–86, 1993.

MULLER, F. L. D., BECKER JÚNIOR, A. M., MORAES, J. A. R., MACHADO, Ê. L. **Revisão sistemática do gerenciamento coletivo de resíduos sólidos industriais com unidade de compostagem associada ao processamento do tabaco**. Engenharia Sanitária E Ambiental, 27(5), 853–861. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220210128>. Acesso em: 04 mar 2024.

PIDUN, U.; REEVES, M.; SCHÜSSLER, M. **Business Ecosystems**. Berlin, Boston: De Gruyter, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/9783110775167>. Acesso em 03 jun 2024.

POKHREL, P.; LIN, S-H.; TSAI, C-T. **Environmental and economic performance analysis of recycling waste printed circuit boards using life cycle assessment**. Journal of Environmental Management, 276, 2020, 111276. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111276>. Acesso em 10 jun 2024.

RAICV (2024). Rede de Pesquisa em AICV. **Guia para apoiar o desenvolvimento de negócios sustentáveis [livro eletrônico]: economia circular**. São Paulo: Rede ACV, 2024. PDF ISBN 978-65-983707-0-1.

RAICV (2019). Rede de Pesquisa em AICV. **Recomendação de modelos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida para o Contexto Brasileiro**. Disponível em: <https://acv.ibict.br/wp-content/uploads/2019/07/Relat%C3%B3rio-de-Recomenda%C3%A7%C3%B5es-de-Modelos-de-Avalia%C3%A7%C3%A3o-de-Impacto-para-o-Contexto-Brasileiro.pdf>. Acesso em 20 jun de 2024.

REDE ACV – Rede Empresarial Brasileira de Avaliação de Ciclo de Vida. **Avaliação de Ciclo de Vida: Requisitos ISO 14044 x prática Recomendações da Rede ACV para questões subjetivas**. 2022. Disponível em: <https://redeacv.org.br/pt-br/noticias/requisitos-iso-14044-x-pratica>. Acesso em: 29 ago 2024.

ROCHA, T. B.; PENTEADO, C. S. G. **Life cycle assessment of a small WEEE reverse logistics system: Case study in the Campinas Area, Brazil**. *Journal of Cleaner Production*, v. 314, 2021.

ROCHA, T. B. **Avaliação do ciclo de vida aplicada à logística reversa de resíduos eletroeletrônicos na região administrativa de Campinas-SP**. 2020. Tese (Doutorado) – Universidade de Campinas (UNICAMP), Limeira, SP. Disponível em: <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2020.1127222>. Acesso em 30 set 2023.

ROCHA, T. B.; PENTEADO, H. D. S. **Impactos e benefícios ambientais do gerenciamento de resíduos eletroeletrônicos**. 2017. *Revista Latino Americana em Avaliação do Ciclo de Vida – LALCA*. Disponível em: <https://lalca.acv.ibict.br/lalca/article/view/3073>. Acesso em: 8 jul. 2024.

ROSA, P.; SASSANELLI, C.; TERZI, S. **Circular business models versus circular benefits: An assessment in the waste from electrical and electronic equipments sector**. *Journal of Cleaner Production*, 231, 940–952. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.310>. Acesso em 07 mai 2024.

SILVA, W.D.O.; FONTANA, M.E. **Integrative multi-attribute negotiation model to define stakeholders' responsibilities in the reverse flow channel**. *Journal of Cleaner Production*, v. 279, p. 123752, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123752>. Acesso em: 04 mar 2024.

SINCTRONICS. Vídeo Institucional. 2019. Disponível em https://www.youtube.com/watch?v=h0MfnKC84_Q. Acesso em 26 jun 2023.

SOUZA, R.S.; GUARNIERI, P.; VIEIRA, B.O. **Desafios da transição para a economia circular no setor de resíduos eletroeletrônicos no Brasil**. *RAE-Revista de Administração de Empresas*. v. 65, Nº. 4, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0034-759020250401>. Acesso em 04 abr 2025.

TREVISAN, M.; NASCIMENTO, L.F.; MADRUGA, L.R.D.R.G.; NEUTZLING, D.M.; FIGUEIRÓ, P.S.; BOSSIE, M.B. **Ecologia industrial, simbiose industrial e ecoparque industrial: conhecer para aplicar**. *Sistemas & Gestão*, v. 11, n. 2, p. 204-215, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.20985/1980-5160.2016.v11n2.993>. Acesso em: 04 mar 2024.

UL SOLUTIONS. **The Quest for Zero Waste to Landfill with UL 2799**. 2023. Disponível em <https://www.ul.com/insights/quest-zero-waste-landfill-ul-2799>. Acesso em: 03 jan 2024.

UNEP - United Nations Environment Programme. **Our Planet. Our Future**. 2019. Disponível em: <https://www.unep.org/news-and-stories/speech/our-planet-our-future>. Acesso em 16 jul. 2024.

UNEP – United Nations Environment Programme. **Global Waste Management Outlook 2024. Beyond an age of waste - Turning rubbish into a resource**. 2024.

Disponível em: <https://www.unep.org/resources/global-waste-management-outlook-2024>. Acesso em 25 out 2024.

UNIÃO EUROPEIA. **Diretiva 2002/96/CE do Parlamento Europeu e do Conselho relativa aos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE)**. 2003.

Disponível em: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:ac89e64f-a4a5-4c13-8d96-1fd1d6bcaa49.0010.02/DOC_1&format=PDF. Acesso em: 10 jan 2024.

UNDERWRITES LABORATORIES – UL 2799. **Environmental Claim Validation Procedure for Zero Waste to Landfill**. 2017, March. Disponível em https://www.shopulstandards.com/ProductDetail.aspx?productId=ULE2799_3_S_20170322. Acesso em: 25 set 2023.

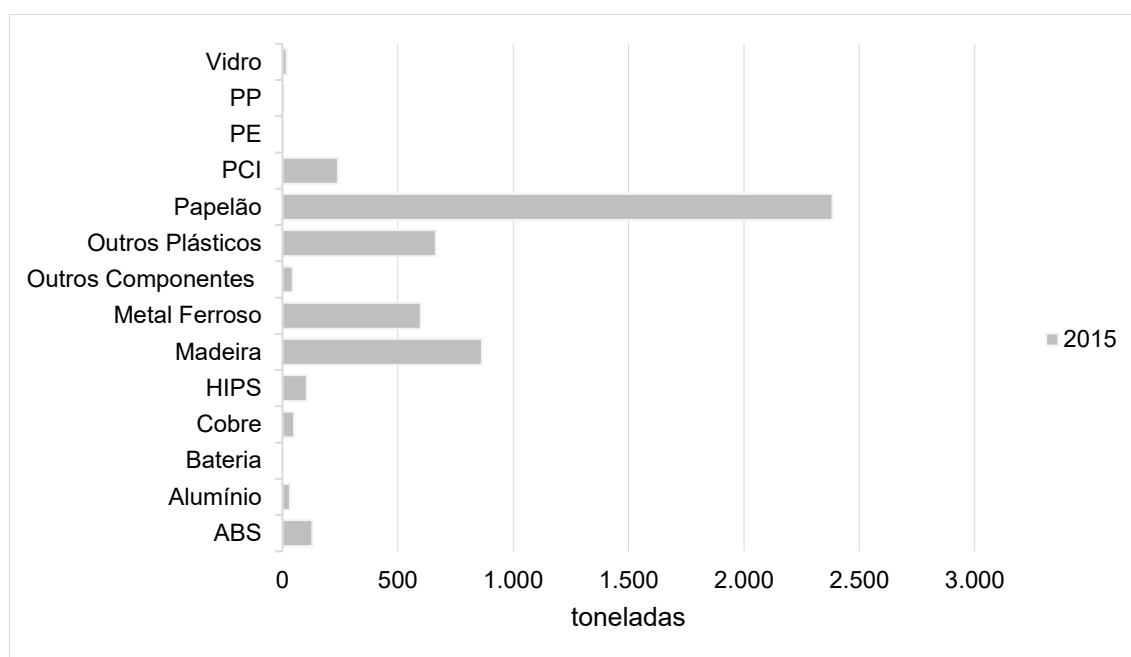
WALKER, A.M.; OPFERKUCH, K.; ROOS L.E.; SIMBOLI, A.; VERMEULEN, W. J. V.; RAGGI, A. **Assessing the social sustainability of circular economy practices: Industry perspectives from Italy and the Netherlands**. Sustainable Production and Consumption, 27, 831–844. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.01.030>.

WEIDEMA, B. P.; BAUER, C.; HISCHIER, R.; MUTEL, C.; NEMECEK, T.; REINHARD, J.; VADENBO, C. O.; WERNET, G. **Overview and methodology**. Ecoinvent, 2013.

ZHANG, Z.; MALIK, M. Z.; KHAN, A.; ALI, N.; MALIK, S.; BILAL, M. **Environmental impacts of hazardous waste, and management strategies to reconcile circular economy and eco-sustainability**. Science of The Total Environment, v. 807. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150856>. Acesso em 05 mai 2023.

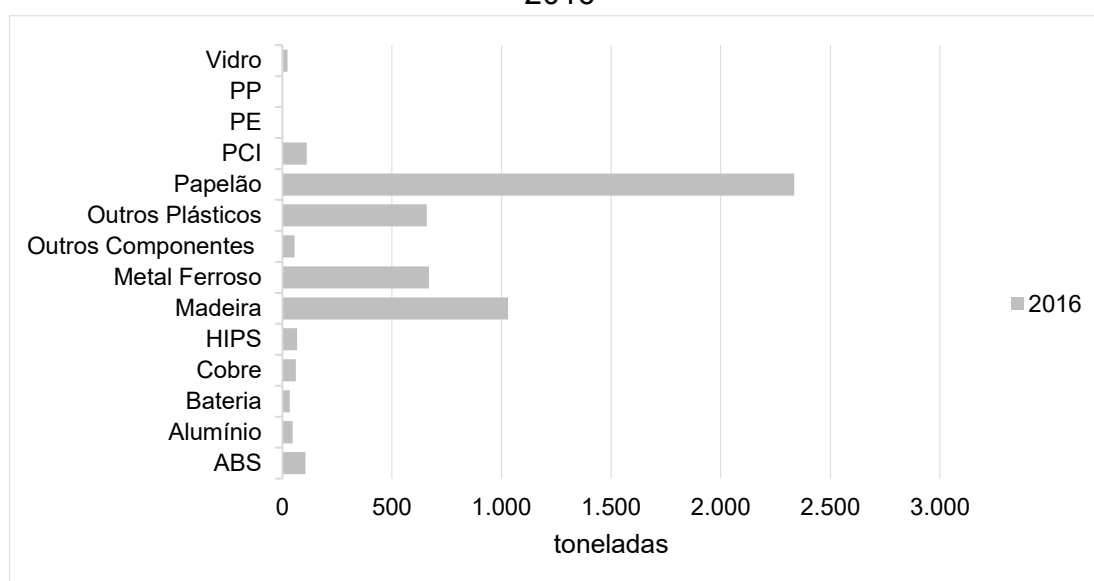
APÊNDICE A – MATERIAL RECICLÁVEL GERADOS NO PARQUE FABRIL (2015-2022)

Figura 19 - Quantidade de cada material reciclável gerados no parque fabril, ano 2015



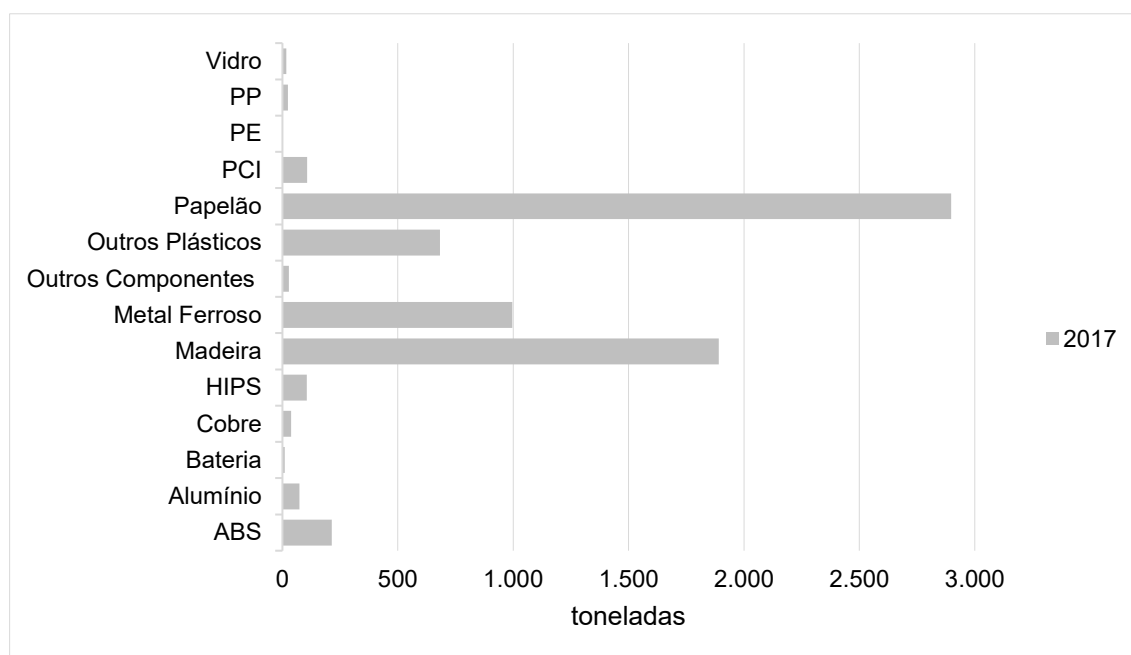
Fonte: Autoria Própria

Figura 20 - Quantidade de cada material reciclável gerados no parque fabril, ano 2016



