

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EM GESTÃO E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DO  
*CAMPUS SOROCABA*

Abner Fernandes Souza da Silva

**ANÁLISE DE ESTRATÉGIAS DE FIM DE VIDA PARA PLACAS DE CIRCUITO  
IMPRESSO: UMA ABORDAGEM BASEADA EM AVALIAÇÃO DO CICLO DE  
VIDA**

Sorocaba

2025

Abner Fernandes Souza da Silva

**ANÁLISE DE ESTRATÉGIAS DE FIM DE VIDA PARA PLACAS DE CIRCUITO  
IMPRESSO: UMA ABORDAGEM BASEADA EM AVALIAÇÃO DO CICLO DE  
VIDA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos. Área de concentração: Gestão da Produção Sustentável

Orientação: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Virgínia Aparecida da Silva Moris

Coorientação: Prof. Dr. João Eduardo Azevedo Ramos da Silva

Financiamento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)

Sorocaba

2025

Silva, Abner Fernandes Souza da

Análise de estratégias de fim de vida para placas de circuito impresso: uma abordagem baseada em avaliação do ciclo de vida / Abner Fernandes Souza da Silva -- 2025.  
116f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba  
Orientador (a): Virgínia Aparecida da Silva Moris  
Banca Examinadora: Gabriela Giusti, Tiago Barreto Rocha  
Bibliografia

1. Logística Reversa. 2. Avaliação do Ciclo de Vida. 3. Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos. I. Silva, Abner Fernandes Souza da. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática  
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano -  
CRB/8 6979



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

Centro de Ciências em Gestão e Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

---

**Folha de Aprovação**

---

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Abner Fernandes Souza da Silva, realizada em 27/08/2025.

**Comissão Julgadora:**

Profa. Dra. Virgínia Aparecida da Silva Moris (UFSCar)

Prof. Dr. Tiago Barreto Rocha (UNICAMP)

Profa. Dra. Gabriela Giusti (CNPq)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

À minha família, fonte constante de amparo e  
encorajamento, dedico esta dissertação.

## **AGRADECIMENTO**

À minha orientadora, Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Virgínia Aparecida da Silva Moris, e ao meu coorientador, Prof. Dr. João Eduardo Azevedo Ramos da Silva, expresse minha sincera gratidão pelo apoio constante, pelos ensinamentos valiosos, pela paciência e pela disponibilidade generosa em cada etapa desta caminhada acadêmica.

Agradeço também aos colegas do PPGEP-So e aos integrantes do Grupo de Pesquisa em Engenharia da Sustentabilidade (EngS), cuja disposição em compartilhar ideias, críticas construtivas e palavras de incentivo contribuiu decisivamente para a qualidade deste trabalho. Estendo meus agradecimentos a todos os professores, técnicos e colaboradores da Universidade que, de alguma forma, foram essenciais nesta trajetória, oferecendo orientação, infraestrutura e suporte administrativo.

Reconheço, ainda, o apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) — Processo nº 88887.967130/2024-00.

A todos vocês, o meu muito obrigado!

“Depois de subir uma grande colina, descobre-se que há muitas outras para escalar”.

(Nelson Mandela)

## RESUMO

Da SILVA, Abner Fernandes Souza. Análise de Estratégias de Fim de Vida de Placas de Circuito Impresso: uma Abordagem Baseada em Avaliação do Ciclo de Vida. 2025. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2025.

As Placas de Circuito Impresso (PCI) são componentes importantes de equipamentos eletroeletrônicos. Por conta de sua composição, com presença de materiais com alto valor e outros com potencial periculosidade para o meio ambiente e a saúde humana, elas têm sido alvo de uma crescente preocupação. O presente trabalho analisou estratégias para a gestão de fim de vida de PCI no Brasil, integrando revisão sistemática da literatura, modelagem de previsão de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) e avaliação de cenários utilizando Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). O aumento significativo nas publicações que abordam métodos hidrometalúrgicos para recuperação de metais das PCI destacou o potencial para serem enviadas para processos de reciclagem. No entanto, lacunas como processos de recuperação por biometalurgia e gestão da logística reversa ainda precisam ser exploradas, apontando oportunidades para futuras pesquisas. A previsão de geração de REEE na América Latina se mostrou primordial, onde foi utilizado como variáveis o Produto Interno Bruto (PIB) per capita e Índice de Desenvolvimento Humano (IDH). O modelo gerado evidenciou que o desenvolvimento econômico e social impacta diretamente a quantidade de resíduos gerados, reforçando a importância de políticas públicas específicas para a gestão da logística reversa dos REEE. As possibilidades de cenários de fim de vida para PCI foram avaliados utilizando a técnica de ACV, e os resultados indicaram que uma planta de reciclagem no Brasil, baseada no método hidrometalúrgico ácido, seria a solução mais sustentável dentre os cenários que foram avaliados. A recuperação de metais preciosos, como ouro e paládio, mostrou-se fundamental para reduzir impactos ambientais e gerar valor econômico ao reinserir materiais no ciclo produtivo, enquanto o processamento no Brasil minimiza os impactos associados ao transporte para outros países como acontece atualmente. O trabalho contribui para o avanço da gestão sustentável da logística reversa de resíduos eletrônicos apresentando subsídios fundamentados para políticas públicas e iniciativas empresariais, reforçando a importância de estratégias regionais e investimentos em tecnologias inovadoras para promover uma economia circular.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida, Placas de Circuito Impresso, Economia Circular, Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos, Logística Reversa.

## ABSTRACT

Printed Circuit Boards (PCBs) are important components of electrical and electronic equipment. Due to their composition, which includes materials of high value as well as others with potential hazards to the environment and human health, they have become the focus of growing concern. The present work analyzed strategies for end-of-life management of printed circuit boards (PCBs) in Brazil, integrating a systematic literature review, modeling for the prediction of waste electrical and electronic equipment (WEEE), and scenario assessment using Life Cycle Assessment (LCA). The significant increase in publications addressing hydrometallurgical methods for metal recovery from PCBs has highlighted the potential for sending them to recycling processes. However, gaps such as recovery processes through biometallurgy and the management of reverse logistics still need to be explored, pointing to opportunities for future research. Forecasting WEEE generation in Latin America proved to be essential, where per capita GDP and Human Development Index (HDI) were used as variables. The generated model showed that economic and social development directly impact the quantity of waste generated, reinforcing the importance of specific public policies for the management of WEEE reverse logistics. The possible end-of-life scenarios for PCBs were evaluated using the LCA technique, and the results indicated that a recycling plant in Brazil, based on the acidic hydrometallurgical method, would be the most sustainable solution among the scenarios evaluated. The recovery of precious metals, such as gold and palladium, proved to be fundamental for reducing environmental impacts and generating economic value by reinserting materials into the production cycle, while processing in Brazil minimizes the impacts associated with transport to other countries, as currently occurs. This work contributes to the advancement of sustainable management of reverse logistics of electronic waste by providing well-founded support for public policies and business initiatives, reinforcing the importance of regional strategies and investments in innovative technologies to promote a circular economy.

**Keywords:** Life Cycle Assessment, Printed Circuit Boards, Circular Economy, Waste Electrical and Electronic Equipment Management, Reverse Logistics.