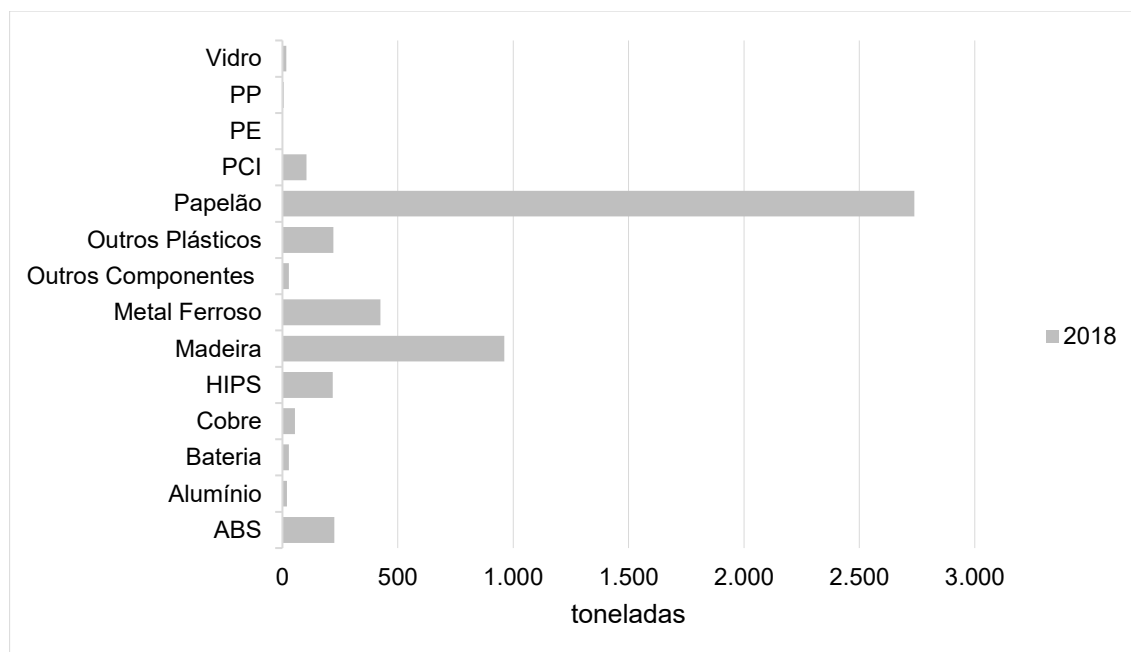
Fonte: Autoria Própria

Figura 21 - Quantidade de cada material reciclável gerados no parque fabril, ano 2017



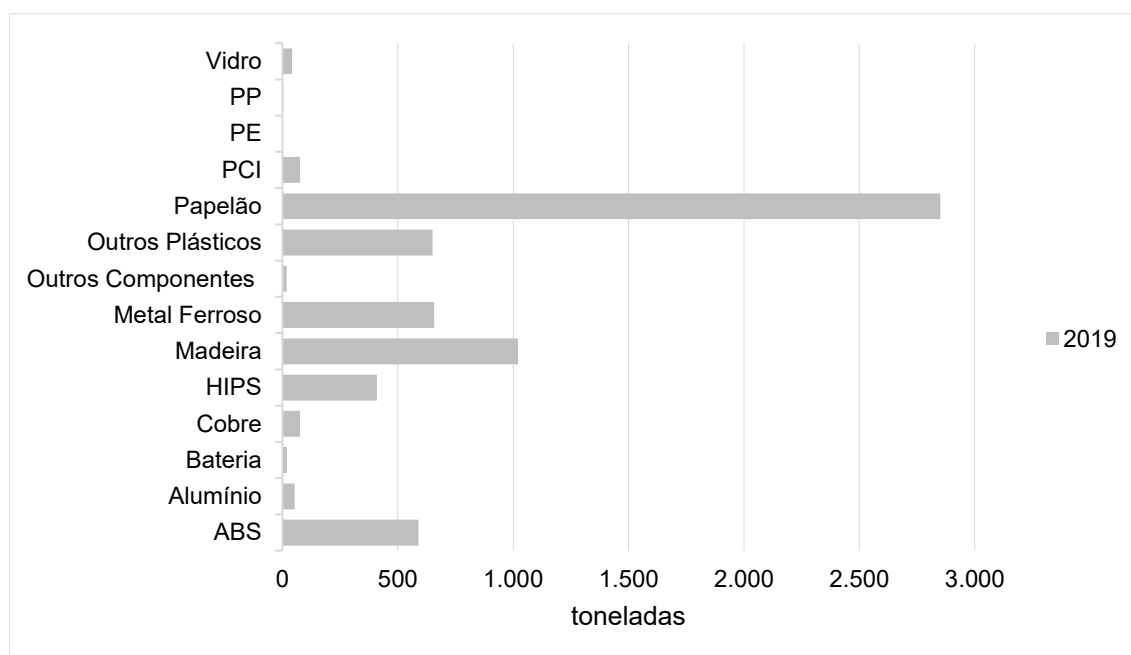
Fonte: Autoria Própria

Figura 22 - Quantidade de cada material reciclável gerados no parque fabril, ano 2018



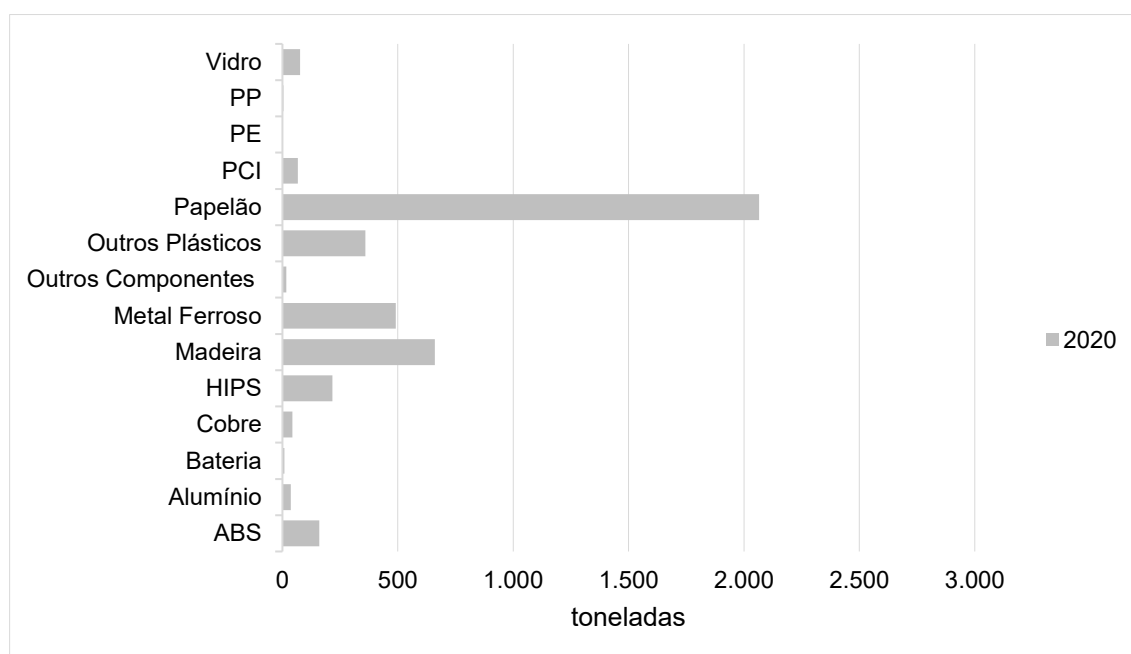
Fonte: Autoria Própria

Figura 23 - Quantidade de cada material reciclável gerados no parque fabril, ano 2019



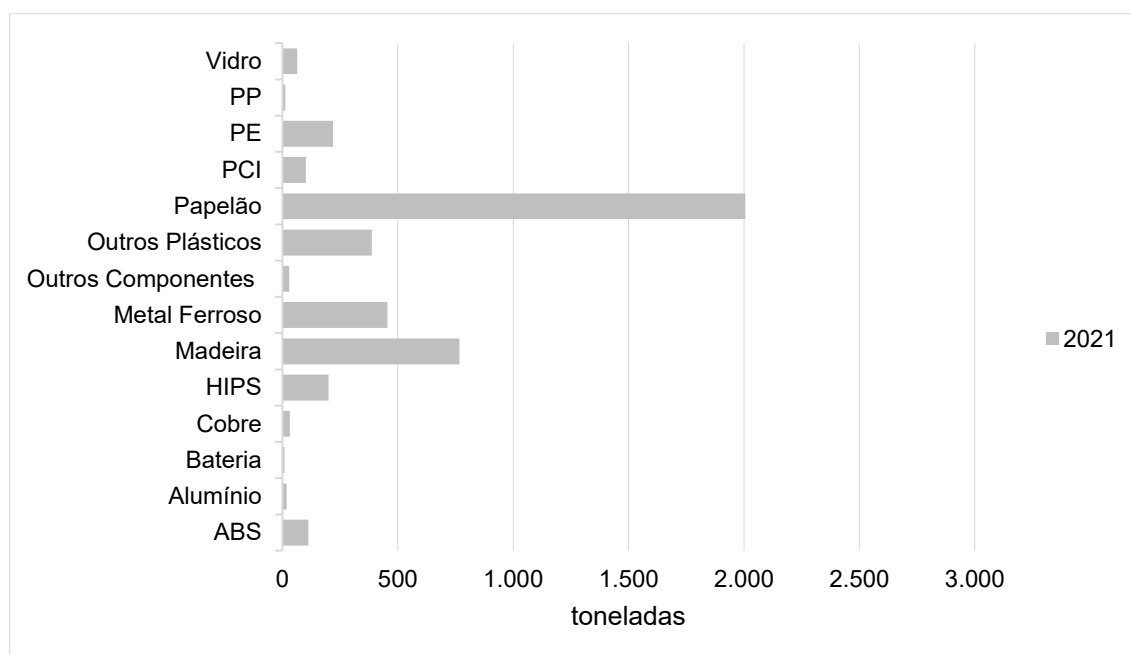
Fonte: Autoria Própria

Figura 24 – Quantidade de cada material reciclável gerados no parque fabril, ano 2020



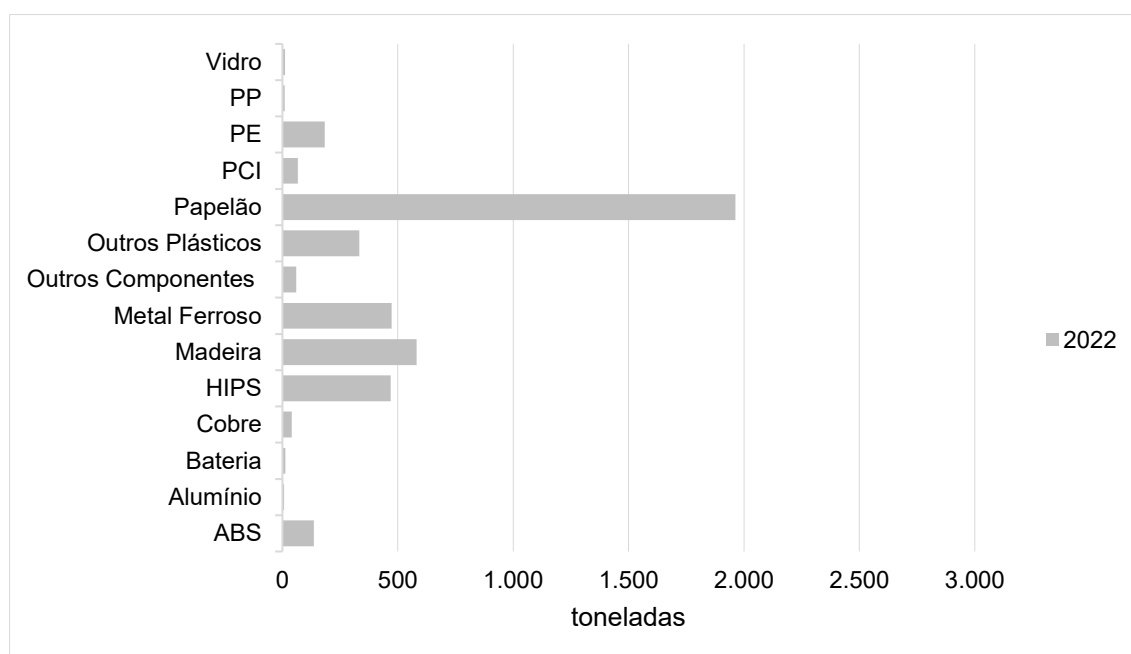
Fonte: Autoria Própria

Figura 25 - Quantidade de cada material reciclável gerados no parque fabril, ano 2021