## SUMÁRIO

<b>Capítulo I: VISÃO GERAL DA PESQUISA.....</b>	<b>10</b>
2 OBJETIVO .....	13
3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	13
REFERÊNCIAS .....	14
<b>CAPÍTULO II: ARTIGO #1 ESTRATÉGIAS DE FIM DE VIDA PARA PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA</b>	<b>17</b>
1. INTRODUCTION.....	18
2. MATERIALS AND METHODS .....	20
3. RESULTS AND DISCUSSION .....	24
3.1. Bibliometric Analysis .....	24
3.2. Content Analysis .....	28
4. CONCLUSIONS .....	35
REFERENCES .....	36
<b>CAPÍTULO III: ARTIGO #2: PREVISÃO DA GERAÇÃO DE REEE NA AMÉRICA LATINA: MODELO DE REGRESSÃO BASEADO EM INDICADORES SOCIOECONÔMICOS .....</b>	<b>42</b>
1. INTRODUÇÃO .....	43
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	45
2.1. Metodologia da Revisão Sistemática .....	45
2.2. Análise Quantitativa.....	47
2.3. Análise Qualitativa.....	48
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	57
5. CONCLUSÕES.....	62
REFERENCIAS .....	63
<b>CAPÍTULO IV: ARTIGO #3: AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA E ANÁLISE DE DECISÃO MULTICRITÉRIO DE ROTAS DE RECICLAGEM DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO NO BRASIL .....</b>	<b>67</b>
1. INTRODUÇÃO .....	68
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	71
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	72
3.1. Entrevistas com empresas de manufatura reversa de eletrônicos .....	72
3.2. Avaliação do Ciclo de Vida .....	73
3.2. Análise de Decisão Multicritério .....	79
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	83
4.1. ACV de Cenários de Gestão de RPCI no Brasil .....	83
4.2. Análise de Sensibilidade .....	93
5. CONCLUSÕES.....	101
REFERENCIAS .....	102
APÊNDICES .....	106
<b>CAPÍTULO v: CONCLUSÕES .....</b>	<b>114</b>

## CAPÍTULO I: VISÃO GERAL DA PESQUISA

### 1 INTRODUÇÃO

A gestão de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) constitui um dos principais desafios ambientais contemporâneos (Sawadogo; Zoungrana, 2024). O avanço tecnológico e o crescimento do consumo de dispositivos eletrônicos têm impulsionado a geração desses resíduos: estima-se que, em 2022, foram produzidas cerca de 62 milhões de toneladas de REEE em todo o mundo. (Baldé et al., 2024; Fiorente et al., 2024). Entre os componentes mais críticos desses resíduos, destacam-se as placas de circuito impresso (PCI), devido à complexidade de sua composição e ao potencial poluidor de seus materiais (Fazari; Hossain; Charpentier, 2024). As PCI contêm uma variedade de metais preciosos e tóxicos, como chumbo e mercúrio, que podem causar danos significativos ao meio ambiente e à saúde humana, caso não sejam tratados de maneira adequada (Chen et al., 2021). A preocupação com os REEE e, em particular, com as PCI, transcende os aspectos ambientais, englobando também interesses econômicos e estratégicos na recuperação de materiais valiosos presentes nas PCI, em concentrações proporcionalmente superiores às usualmente encontradas nos estoques naturais (Schwartz et al., 2024).

A reciclagem eficiente das PCI pode reduzir a dependência da mineração de novos metais, contribuindo para a conservação de recursos naturais e a mitigação dos impactos associados à extração e processamento de matérias-primas (Ottoni et al., 2023). Essa recuperação de materiais secundários envolve diversas técnicas que podem ser classificadas em três categorias principais: reciclagem térmica, reciclagem química e reciclagem biológica (Nie et al., 2024). Cada método possui características específicas que influenciam a eficiência e viabilidade econômica e ambiental.

A reciclagem térmica utiliza altas temperaturas, por meio de processos como a pirólise e a fundição, para decompor a matriz polimérica das placas e concentrar a fração metálica, que é posteriormente encaminhada para etapas de refino. Por sua vez, a reciclagem química, operando majoritariamente pela via hidrometalúrgica, baseia-se no uso de soluções lixiviantes, como ácidos, para dissolver e extrair seletivamente os metais da estrutura da PCI, viabilizando a recuperação de elementos de alto valor como cobre, ouro e prata. Por fim, a reciclagem biológica, também conhecida como bio-hidrometalurgia, emprega a ação metabólica de microrganismos que produzem substâncias capazes de lixiviar os metais da placa, em um processo denominado biolixiviação, para solubilizá-los e permitir sua posterior separação.