Fonte: Autoria Própria

Figura 26 - Quantidade de cada material reciclável gerados no parque fabril, ano 2022



Fonte: Autoria Própria

APÊNDICE B – MATRIZ PEDIGREE

Tabela 11 - Matriz de pedigree usada para avaliar a qualidade das fontes de dados

	1	2	3	4	5
1. Confiança	Dado verificado a partir de medições	Dado verificado parcialmente baseado em considerações, ou dado não verificado baseado em medições	Dado não verificado parcialmente baseado em estimativas bem embasadas	Estimativa bem embasada (ex: opinião de um expert)	Estimativa pouco embasada
	1.00	1.05	1.10	1.20	1.50
2. Integralidade	Dados representativos de todos os campos de interesse, ao longo de um período considerável para anular flutuações	Dados representativos de mais da metade dos campos de interesse, ao longo de um período considerável para anular flutuações	Dados representativos de alguns dos campos de interesse (bem menos da metade), ou dados representativos de mais da metade dos campos de interesse por um período curto	Dados representativos de apenas um campo de interesse, ou alguns campos de interesse por um período curto	Dados representativos desconhecidos, ou dados de poucos campos de interesse por um período curto
	1.00	1.02	1.05	1.10	1.20
3. Correlação Temporal	Menos de 3 anos de diferença entre a avaliação e os dados	Menos de 6 anos de diferença entre a avaliação e os dados	Menos de 10 anos de diferença entre a avaliação e os dados	Menos de 15 anos de diferença entre a avaliação e os dados	Mais de 15 anos de diferença entre a avaliação e os dados, ou data dos dados desconhecida
	1.00	1.03	1.10	1.20	1.50
4. Correlação Geográfica	Dados da região de estudo	Dados médios de uma macro região, onde a região de estudo se inclui	Dados de uma área com condições semelhantes às da região de estudo	Dados de uma área com condições aproximadamente semelhantes às da região de estudo	Dados de uma região desconhecida, ou de uma região diferente da região de estudo
	1.00	1.01	1.02	-	1.10
5. Correlação Tecnológica	Dados de empresas, processos e materiais sob estudo	Dados de processos e materiais sob estudo, mas de empresas diferentes	Dados de processos e materiais sob estudo, mas de tecnologias diferentes	Dados de processos e materiais relacionados aos estudados	Dados de processos relacionados aos estudados conduzidos em laboratório, ou dados de uma tecnologia diferente
	1.00	-	1.20	1.50	2.00

Fonte: Adaptado (Weidema *et al.*, 2013)

Tabela 12 - Matriz de pedigree com os valores referentes do parque fabril em estudo, no período de 2015-2022

Entradas									
Recursos	Unidade	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Água	Kg	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)
Energia Elétrica	KWh	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)
GLP	Kg	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)
Saídas									
Recicláveis	Unidade	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
ABS	(%)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)
Alumínio	(%)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)
Bateria	(%)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)
Cobre	(%)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)
HIPS	(%)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)
Madeira	(%)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)
Metal Ferroso	(%)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)
Outros Componentes	(%)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)
Outros Plásticos	(%)	(3,2,3,1;1)	(3,2,3,1;1)	(3,2,3,1;1)	(3,2,3,1;1)	(3,2,2,1;1)	(3,2,2,1;1)	(3,2,2,1;1)	(3,2,2,1;1)
Papelão	(%)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)
PCI	(%)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)
PE	(%)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)
PP	(%)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)
Vidro	(%)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)
Total Recicláveis	t								
Transporte Externo	t.Km	(3,2,3,1;1)	(3,2,3,1;1)	(3,2,3,1;1)	(3,2,3,1;1)	(3,2,2,1;1)	(3,2,2,1;1)	(3,2,2,1;1)	(3,2,2,1;1)
Outros Resíduos	t	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,3,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)	(2,2,2,1;1)
Transporte Externo	t.Km	(3,2,3,1;1)	(3,2,3,1;1)	(3,2,3,1;1)	(3,2,3,1;1)	(3,2,2,1;1)	(3,2,2,1;1)	(3,2,2,1;1)	(3,2,2,1;1)

Fonte: Autoria Própria

APÊNDICE C – INCERTEZA BÁSICA

ENTRADAS / SAÍDAS (POR GRUPO)	UB	ENTRADAS / SAÍDAS (POR GRUPO)	UB
DEMANDA DE		EMISSIONES PARA O AR	
Energia térmica	1,05	CO2	1,05
Eleticidade	1,05	SO2	1,05
Produtos semi-prontos	1,05	Combustão: NOX, NMVOC total, metano, N2O e NH3	1,50
Materiais de trabalho	1,05	Combustão: CO	5,00
Serviços de transporte	2,00	Combustão: Hidrocarbonetos individuais, TSM	1,50
Serviços de tratamento de resíduos	1,05	Combustão: PM10	2,00
Infraestrutura	3,00	Combustão: PM2,5	3,00
RECURSOS		Combustão: PAH	3,00
Portadores de energia primária	1,05	Combustão: Metais pesados	5,00
Metais, sais	1,05	Emissões de processos: VOCs individuais	2,00
Ocupação, uso da terra	1,50	Emissões de processos: CO2	1,05
Transformação, uso da terra	1,05	Emissões de processos: TSM	1,50
RESÍDUOS DE CALOR		Emissões de processos: PM10	2,00
Emissão para o ar, água e solo	1,05	Emissões de processos: PM2,5	3,00
EMISSIONES PARA A ÁGUA		Proveniente da agricultura: CH4, NH3	1,20
BOD, COD, DOC, TOC	1,50	Proveniente da agricultura: CH4, NH3	1,40
Compostos inorgânicos (NH4, PO4, NO3, Cl, Na, etc.)	1,50	Radionuclídeos (ex.: Radônio 222)	3,00
Hidrocarbonetos individuais, PAH	3,00	Emissões de processos: outras emissões inorgânicas	1,50
Metais pesados	5,00	EMISSIONES PARA O SOLO	
Proveniente da agricultura: NO3, PO4	1,50	Óleo, hidrocarbonetos	1,50
Proveniente da agricultura: metais pesados	1,80	Pesticidas	1,20
Proveniente da agricultura: pesticidas	1,50	Metais pesados	1,50
Radionuclídeos	3,00	Radionuclídeos	3,00

Fonte: Adaptado (Guinée ,2002)

APÊNDICE D – AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA

Tabela 13 - Resumo de algumas das categorias de impactos no nível *midpoint* do *ReCiPe* 2016, os compartimentos afetados e os impactos potenciais

Aquecimento global (Kg CO ₂ eq)	Emissões para o ar	Emissões de gases de efeito estufa que aumenta, em uma determinada janela temporal, o valor do forçamento radiativo do planeta (W/m ²), ocasionando o aumento da temperatura média do planeta.
Depleção da camada de ozônio (Kg CFC11 eq)	Emissões para o ar	Associada às emissões que potencialmente diminuem a concentração de ozônio no nível estratosférico, permitindo o aumento da radiação ultravioleta que chega à superfície da terra e com impactos negativos na saúde humana. Emissões de gases halogêneos, CFCs e HCFCs.
Acidificação terrestre (Kg SO ₂ eq)	Emissões para o ar	Deposição de poluentes atmosféricos inorgânicos tais como sulfatos, nitratos e fosfatos que modificam o nível de acidez dos solos. As emissões de SO ₂ , NO _x e NH ₃ são um dos principais desencadeadores da deposição destas substâncias sob o solo.
Eutrofização da água doce (Kg P eq)	Emissões para solo/água	Eutrofização é o processo ocasionado pela emissão de nutrientes como fósforo e nitrogênio no solo ou na água e que chegam aos corpos d'água (rios e lagos) aumentando o nível de nutrientes nestes ambientes e induzindo a um crescimento excessivo de plantas aquáticas e algas. Tal fenômeno reduz os teores de oxigênio no ambiente aquático afetado, ocasionando a morte de peixes e outros organismos.
Toxicidade Humana (kg 1,4-DCB)	Emissões para ar/solo/água	Compreende as emissões de substâncias químicas potencialmente tóxicas à saúde humana, aos ecossistemas aquáticos, marinhos e terrestres. Para a saúde humana, por exemplo, contabiliza a exposição por meio da inalação direta destas substâncias e por meio da ingestão de alimentos e água.
Uso da Terra (m ² a crop eq)	Emissões para ar/solo/água	Os impactos do uso da terra podem ser medidos com diferentes indicadores, que expressam o valor intrínseco da biodiversidade ou o valor funcional dos ecossistemas em termos de seus bens (recursos naturais, como madeira ou alimentos) e serviços (funções de suporte à vida, como regulação do clima ou da erosão).

Fonte: (MAJ *et al.*, 2016)

APÊNDICE E – ENTRADAS DE INSUMOS E SAÍDAS DE MATERIAIS NAS UNIDADES 1 E 2, NOS CENÁRIOS PROPOSTOS

Tabela 14 - Cenário 1 - Entradas de insumos e saídas de materiais da Unidade 1 –
Manufatura, durante o período de 2015 a 2022

Entradas									
Recursos	Unidade	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Água	Kg	-	-	-	-	-	-	-	-
Energia Elétrica	KWh	-	-	-	-	-	-	-	-
GLP	Kg	-	-	-	-	-	-	-	-
Saídas									
Recicláveis	Unidade	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
ABS	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
Alumínio	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
Bateria	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
Cobre	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
HIPS	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
Madeira	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
Metal Ferroso	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
Outros Componentes	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
Outros Plásticos	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
Papelão	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
PCI	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
PE	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
PP	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
Vidro	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
Total Recicláveis	t	-	-	-	-	-	-	-	-
Transporte Externo	t.Km	-	-	-	-	-	-	-	-
Matéria Orgânica	ton	-	-	-	-	-	-	-	-
Transporte Externo	t.Km	-	-	-	-	-	-	-	-
Outros Resíduos	ton	2.329,75	3.970,07	3.998,95	2.362,95	4.009,72	2.731,65	3.188,93	2.941,99
Transporte Externo	t.Km	93.189,96	158.802,76	159.958,12	94.517,88	160.388,96	109.265,84	127.557,28	117.679,56

Fonte: Autoria Própria

Tabela 15 - Cenário 1 - Entradas de insumos e saídas de materiais da Unidade 2 – Logística Reversa, durante o período de 2015 a 2022

Entradas									
Recursos	Unidade	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Água	Kg	-	-	-	-	-	-	-	-
Energia Elétrica	KWh	-	-	-	-	-	-	-	-
GLP	Kg	-	-	-	-	-	-	-	-
Saídas									
Recicláveis	Unidade	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
ABS	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
Alumínio	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
Bateria	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
Cobre	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
HIPS	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
Madeira	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
Metal Ferroso	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
Outros Componentes	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
Outros Plásticos	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
Papelão	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
PCI	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
PE	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
PP	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
Vidro	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
Total Recicláveis	t	-	-	-	-	-	-	-	-
Transporte Externo	t.Km	-	-	-	-	-	-	-	-
Outros Resíduos	t	3.662,77	1.994,34	3.586,15	3.200,97	2.951,16	1.695,36	1.496,76	1.732,34
Transporte Externo	t.Km	146.510,91	79.773,57	143.446,16	128.038,67	118.046,40	67.814,20	59.870,52	69.293,73

Fonte: Autoria Própria

Tabela 16 - Cenário 2 - Entradas de insumos e saídas de materiais da Unidade 1 – Manufatura, durante o período de 2015 a 2022

Entradas									
Recursos	Unidade	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Água	Kg	17.314,38	33.326,88	34.086,25	39.234,38	39.625,00	35.119,38	27.570,00	34.104,79
Energia Elétrica	KWh	16.112,30	15.579,59	20.595,06	18.454,75	18.138,56	17.747,49	14.478,45	16.788,17
GLP	Kg	860,00	520,00	705,00	1.215,00	615,00	595,00	515,00	575,00
Saídas									
Recicláveis	Unidade	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
ABS	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
Alumínio	(%)	-	-	-	-	0,22	0,18	0,08	0,03
Bateria	(%)	-	-	-	-	-	0,04	0,01	-
Cobre	(%)	-	-	-	-	0,12	0,08	0,04	0,00
HIPS	(%)	-	-	-	-	0,03	0,15	0,04	0,00
Madeira	(%)	6,01	6,59	12,95	11,56	6,47	5,63	5,49	4,90
Metal Ferroso	(%)	0,47	1,08	0,64	0,59	1,05	1,05	1,31	0,67
Outros Componentes	(%)	-	-	-	-	0,02	0,03	0,00	-
Outros Plásticos	(%)	3,64	3,63	3,61	0,10	0,98	0,91	1,79	1,55
Papelão	(%)	14,88	13,70	7,80	12,76	15,99	16,25	13,89	16,01
PCI	(%)	-	-	-	-	0,03	0,07	0,15	0,07
PE	(%)	-	-	-	-	-	-	1,86	1,73
PP	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
Vidro	(%)	-	-	-	-	0,10	0,63	0,33	0,03
Total Recicláveis	t	412,85	817,14	883,31	470,31	893,72	632,37	733,71	661,24
Transporte Externo	t.Km	76.676,07	126.116,97	124.625,79	75.705,31	124.640,32	83.971,08	98.208,86	91.230,07
Matéria Orgânica	ton	-	-	-	-	-	-	-	-
Transporte Externo	t.Km	-	-	-	-	-	-	-	-
Outros Resíduos	ton	1.916,90	3.152,92	3.115,64	1.892,63	3.116,01	2.099,28	2.455,22	2.280,75
Transporte Externo	t.Km	76.676,07	126.116,97	124.625,79	75.705,31	124.640,32	83.971,08	98.208,86	91.230,07