Apesar de dispor da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010), que estabelece princípios de responsabilidade compartilhada e institui instrumentos como logística

reversa e acordos setoriais, há desafios estruturais relevantes no contexto brasileiro. O Brasil foi o maior gerador de REEE na América Latina e o segundo maior nas Américas, com aproximadamente 2,4 milhões de toneladas geradas em 2022. Contudo, a infraestrutura para tratamento, reciclagem e disposição final desses resíduos permanece insuficiente (Baldé et al., 2024; Bernardes et al., 2024; Dias et al., 2022). A logística complexa, a ausência de incentivos econômicos e as lacunas na legislação constituem obstáculos que dificultam a criação de um sistema eficaz de gestão de REEE no país (Guzzo et al., 2022). Ademais, a conscientização pública acerca da importância da reciclagem de eletrônicos permanece limitada, exacerbando o problema (Bernardes et al., 2024).

Em países em desenvolvimento, as PCI, depois de separadas de seus respectivos REEE, são enviados pelas empresas ao exterior, onde há processos em escala para recuperação dos metais presentes em sua composição (Turaga et al., 2019). Assim, altas distâncias são percorridas, o que, se não planejado corretamente, pode emitir grandes quantidades de gases de efeito estufa para a atmosfera (Ottoni et al., 2023). Além disso, o alto valor econômico, que pode ser obtido graças à recuperação de metais preciosos, não permanece em solo brasileiro, já que todo o processo de reciclagem é realizado no exterior (Souza, 2020).

Diante deste cenário, a presente pesquisa justifica-se pela necessidade de desenvolver estratégias para a gestão da logística reversa (LR), realizada a partir de operadores logísticos, e recuperação de materiais secundários de resíduos de placas de circuito impresso (RPCI), feita por agentes de reciclagem no Brasil (Brasil, 2020, 2023). Essas operações não só contribuem para a redução do impacto ambiental, como também representam uma oportunidade econômica significativa, em virtude da recuperação de metais valiosos que podem ser reintroduzidos na cadeia produtiva (Ottoni et al., 2023). Atualmente, o Brasil conta com cerca de 10 plantas de grande porte para processamento de REEE, sendo que ao menos 8 delas (Ambipar, Vertas, GMCLog, Natussomos, Sinctronics, Energy Source, Itatijuca e Hamaya) fazem a separação das PCI, enviando posteriormente para empresas que realizam a exportação, Umicore e Lorene.

Para analisar alternativas de fim de vida de resíduos, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta essencial, pois permite quantificar os impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida de produtos e processos (De Oliveira et al., 2021; Mulya et al., 2022). A ACV oferece uma visão detalhada dos fluxos de materiais e de energia e dos impactos em cada etapa, possibilitando a identificação de pontos críticos e de oportunidades de melhoria, o que facilita decisões informadas sobre estratégias de gestão e tecnologias de reciclagem (Pryshlakivsky; Searcy, 2021; Zhang; Matsumoto, 2021). Nesse contexto, torna-se necessário

avaliar a viabilidade da implantação da reciclagem de PCI no Brasil por meio de cenários construídos a partir da literatura.