Fonte: Autoria Própria

Tabela 17 - Cenário 2 - Entradas de insumos e saídas de materiais da Unidade 2 – Logística Reversa, durante o período de 2015 a 2022

Entradas									
Recursos	Unidade	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Água	Kg	71.700,00	129.412,50	161.700,00	183.412,50	210.322,50	224.475,00	167.437,50	200.745,00
Energia Elétrica	KWh	56.607,53	54.835,89	59.905,46	63.510,75	80.422,61	57.473,49	67.909,46	68.601,93
GLP	Kg	275,20	166,40	225,60	388,80	194,24	191,10	102,94	162,76
Saídas									
Recicláveis	Unidade	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
ABS	(%)	0,93	1,35	1,50	1,78	5,09	2,37	1,91	2,00
Alumínio	(%)	0,23	0,61	0,52	0,16	0,18	0,27	0,15	0,06
Bateria	(%)	0,00	0,43	0,07	0,22	0,17	0,07	0,13	0,19
Cobre	(%)	0,36	0,80	0,27	0,43	0,52	0,53	0,46	0,59
HIPS	(%)	0,76	0,87	0,74	1,72	3,49	3,00	3,29	6,89
Madeira	(%)	3,35	2,19	0,42	0,72	0,83	1,36	2,05	0,92
Metal Ferroso	(%)	4,08	6,85	6,38	3,00	4,38	5,74	5,10	5,91
Outros Componentes	(%)	0,32	0,71	0,19	0,23	0,14	0,22	0,49	0,87
Outros Plásticos	(%)	3,04	2,38	1,22	1,69	4,41	3,98	3,00	2,48
Papelão	(%)	10,04	7,06	12,64	14,05	4,87	6,29	6,34	3,96
PCI	(%)	1,72	1,44	0,75	0,82	0,63	0,89	1,43	0,88
PE	(%)	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	-	0,00	-
PP	(%)	0,04	0,01	0,16	0,04	0,04	0,06	0,22	0,14
Vidro	(%)	0,14	0,30	0,12	0,13	0,24	0,20	0,45	0,11
Total Recicláveis	t	871,57	482,02	887,54	791,09	724,19	419,20	369,99	425,60
Transporte Externo	t.Km	111.622,11	60.492,88	107.944,52	96.395,20	89.079,00	51.046,25	45.070,74	52.269,57
Outros Resíduos	t	2.791,20	2.476,36	2.698,61	3.992,05	3.675,35	2.114,55	1.866,75	485,46
Transporte Externo	t.Km	111.648,18	99.054,26	107.944,52	159.682,14	147.013,80	84.582,15	74.670,15	19.418,35

Fonte: Autoria Própria

Tabela 18 - Cenário 3 - Entradas de insumos e saídas de materiais da Unidade 1 – Manufatura, durante o período de 2015 a 2022

Entradas									
Recursos	Unidade	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Água	Kg	34.628,75	66.653,75	68.172,50	78.468,75	79.250,00	70.238,75	55.140,00	68.209,58
Energia Elétrica	KWh	32.224,60	31.159,18	41.190,12	36.909,50	36.277,12	35.494,99	28.956,91	33.576,34
GLP	Kg	1.720,00	1.040,00	1.410,00	2.430,00	1.230,00	1.190,00	1.030,00	1.150,00
Saídas									
Recicláveis	Unidade	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
ABS	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
Alumínio	(%)	-	-	-	-	0,45	0,37	0,16	0,06
Bateria	(%)	-	-	-	-	-	0,08	0,02	-
Cobre	(%)	-	-	-	-	0,23	0,15	0,08	0,01
HIPS	(%)	-	-	-	-	0,06	0,29	0,08	0,00
Madeira	(%)	12,02	13,18	25,91	23,11	12,94	11,25	10,99	9,80
Metal Ferroso	(%)	0,93	2,16	1,28	1,18	2,10	2,10	2,62	1,34
Outros Componentes	(%)	-	-	-	-	0,03	0,05	0,01	-
Outros Plásticos	(%)	7,28	7,26	7,21	0,19	1,96	1,83	3,58	3,11
Papelão	(%)	29,76	27,40	15,60	25,52	31,97	32,49	27,79	32,01
PCI	(%)	-	-	-	-	0,06	0,13	0,30	0,14
PE	(%)	-	-	-	-	-	-	3,72	3,47
PP	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
Vidro	(%)	-	-	-	-	0,19	1,26	0,65	0,06
Total Recicláveis	t	825,69	1.634,29	1.766,62	940,63	1.787,43	1.264,74	1.467,42	1.322,47
Transporte Externo	t.Km	60.162,18	93.431,18	89.293,46	56.892,74	88.891,68	58.676,32	68.860,44	64.780,58
Matéria Orgânica	ton	-	-	-	-	-	-	-	-
Transporte Externo	t.Km	-	-	-	-	-	-	-	-
Outros Resíduos	ton	1.504,05	2.335,78	2.232,34	1.422,32	2.222,29	1.466,91	1.721,51	1.619,51
Transporte Externo	t.Km	60.162,18	93.431,18	89.293,46	56.892,74	88.891,68	58.676,32	68.860,44	64.780,58

Fonte: Autoria Própria

Tabela 19 - Cenário 3 - Entradas de insumos e saídas de materiais da Unidade 2 – Logística Reversa, durante o período de 2015 a 2022

Entradas									
Recursos	Unidade	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Água	Kg	143.400,00	258.825,00	323.400,00	366.825,00	420.645,00	448.950,00	334.875,00	401.490,00
Energia Elétrica	KWh	113.215,05	109.671,78	119.810,93	127.021,50	160.845,23	114.946,98	135.818,93	137.203,86
GLP	Kg	550,40	332,80	451,20	777,60	388,49	382,20	205,88	325,52
Saídas									
Recicláveis	Unidade	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
ABS	(%)	1,85	1,50	3,06	3,23	8,45	2,28	1,62	1,95
Alumínio	(%)	0,46	0,67	1,05	0,28	0,31	0,26	0,12	0,06
Bateria	(%)	0,00	0,47	0,15	0,40	0,28	0,07	0,11	0,18
Cobre	(%)	0,72	0,88	0,54	0,78	0,86	0,51	0,39	0,58
HIPS	(%)	1,52	0,96	1,51	3,12	5,80	2,89	2,80	6,73
Madeira	(%)	6,69	2,42	0,86	1,31	1,39	1,31	1,74	0,90
Metal Ferroso	(%)	8,16	7,58	12,99	5,45	7,29	5,52	4,33	5,77
Outros Componentes	(%)	0,64	0,79	0,39	0,41	0,23	0,21	0,42	0,85
Outros Plásticos	(%)	6,08	2,63	2,49	3,06	7,32	3,83	2,54	2,42
Papelão	(%)	20,08	7,81	25,75	25,50	8,10	6,05	5,38	3,87
PCI	(%)	3,44	1,59	1,53	1,49	1,04	0,86	1,21	0,86
PE	(%)	0,02	0,01	0,03	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00
PP	(%)	0,08	0,01	0,34	0,08	0,07	0,06	0,18	0,14
Vidro	(%)	0,27	0,34	0,25	0,23	0,40	0,19	0,38	0,11
Total Recicláveis	t	1.743,14	964,03	1.775,08	1.582,17	1.448,37	838,40	739,98	851,21
Transporte Externo	t.Km	76.785,45	41.212,18	72.442,88	64.751,73	60.111,60	34.278,30	30.271,16	35.245,41
Outros Resíduos	t	1.919,64	2.958,37	1.811,07	4.783,14	4.399,53	2.533,75	2.236,74	911,06
Transporte Externo	t.Km	76.785,45	118.334,95	72.442,88	191.325,60	175.981,20	101.350,10	89.469,78	36.442,51

Fonte: Autoria Própria

Tabela 20 - Cenário 4 - Entradas de insumos e saídas de materiais da Unidade 1 – Manufatura, durante o período de 2015 a 2022

Entradas									
Recursos	Unidade	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Água	Kg	51.943,13	99.980,63	102.258,75	117.703,13	118.875,00	105.358,13	82.710,00	102.314,38
Energia Elétrica	KWh	48.336,90	46.738,76	61.785,18	55.364,26	54.415,68	53.242,48	43.435,36	50.364,51
GLP	Kg	2.580,00	1.560,00	2.115,00	3.645,00	1.845,00	1.785,00	1.545,00	1.725,00
Saídas									
Recicláveis	Unidade	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
ABS	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
Alumínio	(%)	-	-	-	-	0,67	0,55	0,24	0,09
Bateria	(%)	-	-	-	-	-	0,12	0,03	-
Cobre	(%)	-	-	-	-	0,35	0,23	0,13	0,01
HIPS	(%)	-	-	-	-	0,09	0,44	0,12	0,00
Madeira	(%)	18,04	19,77	38,86	34,67	19,41	16,88	16,48	14,70
Metal Ferroso	(%)	1,40	3,24	1,92	1,77	3,15	3,15	3,92	2,02
Outros Componentes	(%)	-	-	-	-	0,05	0,08	0,01	-
Outros Plásticos	(%)	10,93	10,89	10,82	0,29	2,93	2,74	5,36	4,66
Papelão	(%)	44,63	41,10	23,40	38,27	47,96	48,74	41,68	48,02
PCI	(%)	-	-	-	-	0,09	0,20	0,45	0,20
PE	(%)	-	-	-	-	-	-	5,59	5,20
PP	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
Vidro	(%)	-	-	-	-	0,29	1,88	0,98	0,09
Total Recicláveis	t	1.238,54	2.451,43	2.649,92	1.410,94	2.681,15	1.897,11	2.201,13	1.983,71
Transporte Externo	t.Km	43.648,29	60.745,39	53.961,13	38.080,17	53.143,04	33.381,56	39.512,02	38.331,09
Matéria Orgânica	ton	-	-	-	-	-	-	-	-
Transporte Externo	t.Km	-	-	-	-	-	-	-	-
Outros Resíduos	ton	1.091,21	1.518,63	1.349,03	952,00	1.328,58	834,54	987,80	958,28
Transporte Externo	t.Km	43.648,29	60.745,39	53.961,13	38.080,17	53.143,04	33.381,56	39.512,02	38.331,09

Fonte: Autoria Própria

Tabela 21 - Cenário 4 - Entradas de insumos e saídas de materiais da Unidade 2 – Logística Reversa, durante o período de 2015 a 2022

Entradas									
Recursos	Unidade	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Água	Kg	215.100,00	388.237,50	485.100,00	550.237,50	630.967,50	673.425,00	502.312,50	602.235,00
Energia Elétrica	KWh	169.822,58	164.507,67	179.716,39	190.532,25	241.267,84	172.420,47	203.728,39	205.805,79
GLP	Kg	825,60	499,20	676,80	1.166,40	582,73	573,30	308,83	488,29
Saídas									
Recicláveis	Unidade	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
ABS	(%)	2,78	2,25	4,59	4,84	12,68	3,42	2,43	2,92
Alumínio	(%)	0,68	1,01	1,58	0,42	0,46	0,39	0,19	0,09
Bateria	(%)	0,00	0,71	0,22	0,60	0,42	0,11	0,16	0,27
Cobre	(%)	1,09	1,32	0,81	1,17	1,30	0,77	0,59	0,86
HIPS	(%)	2,28	1,44	2,26	4,68	8,71	4,33	4,19	10,10
Madeira	(%)	10,04	3,63	1,28	1,96	2,08	1,96	2,62	1,35
Metal Ferroso	(%)	12,23	11,37	19,48	8,18	10,93	8,28	6,49	8,66
Outros Componentes	(%)	0,96	1,18	0,59	0,61	0,34	0,32	0,63	1,28
Outros Plásticos	(%)	9,12	3,95	3,73	4,59	10,98	5,75	3,82	3,64
Papelão	(%)	30,12	11,72	38,63	38,26	12,15	9,08	8,07	5,80
PCI	(%)	5,16	2,38	2,29	2,24	1,56	1,29	1,82	1,29
PE	(%)	0,02	0,01	0,04	0,05	0,02	0,00	0,00	0,00
PP	(%)	0,12	0,02	0,50	0,12	0,10	0,09	0,28	0,21
Vidro	(%)	0,41	0,50	0,37	0,35	0,59	0,28	0,57	0,16
Total Recicláveis	t	2.614,70	1.446,05	2.662,62	2.373,26	2.172,56	1.257,60	1.109,97	1.276,81
Transporte Externo	t.Km	41.922,73	21.931,49	36.941,24	33.108,27	31.144,20	17.510,35	15.471,58	18.221,25
Outros Resíduos	t	1.048,07	3.440,39	923,53	5.574,23	5.123,72	2.952,95	2.606,74	1.336,67
Transporte Externo	t.Km	41.922,73	137.615,65	36.941,24	222.969,07	204.948,60	118.118,05	104.269,41	53.466,67

Fonte: Autoria Própria

Tabela 22 - Cenário 6 - Entradas de insumos e saídas de materiais da Unidade 1 – Manufatura, durante o período de 2015 a 2022

Entradas									
Recursos	Unidade	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Água	Kg	69.257,50	133.307,50	136.345,00	156.937,50	158.500,00	140.477,50	110.280,00	136.419,17
Energia Elétrica	KWh	64.449,20	62.318,35	82.380,23	73.819,01	72.554,24	70.989,97	57.913,82	67.152,67
GLP	Kg	3.440,00	2.080,00	2.820,00	4.860,00	2.460,00	2.380,00	2.060,00	2.300,00
Saídas									
Recicláveis	Unidade	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
ABS	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
Alumínio	(%)	-	-	-	-	0,89	0,74	0,33	0,13
Bateria	(%)	-	-	-	-	-	0,16	0,05	-
Cobre	(%)	-	-	-	-	0,47	0,30	0,17	0,01
HIPS	(%)	-	-	-	-	0,13	0,58	0,16	0,00
Madeira	(%)	24,05	26,36	51,82	46,23	25,88	22,51	21,98	19,60
Metal Ferroso	(%)	1,87	4,32	2,57	2,36	4,20	4,20	5,23	2,69
Outros Componentes	(%)	-	-	-	-	0,07	0,10	0,01	-
Outros Plásticos	(%)	14,57	14,52	14,42	0,38	3,91	3,65	7,15	6,22
Papelão	(%)	59,51	54,80	31,19	51,03	63,94	64,98	55,58	64,03
PCI	(%)	-	-	-	-	0,12	0,26	0,60	0,27
PE	(%)	-	-	-	-	-	-	7,45	6,93
PP	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
Vidro	(%)	-	-	-	-	0,39	2,51	1,30	0,12
Total Recicláveis	t	1.651,39	3.268,58	3.533,23	1.881,26	3.574,86	2.529,48	2.934,84	2.644,95
Transporte Externo	t.Km	57.720,24	132.493,58	205.073,36	179.318,05	388.801,73	230.077,82	291.543,80	246.917,76
Matéria Orgânica	ton	470,28	340,30	274,90	319,09	290,95	109,31	177,86	192,71
Transporte Externo	t.Km	28.734,11	20.792,33	16.796,39	19.496,40	17.777,05	6.678,84	10.867,25	11.774,38
Outros Resíduos	ton	104,04	180,60	95,41	81,30	71,96	46,43	38,12	52,17
Transporte Externo	t.Km	4.161,60	7.223,80	3.816,40	3.252,00	2.878,20	1.857,20	1.524,60	2.086,67
Incineração	ton	104,04	180,60	95,41	81,30	71,96	46,43	38,12	52,17
Transporte Externo	t.Km	4.161,60	7.223,80	3.816,40	3.252,00	2.878,20	1.857,20	1.524,60	2.086,67

Fonte: Autoria Própria

Tabela 23 - Cenário 6 - Entradas de insumos e saídas de materiais da Unidade 2 – Logística Reversa, durante o período de 2015 a 2022

Entradas									
Recursos	Unidade	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Água	Kg	286.800,00	517.650,00	646.800,00	733.650,00	841.290,00	897.900,00	669.750,00	802.980,00
Energia Elétrica	KWh	226.430,10	219.343,56	239.621,85	254.043,00	321.690,45	229.893,96	271.637,85	274.407,72
GLP	Kg	1.100,80	665,60	902,40	1.555,20	776,98	764,40	411,77	651,05
Saídas									
Recicláveis	Unidade	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
ABS	(%)	3,71	5,42	6,01	7,12	20,35	9,49	7,63	7,99
Alumínio	(%)	0,91	2,43	2,06	0,62	0,74	1,09	0,58	0,24
Bateria	(%)	0,00	1,72	0,29	0,88	0,67	0,30	0,50	0,75
Cobre	(%)	1,45	3,19	1,06	1,72	2,08	2,12	1,85	2,36
HIPS	(%)	3,04	3,46	2,96	6,88	13,97	12,02	13,17	27,58
Madeira	(%)	13,38	8,74	1,68	2,88	3,34	5,43	8,22	3,69
Metal Ferroso	(%)	16,31	27,40	25,51	12,02	17,54	22,95	20,38	23,64
Outros Componentes	(%)	1,28	2,85	0,77	0,90	0,55	0,89	1,97	3,48
Outros Plásticos	(%)	12,16	9,51	4,88	6,75	17,62	15,93	11,98	9,93
Papelão	(%)	40,15	28,25	50,58	56,20	19,50	25,18	25,35	15,83
PCI	(%)	6,88	5,75	3,00	3,29	2,50	3,57	5,70	3,51
PE	(%)	0,03	0,02	0,06	0,07	0,03	-	0,01	-
PP	(%)	0,16	0,05	0,66	0,17	0,17	0,26	0,86	0,57
Vidro	(%)	0,54	1,21	0,48	0,51	0,95	0,79	1,78	0,44
Total Recicláveis	t	3.486,27	1.928,07	3.550,16	3.164,35	2.896,74	1.676,80	1.479,96	1.702,42
Transporte Externo	t.Km	532.691,66	152.081,59	678.312,60	692.516,40	1.350.018,99	239.707,38	141.463,50	154.508,24
Outros Resíduos	t	88,25	33,14	18,00	18,31	27,21	9,28	8,40	14,96
Transporte Externo	t.Km	3.530,00	1.325,40	719,80	732,40	1.088,40	371,20	336,00	598,55
Incineração	t	88,25	33,14	18,00	18,31	27,21	9,28	8,40	14,96
Transporte Externo	t.Km	3.530,00	1.325,40	719,80	732,40	1.088,40	371,20	336,00	598,55

Fonte: Autoria Própria

Tabela 24 - Cenário 7 - Entradas de insumos e saídas de materiais da Unidade 1 – Manufatura, durante o período de 2015 a 2022

Entradas									
Recursos	Unidade	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Água	Kg	69.257,50	133.307,50	136.345,00	156.937,50	158.500,00	140.477,50	110.280,00	136.419,17
Energia Elétrica	KWh	64.449,20	62.318,35	82.380,23	73.819,01	72.554,24	70.989,97	57.913,82	67.152,67
GLP	Kg	3.440,00	2.080,00	2.820,00	4.860,00	2.460,00	2.380,00	2.060,00	2.300,00
Saídas									
Recicláveis	Unidade	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
ABS	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
Alumínio	(%)	-	-	-	-	0,89	0,74	0,33	0,13
Bateria	(%)	-	-	-	-	-	0,16	0,05	-
Cobre	(%)	-	-	-	-	0,47	0,30	0,17	0,01
HIPS	(%)	-	-	-	-	0,13	0,58	0,16	0,00
Madeira	(%)	24,05	26,36	51,82	46,23	25,88	22,51	21,98	19,60
Metal Ferroso	(%)	1,87	4,32	2,57	2,36	4,20	4,20	5,23	2,69
Outros Componentes	(%)	-	-	-	-	0,07	0,10	0,01	-
Outros Plásticos	(%)	14,57	14,52	14,42	0,38	3,91	3,65	7,15	6,22
Papelão	(%)	59,51	54,80	31,19	51,03	63,94	64,98	55,58	64,03
PCI	(%)	-	-	-	-	0,12	0,26	0,60	0,27
PE	(%)	-	-	-	-	-	-	7,45	6,93
PP	(%)	-	-	-	-	-	-	-	-
Vidro	(%)	-	-	-	-	0,39	2,51	1,30	0,12
Total Recicláveis	t	1.651,39	3.268,58	3.533,23	1.881,26	3.574,86	2.529,48	2.934,84	2.644,95
Transporte Externo	t.Km	57.720,24	132.493,58	205.073,36	179.318,05	388.801,73	230.077,82	291.543,80	246.917,76
Matéria Orgânica	ton	470,28	340,30	274,90	319,09	290,95	109,31	177,86	192,71
Transporte Externo	t.Km	28.734,11	20.792,33	16.796,39	19.496,40	17.777,05	6.678,84	10.867,25	11.774,38
Outros Resíduos	ton	-	-	-	-	-	-	-	-
Transporte Externo	t.Km	-	-	-	-	-	-	-	-
Incineração	ton	208,08	361,19	190,82	162,60	143,91	92,86	76,23	104,33
Transporte Externo	t.Km	8.323,20	14.447,60	7.632,80	6.504,00	5.756,40	3.714,40	3.049,20	4.173,33

Fonte: Autoria Própria

Tabela 25 - Cenário 7 - Entradas de insumos e saídas de materiais da Unidade 2 – Logística Reversa, durante o período de 2015 a 2022

Entradas									
Recursos	Unidade	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Água	Kg	286.800,00	517.650,00	646.800,00	733.650,00	841.290,00	897.900,00	669.750,00	802.980,00
Energia Elétrica	KWh	226.430,10	219.343,56	239.621,85	254.043,00	321.690,45	229.893,96	271.637,85	274.407,72
GLP	Kg	1.100,80	665,60	902,40	1.555,20	776,98	764,40	411,77	651,05
Saídas									
Recicláveis	Unidade	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
ABS	(%)	3,71	5,42	6,01	7,12	20,35	9,49	7,63	7,99
Alumínio	(%)	0,91	2,43	2,06	0,62	0,74	1,09	0,58	0,24
Bateria	(%)	0,00	1,72	0,29	0,88	0,67	0,30	0,50	0,75
Cobre	(%)	1,45	3,19	1,06	1,72	2,08	2,12	1,85	2,36
HIPS	(%)	3,04	3,46	2,96	6,88	13,97	12,02	13,17	27,58
Madeira	(%)	13,38	8,74	1,68	2,88	3,34	5,43	8,22	3,69
Metal Ferroso	(%)	16,31	27,40	25,51	12,02	17,54	22,95	20,38	23,64
Outros Componentes	(%)	1,28	2,85	0,77	0,90	0,55	0,89	1,97	3,48
Outros Plásticos	(%)	12,16	9,51	4,88	6,75	17,62	15,93	11,98	9,93
Papelão	(%)	40,15	28,25	50,58	56,20	19,50	25,18	25,35	15,83
PCI	(%)	6,88	5,75	3,00	3,29	2,50	3,57	5,70	3,51
PE	(%)	0,03	0,02	0,06	0,07	0,03	-	0,01	-
PP	(%)	0,16	0,05	0,66	0,17	0,17	0,26	0,86	0,57
Vidro	(%)	0,54	1,21	0,48	0,51	0,95	0,79	1,78	0,44
Total Recicláveis	t	3.486,27	1.928,07	3.550,16	3.164,35	2.896,74	1.676,80	1.479,96	1.702,42
Transporte Externo	t.Km	532.691,66	152.081,59	678.312,60	692.516,40	1.350.018,99	239.707,38	141.463,50	154.508,24
Outros Resíduos	t	-	-	-	-	-	-	-	-
Transporte Externo	t.Km	-	-	-	-	-	-	-	-
Incineração	t	176,50	66,27	35,99	36,62	54,42	18,56	16,80	29,93
Transporte Externo	t.Km	7.060,00	2.650,80	1.439,60	1.464,80	2.176,80	742,40	672,00	1.197,09

Fonte: Autoria Própria

APÊNDICE F – ANÁLISE DOS PROCESSOS DE CONTRIBUIÇÃO DAS CATEGORIAS DE IMPACTO ESTUDADOS NO PARQUE FABRIL, CENÁRIO ATUAL AO LONGO DOS ANOS 2015-2022

Tabela 26 - Processos de contribuição da categoria de impacto Aquecimento Global – cenário atual C5

No Process	Unit	Total	Unidade 2 - Logística Reversa										Unidade 1 - Manufatura									
			2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2015	2016	2017	2022
Total of all processes	kg CO2 eq	-16,4381	-8,8042	-12,8671	-19,8292	6,2830	38,4826	3,9145	3,1695	0,1345	-5,4235	-12,2388	-1,7848	8,4127	-5,0580	-3,4827	-5,0564	-2,2903				
1 Compost {RoW} treatment of biowaste, indust	kg CO2 eq	-2,7348	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-0,5957	-0,4311	-0,3482	-0,4042	-0,3686	-0,1176	-0,2253	-0,2441				
2 Electricity, low voltage {BR-South-eastern grid}	kg CO2 eq	16,2948	1,2249	1,1865	1,2962	3,9687	1,7402	1,2436	1,4694	1,4844	0,3486	0,0342	0,4456	0,3993	0,3925	0,3840	0,3133	0,3633				
3 Electricity, medium voltage {GLO} market gro	kg CO2 eq	25,2163	2,8429	1,1665	0,7071	0,7290	0,7156	0,7683	0,7300	1,0341	2,2188	4,3774	4,6999	0,0661	0,9912	0,7173	1,9354	1,5167				
4 EoL, Small Household Elec Equip. ABS-PC	kg CO2 eq	32,7418	1,0979	0,9742	2,8135	4,7708	11,2160	5,6861	3,8663	2,3169	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000				
5 EoL, Small Household Elec Equip. ABS with	kg CO2 eq	81,1094	6,2772	5,0755	10,3624	10,9380	28,6391	7,7283	5,4843	6,6046	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000				
6 EoL, Small Household Elec Equip. Aluminium	kg CO2 eq	-41,8746	-4,6265	-6,8222	-10,6724	-2,8750	-3,1082	-2,6710	-1,2605	-0,5989	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-4,6484	-2,7118	-1,3945	-0,4852				
7 EoL, Small Household Elec Equip. Copper, S	kg CO2 eq	-22,8171	-2,8997	-3,5315	-2,1712	-3,1232	-3,4633	-2,0459	-1,5696	-2,3097	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-0,9578	-0,4395	-0,2844	-0,0213				
8 EoL, Small Household Elec Equip. Glass, S	kg CO2 eq	0,8185	0,0574	0,0712	0,0522	0,0494	0,0840	0,0400	0,0803	0,0225	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0424	0,1932	0,1162	0,0098				
9 EoL, Small Household Elec Equip. PCB Supl	kg CO2 eq	19,4973	5,3518	2,4748	2,3776	2,3211	1,6178	1,3363	1,8842	1,3343	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0978	0,1485	0,3923	0,1610				
10 EoL, Small Household Elec Equip. PE within	kg CO2 eq	7,1882	0,0200	0,0077	0,0364	0,0387	0,0156	0,0000	0,0028	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000				
11 EoL, Small Household Elec Equip. PP with B	kg CO2 eq	3,3807	0,2785	0,0475	1,1813	0,2750	0,2426	0,2174	0,6460	0,4924	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000				
12 EoL, Small Household Elec Equip. PS with B	kg CO2 eq	25,0184	4,8325	1,8422	1,7000	1,3127	9,3222	2,8223	0,4852	0,1851	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,7332	0,7831	0,0000	0,0000				
13 EoL, Small Household Elec Equip. Steel, Sul	kg CO2 eq	-119,9030	-14,3012	-13,2868	-22,7718	-9,5640	-12,7758	-9,6766	-7,5856	-10,1210	-0,7758	-3,5478	-2,2791	-1,1160	-3,7791	-2,6731	-3,8613	-1,7880				
14 EoL, Small Household Elec Equip. Wood, S	kg CO2 eq	84,7724	5,0869	1,8374	0,6504	0,9945	1,0536	0,9922	1,3262	0,6844	4,3301	9,3953	19,9611	9,4823	10,0863	6,2067	7,0332	5,6521				
15 Liquefied petroleum gas {BR} market for liquef	kg CO2 eq	0,3875	0,0146	0,0088	0,0120	0,0206	0,0103	0,0101	0,0055	0,0086	0,0456	0,0276	0,0374	0,0644	0,0326	0,0316	0,0273	0,0305				
16 Municipal solid waste {RoW} treatment of, sar	kg CO2 eq	29,0817	2,8651	1,0757	0,5842	0,5944	0,8834	0,3013	0,2727	0,4858	3,3777	5,8631	3,0975	2,6394	2,3360	1,7744	1,2374	1,6936				
17 Non-Fe-Co-metals, from Li-ion battery, hydrom	kg CO2 eq	6,7583	0,0000	1,8500	0,5682	1,5509	1,0856	0,2768	0,4144	0,7136	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,2237	0,0749	0,0000				
18 Polyethylene terephthalate, granulate, bottle g	kg CO2 eq	-30,6256	-3,4528	-1,4168	-0,8587	-0,8854	-0,8692	-0,9331	-0,8866	-1,2559	-2,6948	-5,3164	-5,7081	-0,0803	-1,2038	-0,8712	-2,3505	-1,8420				
19 Polyethylene, high density, granulate {RER} p	kg CO2 eq	-54,4672	-6,1407	-2,5197	-1,5272	-1,5747	-1,5458	-1,6595	-1,5768	-2,2336	-4,7927	-9,4551	-10,1518	-0,1428	-2,1410	-1,5494	-4,1804	-3,2760				
20 Polypropylene, granulate {RER} production A	kg CO2 eq	-31,2184	-3,5196	-1,4442	-0,8754	-0,9025	-0,8860	-0,9512	-0,9038	-1,2802	-2,7470	-5,4193	-5,8186	-0,0819	-1,2271	-0,8880	-2,3960	-1,8777				
21 Polystyrene, general purpose {RER} productio	kg CO2 eq	-10,9996	-1,2401	-0,5089	-0,3084	-0,3180	-0,3122	-0,3351	-0,3184	-0,4511	-0,9679	-1,9095	-2,0501	-0,0288	-0,4324	-0,3129	-0,8442	-0,6616				
22 Polyvinylchloride, bulk polymerised {RER} pol	kg CO2 eq	-0,7584	-0,0855	-0,0351	-0,0213	-0,0219	-0,0215	-0,0231	-0,0220	-0,0311	-0,0667	-0,1317	-0,1414	-0,0020	-0,0298	-0,0216	-0,0582	-0,0456				
23 Polyvinylchloride, emulsion polymerised {RER}	kg CO2 eq	-0,4252	-0,0479	-0,0197	-0,0119	-0,0123	-0,0121	-0,0130	-0,0123	-0,0174	-0,0374	-0,0738	-0,0793	-0,0011	-0,0167	-0,0121	-0,0326	-0,0256				
24 Polyvinylchloride, suspension polymerised {RE}	kg CO2 eq	-3,8086	-0,4294	-0,1762	-0,1068	-0,1101	-0,1081	-0,1160	-0,1103	-0,1562	-0,3351	-0,6612	-0,7099	-0,0100	-0,1497	-0,1083	-0,2923	-0,2291				
25 Sulfate pulp, unbleached {RER} sulfate pulp pi	kg CO2 eq	-58,3430	-4,2450	-1,6514	-5,4448	-5,3923	-1,7127	-1,2802	-1,1378	-0,8173	-2,9802	-5,4314	-3,3422	-2,9111	-6,9313	-4,9843	-4,9460	-5,1351				
26 Tap water {BR} market for tap water APOS, f	kg CO2 eq	0,0880	0,0042	0,0076	0,0096	0,0038	0,0124	0,0133	0,0099	0,0119	0,0010	0,0020	0,0020	0,0023	0,0023	0,0021	0,0016	0,0020				
27 Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EUR	kg CO2 eq	15,3736	1,4120	0,4048	1,7782	1,8154	3,5373	0,6290	0,3718	0,4064	0,2479	0,4388	0,6004	0,5371	1,0787	0,6291	0,7991	0,6877				
28 Waste polystyrene {BR} market for waste pol	kg CO2 eq	13,8099	0,8183	0,5148	0,8114	1,6794	3,1216	1,5544	1,5041	3,6213	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0347	0,1135	0,0363	0,0000				

Fonte: Adaptado Software

Tabela 27 - Processos de contribuição da categoria de impacto Depleção da Camada de Ozônio – cenário atual C5

No Process	Unit	Total	Unidade 2 - Logística Reversa								Unidade 1 - Manufatura							
			2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Total of all processes	kg CFC11 eq	-0,00016601	-0,00002363	-0,00001583	-0,00000540	0,00000423	0,00001982	-0,00000031	-0,00000033	-0,00000662	-0,00002102	-0,00003924	-0,00003313	0,00000159	-0,00001250	-0,00000738	-0,00001494	-0,00001132
1 Compost (RoW) treatment of biowaste, indust	kg CFC11 eq	-0,00001526	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	-0,00000332	-0,00000241	-0,00000194	-0,00000226	-0,00000206	-0,00000066	-0,00000126	-0,00000136
2 Electricity, low voltage (BR-South-eastern grid)	kg CFC11 eq	0,00005792	0,00000435	0,00000422	0,00000461	0,00001411	0,00000619	0,00000442	0,00000522	0,00000528	0,00000124	0,00000012	0,00000158	0,00000142	0,00000140	0,00000136	0,00000111	0,00000129
3 Electricity, medium voltage (GLO) market gro	kg CFC11 eq	0,00001022	0,00000115	0,00000047	0,00000029	0,00000030	0,00000029	0,00000031	0,00000030	0,00000042	0,00000090	0,00000177	0,00000191	0,00000003	0,00000040	0,00000029	0,00000078	0,00000061
4 EoL, Small Household Elec Equip. ABS-PC v	kg CFC11 eq	0,00002156	0,00000072	0,00000064	0,00000185	0,00000314	0,00000739	0,00000374	0,00000255	0,00000153	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000
5 EoL, Small Household Elec Equip. ABS with	kg CFC11 eq	0,00005629	0,00000436	0,00000352	0,00000719	0,00000759	0,00001988	0,00000536	0,00000381	0,00000458	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000
6 EoL, Small Household Elec Equip. Aluminium	kg CFC11 eq	-0,00000666	-0,00000074	-0,00000108	-0,00000170	-0,00000046	-0,00000049	-0,00000042	-0,00000020	-0,00000010	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	-0,00000074	-0,00000043	-0,00000022	-0,00000008
7 EoL, Small Household Elec Equip. Copper, S	kg CFC11 eq	-0,00009374	-0,00001191	-0,00001451	-0,00000892	-0,00001283	-0,00001423	-0,00000841	-0,00000645	-0,00000949	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	-0,00000393	-0,00000181	-0,00000117	-0,00000009
8 EoL, Small Household Elec Equip. Glass, Su	kg CFC11 eq	0,00000047	0,00000003	0,00000004	0,00000003	0,00000003	0,00000005	0,00000002	0,00000005	0,00000001	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000002	0,00000011	0,00000007	0,00000001
9 EoL, Small Household Elec Equip. PCB Supp	kg CFC11 eq	0,00000725	0,00000199	0,00000092	0,00000088	0,00000086	0,00000060	0,00000050	0,00000070	0,00000050	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000004	0,00000006	0,00000015	0,00000006
10 EoL, Small Household Elec Equip. PE withi	kg CFC11 eq	0,00000606	0,00000002	0,00000001	0,00000003	0,00000003	0,00000001	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000
11 EoL, Small Household Elec Equip. PP with B	kg CFC11 eq	0,00000272	0,00000022	0,00000004	0,00000095	0,00000022	0,00000020	0,00000017	0,00000052	0,00000040	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000
12 EoL, Small Household Elec Equip. PS with B	kg CFC11 eq	0,00001742	0,00000336	0,00000128	0,00000118	0,00000091	0,00000649	0,00000196	0,00000034	0,00000013	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000121	0,00000055	0,00000000	0,00000000
13 EoL, Small Household Elec Equip. Steel, Sut	kg CFC11 eq	-0,00001434	-0,00000171	-0,00000159	-0,00000272	-0,00000114	-0,00000153	-0,00000116	-0,00000091	-0,00000121	-0,00000009	-0,00000042	-0,00000027	-0,00000013	-0,00000045	-0,00000032	-0,00000046	-0,00000021
14 EoL, Small Household Elec Equip. Wood, Su	kg CFC11 eq	0,00004337	0,00000260	0,00000094	0,00000033	0,00000051	0,00000054	0,00000051	0,00000068	0,00000035	0,00000222	0,00000481	0,00001021	0,00000485	0,00000516	0,00000318	0,00000360	0,00000289
15 Liquefied petroleum gas (BR) market for liqu	kg CFC11 eq	0,00000041	0,00000002	0,00000001	0,00000001	0,00000002	0,00000001	0,00000001	0,00000001	0,00000001	0,00000005	0,00000003	0,00000004	0,00000007	0,00000003	0,00000003	0,00000003	0,00000003
16 Municipal solid waste (RoW) treatment of, sa	kg CFC11 eq	0,00000203	0,00000020	0,00000008	0,00000004	0,00000004	0,00000006	0,00000002	0,00000002	0,00000003	0,00000024	0,00000041	0,00000022	0,00000018	0,00000016	0,00000012	0,00000009	0,00000012
17 Non-Fe-Co-metals, from Li-ion battery, hydrom	kg CFC11 eq	0,00000280	0,00000000	0,00000077	0,00000024	0,00000064	0,00000045	0,00000011	0,00000017	0,00000030	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000009	0,00000003	0,00000000
18 Polyethylene terephthalate, granulate, bottle	kg CFC11 eq	-0,00021422	-0,00002415	-0,00000991	-0,00000601	-0,00000619	-0,00000608	-0,00000653	-0,00000620	-0,00000878	-0,00001885	-0,00003719	-0,00003993	-0,00000056	-0,00000842	-0,00000609	-0,00001644	-0,00001288
19 Polyethylene, high density, granulate (RER)	kg CFC11 eq	-0,00000743	-0,00000084	-0,00000034	-0,00000021	-0,00000021	-0,00000021	-0,00000023	-0,00000021	-0,00000030	-0,00000065	-0,00000129	-0,00000138	-0,00000002	-0,00000029	-0,00000021	-0,00000057	-0,00000045
20 Polypropylene, granulate (RER) production	kg CFC11 eq	-0,00000244	-0,00000028	-0,00000011	-0,00000007	-0,00000007	-0,00000007	-0,00000007	-0,00000007	-0,00000010	-0,00000022	-0,00000042	-0,00000046	-0,00000001	-0,00000010	-0,00000007	-0,00000019	-0,00000015
21 Polyvinylchloride, bulk polymerised (RER)	kg CFC11 eq	-0,00000057	-0,00000006	-0,00000003	-0,00000002	-0,00000002	-0,00000002	-0,00000002	-0,00000002	-0,00000002	-0,00000005	-0,00000010	-0,00000011	0,00000000	-0,00000002	-0,00000002	-0,00000004	-0,00000003
22 Polyvinylchloride, emulsion polymerised (RER)	kg CFC11 eq	-0,00000034	-0,00000004	-0,00000002	-0,00000001	-0,00000001	-0,00000001	-0,00000001	-0,00000001	-0,00000001	-0,00000003	-0,00000006	-0,00000006	0,00000000	-0,00000001	-0,00000001	-0,00000003	-0,00000002
23 Polyvinylchloride, suspension polymerised (RE	kg CFC11 eq	-0,00000352	-0,00000040	-0,00000016	-0,00000010	-0,00000010	-0,00000010	-0,00000011	-0,00000010	-0,00000014	-0,00000031	-0,00000061	-0,00000066	-0,00000001	-0,00000014	-0,00000010	-0,00000027	-0,00000021
24 Sulfate pulp, unbleached (RER) sulfate pulp	kg CFC11 eq	-0,00004333	-0,00000315	-0,00000123	-0,00000404	-0,00000401	-0,00000127	-0,00000095	-0,00000085	-0,00000061	-0,00000221	-0,00000403	-0,00000248	-0,00000216	-0,00000515	-0,00000370	-0,00000367	-0,00000381
25 Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EUR	kg CFC11 eq	0,00000552	0,00000051	0,00000015	0,00000064	0,00000065	0,00000127	0,00000023	0,00000013	0,00000015	0,00000009	0,00000016	0,00000022	0,00000019	0,00000039	0,00000023	0,00000029	0,00000025
26 Waste polystyrene (BR) market for waste poly	kg CFC11 eq	0,00000178	0,00000011	0,00000007	0,00000010	0,00000022	0,00000040	0,00000020	0,00000019	0,00000047	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000001	0,00000000	0,00000000

Fonte: Adaptado Software

Tabela 28 - Processos de contribuição da categoria de impacto Eutrofização da Água Doce – cenário atual C5

No Process	Unit	Total	Unidade 2 - Logística Reversa								Unidade 1 - Manufatura							
			2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Total of all processes	kg P eq	0,4632	-0,0036	-0,0366	-0,0014	0,0481	0,1469	0,0639	0,0708	0,2043	0,0030	0,0047	0,0007	0,0024	-0,0219	-0,0040	-0,0093	-0,0047
1 Compost {RoW} treatment of biowaste, indust	kg P eq	-0,0058	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0013	-0,0009	-0,0007	-0,0009	-0,0008	-0,0002	-0,0005	-0,0005
2 Electricity, low voltage {BR-South-eastern grid}	kg P eq	0,0021	0,0002	0,0002	0,0002	0,0005	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0000	0,0000	0,0001	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000
3 Electricity, medium voltage {GLO} market gro	kg P eq	0,0125	0,0014	0,0006	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0005	0,0011	0,0022	0,0023	0,0000	0,0005	0,0004	0,0010	0,0008
4 EoL, Small Household Elec Equip. Copper, S	kg P eq	-0,4392	-0,0558	-0,0680	-0,0418	-0,0601	-0,0667	-0,0394	-0,0302	-0,0445	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0184	-0,0085	-0,0055	-0,0004
5 EoL, Small Household Elec Equip. PCB Supr	kg P eq	0,0015	0,0004	0,0002	0,0002	0,0002	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
6 EoL, Small Household Elec Equip. Steel, Sut	kg P eq	-0,0560	-0,0067	-0,0062	-0,0106	-0,0045	-0,0060	-0,0045	-0,0035	-0,0047	-0,0004	-0,0017	-0,0011	-0,0005	-0,0018	-0,0012	-0,0018	-0,0008
7 EoL, Small Household Elec Equip. Wood, Su	kg P eq	0,0026	0,0002	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0003	0,0006	0,0003	0,0003	0,0002	0,0002	0,0002
8 Municipal solid waste {RoW} treatment of, sar	kg P eq	0,0848	0,0084	0,0031	0,0017	0,0017	0,0026	0,0009	0,0008	0,0014	0,0098	0,0171	0,0090	0,0077	0,0068	0,0052	0,0036	0,0049
9 Non-Fe-Co-metals, from Li-ion battery, hydrom	kg P eq	0,0035	0,0000	0,0010	0,0003	0,0008	0,0006	0,0001	0,0002	0,0004	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000
10 Polyethylene terephthalate, granulate, bottle gi	kg P eq	-0,0081	-0,0009	-0,0004	-0,0002	-0,0002	-0,0002	-0,0002	-0,0002	-0,0003	-0,0007	-0,0014	-0,0015	0,0000	-0,0003	-0,0002	-0,0006	-0,0005
11 Polyethylene, high density, granulate {RER} p	kg P eq	-0,0097	-0,0011	-0,0005	-0,0003	-0,0003	-0,0003	-0,0003	-0,0003	-0,0004	-0,0009	-0,0017	-0,0018	0,0000	-0,0004	-0,0003	-0,0007	-0,0006
12 Polypropylene, granulate {RER} production A	kg P eq	-0,0048	-0,0005	-0,0002	-0,0001	-0,0001	-0,0001	-0,0001	-0,0001	-0,0002	-0,0004	-0,0008	-0,0009	0,0000	-0,0002	-0,0001	-0,0004	-0,0003
13 Polyvinylchloride, suspension polymerised {RE	kg P eq	-0,0016	-0,0002	-0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0001	-0,0001	-0,0003	-0,0003	0,0000	-0,0001	0,0000	-0,0001	-0,0001
14 Sulfate pulp, unbleached {RER} sulfate pulp pr	kg P eq	-0,0858	-0,0062	-0,0024	-0,0080	-0,0079	-0,0025	-0,0019	-0,0017	-0,0012	-0,0044	-0,0080	-0,0049	-0,0043	-0,0102	-0,0073	-0,0073	-0,0075
15 Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURC	kg P eq	0,0020	0,0002	0,0001	0,0002	0,0002	0,0005	0,0001	0,0000	0,0001	0,0000	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
16 Waste polystyrene {BR} market for waste poly	kg P eq	0,9647	0,0572	0,0360	0,0567	0,1173	0,2181	0,1086	0,1051	0,2530	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0024	0,0079	0,0025	0,0000

Fonte: Adaptado Software

Tabela 29 - Processos de contribuição da categoria de impacto Toxicidade Humana Cancerígena – cenário atual C5

			Unidade 2 - Logística Reversa									Unidade 1 - Manufatura							
No	Process	Unit	Total	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
	Total of all processes	kg 1,4-DCB	-34,1542	-3,7919	-3,4146	-4,7349	-2,8768	-3,0904	-2,3206	-1,7786	-2,4350	-0,7618	-1,7593	-1,3921	-0,4085	-1,7514	-1,1357	-1,4781	-1,0244
1	Compost {RoW} treatment of biowaste, indust	kg 1,4-DCB	-0,1780	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0388	-0,0281	-0,0227	-0,0263	-0,0240	-0,0077	-0,0147	-0,0159
2	Electricity, low voltage {BR-South-eastern grid	kg 1,4-DCB	0,5971	0,0449	0,0435	0,0475	0,1454	0,0638	0,0456	0,0538	0,0544	0,0128	0,0013	0,0163	0,0146	0,0144	0,0141	0,0115	0,0133
3	Electricity, medium voltage {GLO} market gro	kg 1,4-DCB	1,0413	0,1174	0,0482	0,0292	0,0301	0,0296	0,0317	0,0301	0,0427	0,0916	0,1808	0,1941	0,0027	0,0409	0,0296	0,0799	0,0626
4	EoL, Small Household Elec Equip. ABS with	kg 1,4-DCB	0,0503	0,0039	0,0031	0,0064	0,0068	0,0178	0,0048	0,0034	0,0041	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	EoL, Small Household Elec Equip. Copper, ξ	kg 1,4-DCB	-8,3575	-1,0621	-1,2935	-0,7953	-1,1440	-1,2686	-0,7494	-0,5749	-0,8460	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-0,3508	-0,1610	-0,1042	-0,0078
6	EoL, Small Household Elec Equip. PCB Sup	kg 1,4-DCB	0,8547	0,2346	0,1085	0,1042	0,1018	0,0709	0,0586	0,0826	0,0585	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0043	0,0065	0,0172	0,0071
7	EoL, Small Household Elec Equip. Steel, Su	kg 1,4-DCB	-18,5202	-2,2090	-2,0523	-3,5173	-1,4772	-1,9733	-1,4946	-1,1717	-1,5633	-0,1198	-0,5480	-0,3520	-0,1724	-0,5837	-0,4129	-0,5964	-0,2762
8	EoL, Small Household Elec Equip. Wood, St	kg 1,4-DCB	0,2127	0,0128	0,0046	0,0016	0,0025	0,0026	0,0025	0,0033	0,0017	0,0109	0,0236	0,0501	0,0238	0,0253	0,0156	0,0177	0,0142
9	Municipal solid waste {RoW} treatment of, sai	kg 1,4-DCB	0,6327	0,0623	0,0234	0,0127	0,0129	0,0192	0,0066	0,0059	0,0106	0,0735	0,1275	0,0674	0,0574	0,0508	0,0386	0,0269	0,0368
10	Non-Fe-Co-metals, from Li-ion battery, hydron	kg 1,4-DCB	0,3740	0,0000	0,1024	0,0314	0,0858	0,0601	0,0153	0,0229	0,0395	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0124	0,0041	0,0000
11	Polyethylene terephthalate, granulate, bottle	g kg 1,4-DCB	-1,6496	-0,1860	-0,0763	-0,0463	-0,0477	-0,0468	-0,0503	-0,0478	-0,0676	-0,1452	-0,2864	-0,3075	-0,0043	-0,0648	-0,0469	-0,1266	-0,0992
12	Polyethylene, high density, granulate {RER}	g kg 1,4-DCB	-2,2496	-0,2536	-0,1041	-0,0631	-0,0650	-0,0638	-0,0685	-0,0651	-0,0923	-0,1979	-0,3905	-0,4193	-0,0059	-0,0884	-0,0640	-0,1727	-0,1353
13	Polypropylene, granulate {RER} production	g kg 1,4-DCB	-1,0029	-0,1131	-0,0464	-0,0281	-0,0290	-0,0285	-0,0306	-0,0290	-0,0411	-0,0882	-0,1741	-0,1869	-0,0026	-0,0394	-0,0285	-0,0770	-0,0603
14	Polystyrene, general purpose {RER} productic	kg 1,4-DCB	-0,1670	-0,0188	-0,0077	-0,0047	-0,0048	-0,0047	-0,0051	-0,0048	-0,0069	-0,0147	-0,0290	-0,0311	-0,0004	-0,0066	-0,0048	-0,0128	-0,0100
15	Polyvinylchloride, bulk polymerised {RER}	pol kg 1,4-DCB	-0,0437	-0,0049	-0,0020	-0,0012	-0,0013	-0,0012	-0,0013	-0,0013	-0,0018	-0,0038	-0,0076	-0,0082	-0,0001	-0,0017	-0,0012	-0,0034	-0,0026
16	Polyvinylchloride, suspension polymerised {R	kg 1,4-DCB	-0,2555	-0,0288	-0,0118	-0,0072	-0,0074	-0,0073	-0,0078	-0,0074	-0,0105	-0,0225	-0,0444	-0,0476	-0,0007	-0,0100	-0,0073	-0,0196	-0,0154
17	Sulfate pulp, unbleached {RER} sulfate pulp	p kg 1,4-DCB	-6,4811	-0,4716	-0,1834	-0,6048	-0,5990	-0,1903	-0,1422	-0,1264	-0,0908	-0,3311	-0,6034	-0,3713	-0,3234	-0,7700	-0,5537	-0,5494	-0,5704
18	Tap water {BR} market for tap water APOS,	kg 1,4-DCB	0,0767	0,0037	0,0067	0,0083	0,0033	0,0108	0,0116	0,0086	0,0103	0,0009	0,0017	0,0018	0,0020	0,0020	0,0018	0,0014	0,0018
19	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EUR	kg 1,4-DCB	0,7407	0,0680	0,0195	0,0857	0,0875	0,1704	0,0303	0,0179	0,0196	0,0119	0,0211	0,0289	0,0259	0,0520	0,0303	0,0385	0,0331
20	Waste polystyrene {BR} market for waste pol	kg 1,4-DCB	0,1628	0,0096	0,0061	0,0096	0,0198	0,0368	0,0183	0,0177	0,0427	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0004	0,0013	0,0004	0,0000

Fonte: Adaptado *Software*

Tabela 30 - Processos de contribuição da categoria de impacto Acidificação Terrestre – cenário atual C5

No Process	Unit	Total	Unidade 2 - Logística Reversa								Unidade 1 - Manufatura							
			2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Total of all processes	kg SO2 eq	-3,1669	-0,2949	-0,4495	-0,3368	-0,3669	-0,3954	-0,2552	-0,1657	-0,2875	-0,0419	-0,0830	-0,0581	-0,0148	-0,1935	-0,0990	-0,0810	-0,0436
1 Compost {RoW} treatment of biowaste, indus	kg SO2 eq	-0,0253	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0055	-0,0040	-0,0032	-0,0037	-0,0034	-0,0011	-0,0021	-0,0023
2 Electricity, low voltage {BR-South-eastern gric	kg SO2 eq	0,0655	0,0049	0,0048	0,0052	0,0160	0,0070	0,0050	0,0059	0,0060	0,0014	0,0001	0,0018	0,0016	0,0016	0,0015	0,0013	0,00146
3 Electricity, medium voltage {GLO} market gric	kg SO2 eq	0,0841	0,0095	0,0039	0,0024	0,0024	0,0024	0,0026	0,0024	0,0034	0,0074	0,0146	0,0157	0,0002	0,0033	0,0024	0,0065	0,005058
4 EoL, Small Household Elec Equip. ABS-PC	kg SO2 eq	0,0346	0,0012	0,0010	0,0030	0,0050	0,0118	0,0060	0,0041	0,0024	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0
5 EoL, Small Household Elec Equip. ABS with	kg SO2 eq	0,0810	0,0063	0,0051	0,0104	0,0109	0,0286	0,0077	0,0055	0,0066	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0
6 EoL, Small Household Elec Equip. Aluminui	kg SO2 eq	-0,1702	-0,0188	-0,0277	-0,0434	-0,0117	-0,0126	-0,0109	-0,0051	-0,0024	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0189	-0,0110	-0,0057	-0,00197
7 EoL, Small Household Elec Equip. Copper, 'l	kg SO2 eq	-2,9592	-0,3761	-0,4580	-0,2816	-0,4051	-0,4492	-0,2653	-0,2036	-0,2995	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-0,1242	-0,0570	-0,0369	-0,00276
8 EoL, Small Household Elec Equip. Glass, S	kg SO2 eq	0,0084	0,0006	0,0007	0,0005	0,0005	0,0009	0,0004	0,0008	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0004	0,0020	0,0012	0,0001
9 EoL, Small Household Elec Equip. PCB Sup	kg SO2 eq	0,6466	0,1775	0,0821	0,0788	0,0770	0,0537	0,0443	0,0625	0,0442	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0032	0,0049	0,0130	0,005339
10 EoL, Small Household Elec Equip. PE withir	kg SO2 eq	0,0048	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0026	0,002169
11 EoL, Small Household Elec Equip. PP with l	kg SO2 eq	0,0036	0,0003	0,0001	0,0013	0,0003	0,0003	0,0002	0,0007	0,0005	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0
12 EoL, Small Household Elec Equip. PS with l	kg SO2 eq	0,0241	0,0047	0,0018	0,0016	0,0013	0,0090	0,0027	0,0005	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0017	0,0008	0,0000	0
13 EoL, Small Household Elec Equip. Steel, Sl	kg SO2 eq	-0,4290	-0,0512	-0,0475	-0,0815	-0,0342	-0,0457	-0,0346	-0,0271	-0,0362	-0,0028	-0,0127	-0,0082	-0,0040	-0,0135	-0,0096	-0,0138	-0,0064
14 EoL, Small Household Elec Equip. Wood, S	kg SO2 eq	0,0642	0,0039	0,0014	0,0005	0,0008	0,0008	0,0008	0,0010	0,0005	0,0033	0,0071	0,0151	0,0072	0,0076	0,0047	0,0053	0,004278
15 Municipal solid waste {RoW} treatment of, sa	kg SO2 eq	0,0044	0,0004	0,0002	0,0001	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000	0,0001	0,0005	0,0009	0,0005	0,0004	0,0004	0,0003	0,0002	0,000255
16 Non-Fe-Co-metals, from Li-ion battery, hydron	kg SO2 eq	0,0240	0,0000	0,0066	0,0020	0,0055	0,0038	0,0010	0,0015	0,0025	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0008	0,0003	0
17 Polyethylene terephthalate, granulate, bottle	kg SO2 eq	-0,0850	-0,0096	-0,0039	-0,0024	-0,0025	-0,0024	-0,0026	-0,0025	-0,0035	-0,0075	-0,0148	-0,0158	-0,0002	-0,0033	-0,0024	-0,0065	-0,00511
18 Polyethylene, high density, granulate {RER}	kg SO2 eq	-0,1306	-0,0147	-0,0060	-0,0037	-0,0038	-0,0037	-0,0040	-0,0038	-0,0054	-0,0115	-0,0227	-0,0243	-0,0003	-0,0051	-0,0037	-0,0100	-0,00785
19 Polypropylene, granulate {RER} production	kg SO2 eq	-0,0728	-0,0082	-0,0034	-0,0020	-0,0021	-0,0021	-0,0022	-0,0021	-0,0030	-0,0064	-0,0126	-0,0136	-0,0002	-0,0029	-0,0021	-0,0056	-0,00438
20 Polystyrene, general purpose {RER} producti	kg SO2 eq	-0,0265	-0,0030	-0,0012	-0,0007	-0,0008	-0,0008	-0,0008	-0,0008	-0,0011	-0,0023	-0,0046	-0,0049	-0,0001	-0,0010	-0,0008	-0,0020	-0,00159
21 Polyvinylchloride, suspension polymerised {Rl	kg SO2 eq	-0,0113	-0,0013	-0,0005	-0,0003	-0,0003	-0,0003	-0,0003	-0,0003	-0,0005	-0,0010	-0,0020	-0,0021	0,0000	-0,0004	-0,0003	-0,0009	-0,00068
22 Sulfate pulp, unbleached {RER} sulfate pulp	kg SO2 eq	-0,3607	-0,0262	-0,0102	-0,0337	-0,0333	-0,0106	-0,0079	-0,0070	-0,0051	-0,0184	-0,0336	-0,0207	-0,0180	-0,0429	-0,0308	-0,0306	-0,03175
23 Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EUR	kg SO2 eq	0,0556	0,0051	0,0015	0,0064	0,0066	0,0128	0,0023	0,0013	0,0015	0,0009	0,0016	0,0022	0,0019	0,0039	0,0023	0,0029	0,002487
24 Waste polystyrene {BR} market for waste pol	kg SO2 eq	0,0035	0,0002	0,0001	0,0002	0,0004	0,0008	0,0004	0,0004	0,0009	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0

Fonte: Adaptado Software

Tabela 31 - Processos de contribuição da categoria de impacto Uso da Terra – cenário atual C5

No Process	Unit	Total	Unidade 2 - Logística Reversa								Unidade 1 - Manufatura							
			2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Total of all processes	m2a crop eq	-563,2168	-40,8186	-16,0533	-52,4189	-51,3071	-16,5777	-12,4146	-10,8694	-7,8357	-29,1777	-52,7096	-32,4981	-28,2526	-66,9935	-47,9815	-47,7684	-49,5402
1 Compost (RoW) treatment of biowaste, indust	m2a crop eq	-2,5853	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-0,5631	-0,4075	-0,3292	-0,3821	-0,3484	-0,1112	-0,2130	-0,2308
2 Electricity, low voltage (BR-South-eastern grid	m2a crop eq	3,2530	0,2445	0,2369	0,2588	0,7923	0,3474	0,2483	0,2933	0,2963	0,0696	0,0068	0,0890	0,0797	0,0784	0,0767	0,0625	0,0725
3 EoL, Small Household Elec Equip. ABS-PC	m2a crop eq	-0,7264	-0,0244	-0,0216	-0,0624	-0,1058	-0,2488	-0,1262	-0,0858	-0,0514	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
4 EoL, Small Household Elec Equip. Copper, S	m2a crop eq	-2,1344	-0,2712	-0,3303	-0,2031	-0,2922	-0,3240	-0,1914	-0,1468	-0,2161	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0896	-0,0411	-0,0266	-0,0020
5 EoL, Small Household Elec Equip. PCB Sup	m2a crop eq	0,6403	0,1758	0,0813	0,0781	0,0762	0,0531	0,0439	0,0619	0,0438	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0032	0,0049	0,0129	0,0053
6 EoL, Small Household Elec Equip. Steel, Su	m2a crop eq	-0,8165	-0,0974	-0,0905	-0,1551	-0,0651	-0,0870	-0,0659	-0,0517	-0,0689	-0,0053	-0,0242	-0,0155	-0,0076	-0,0257	-0,0182	-0,0263	-0,0122
7 Sulfate pulp, unbleached (RER) sulfate pulp p	m2a crop eq	-560,5089	-40,7822	-15,8653	-52,3091	-51,8045	-16,4537	-12,2988	-10,9308	-7,8521	-28,6310	-52,1797	-32,1089	-27,9674	-66,5904	-47,8847	-47,5165	-49,3338
8 Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EUR	m2a crop eq	1,2522	0,1150	0,0330	0,1448	0,1479	0,2881	0,0512	0,0303	0,0331	0,0202	0,0357	0,0489	0,0437	0,0879	0,0512	0,0651	0,0560

Fonte: Adaptado Software

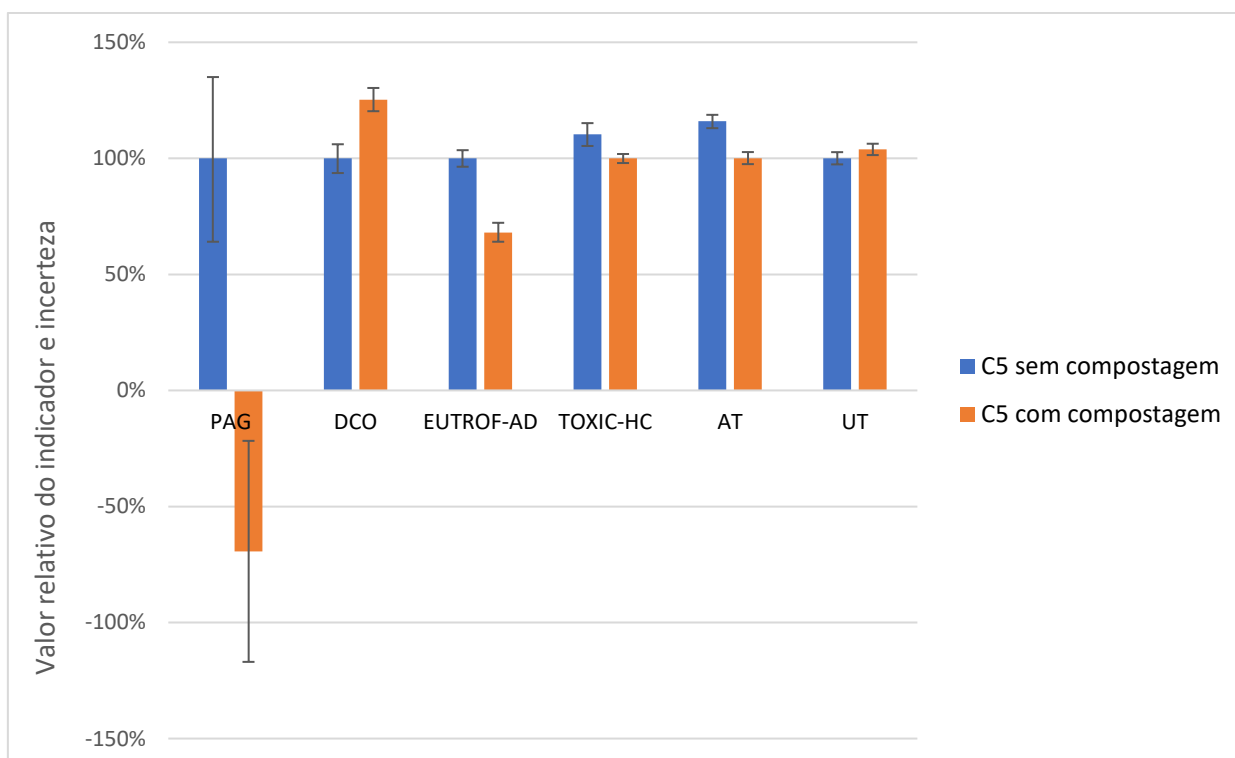
APÊNDICE G – COMPARAÇÃO CENÁRIO ATUAL C5 COM E SEM COMPOSTAGEM

Tabela 32 - Teste de hipótese estatística para comparação do C5 (sem e com compostagem) nas categorias avaliadas, usando 1.000 espaço amostral da simulação de Monte Carlo com intervalo de confiança de 95%

Categoria de Impacto	C5 (sem compostagem) > C5 (com compostagem)
	%
Aquecimento Global	100
Depleção da Camada de Ozônio	100
Eutrofização da Água Doce	100
Toxicidade Humana Cancerígena	0
Acidificação Terrestre	0
Uso da Terra	100

Fonte: Autoria Própria

Tabela 33 - Análise de incerteza do C5 (sem e com compostagem) nas categorias Aquecimento Global, Depleção da Camada de Ozônio, Eutrofização da Água Doce, Acidificação Terrestre e Toxicidade Humana, com efeito cancerígeno



Fonte: Autoria Própria