Dentro desse contexto, a previsão da geração de REEE é essencial para o planejamento da gestão da logística reversa, especialmente no contexto brasileiro. Embora o estudo de Kusch e Hills (2017) tenha demonstrado uma correlação linear significativa entre o Produto Interno Bruto ajustado pela Paridade do Poder de Compra (PIB PPC) para a geração de REEE na região pan-europeia, é crucial desenvolver um estudo neste sentido para o Brasil. No estudo europeu, um aumento de 1000 dólares internacionais no PIB PPC resultou em um incremento de aproximadamente 0,5 kg de REEE per capita, destacando a relação entre crescimento econômico e geração de resíduos. No entanto, para o Brasil, com suas particularidades econômicas e sociais, é fundamental propor uma nova equação que permita prever com precisão a geração de REEE, de modo a apoiar o desenvolvimento de estratégias de gestão adequadas e eficazes para o país.

Outrossim, a localização de uma planta de reciclagem de PCI no Brasil deve ser cuidadosamente planejada, considerando aspectos logísticos, econômicos, sociais e ambientais (Otoni et al., 2023). A escolha do local ideal pode contribuir para uma logística mais eficiente e, conseqüentemente, menores custos e impactos ambientais (Sirilertsuan; Thomassey; Zeng, 2020; Wang; Li; Lu, 2023). Por exemplo, a proximidade com grandes centros urbanos onde concentra uma maior geração de REEE pode facilitar a coleta e o transporte dos resíduos, enquanto regiões com infraestrutura industrial já estabelecida podem oferecer vantagens em termos de recursos e mão de obra. Os critérios para a escolha de localização de instalações podem ser variados, incluindo tanto aspectos qualitativos quanto quantitativos. Nesse contexto, os métodos de decisão multicritério podem contribuir significativamente, permitindo a ponderação e o ranqueamento das opções com base em critérios de diferentes naturezas, definidos pelos tomadores de decisão. (Da Silva Sales; De Amorim; De Souza, 2023; Taherdoost; Madanchian, 2023).

Portanto, esta pesquisa visa fornecer uma base científica e prática para a implementação de uma gestão da logística reversa de RPCI no Brasil, contribuindo para o desenvolvimento de políticas públicas e estratégias empresariais que promovam a economia circular e a sustentabilidade ambiental. Ao abordar diferentes dimensões da reciclagem de RPCI, espera-se que este estudo possa orientar ações futuras que promovam a inovação tecnológica, a responsabilidade ambiental e o desenvolvimento sustentável no Brasil.

## **2 OBJETIVO**

O objetivo geral deste trabalho é avaliar diferentes estratégias para o fim de vida das PCI no Brasil, identificando as alternativas com menor impacto ambiental.

A partir desse objetivo geral, são estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Conduzir uma revisão sistemática da literatura para identificar estudos que utilizam a ACV em operações de recuperação de metais de PCI em diferentes países.
- Coletar dados das operações de transporte, separação e exportação de PCI no Brasil, mapeando o estado atual da gestão de resíduos no país.
- Realizar entrevistas com especialistas para compreender os incentivos necessários para a implementação da reciclagem de PCI em território nacional e entender a operacionalização.
- Desenvolver um modelo preditivo para estimar a geração de REEE no Brasil nos próximos anos.
- Realizar uma ACV comparativa entre o cenário atual de exportação de PCI e cenários propostos de reciclagem no Brasil, avaliando o impacto ambiental potencial de cada opção.
- Aplicar análise multicritério para definir o cenário de destaque frente as variáveis analisadas.

## **3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

O capítulo 1 dessa dissertação consistiu nessa introdução. Já o Capítulo 2 apresenta uma revisão sistemática da literatura sobre o uso da ACV na gestão de RPCI. Esse capítulo identifica pontos críticos nos processos de gestão, destacando como a aplicação da ACV pode direcionar os tomadores de decisão com o foco em reduzir impactos ambientais associados à reciclagem de RPCI. A análise fornece uma base teórica sólida, permitindo compreender o estado da arte e identificar lacunas que serão abordadas nos capítulos seguintes.

O Capítulo 3 desenvolve um modelo preditivo para estimar a geração de REEE em países da América Latina. Utilizando indicadores socioeconômicos, como Produto Interno Bruto (PIB) per capita e Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), a equação proposta busca oferecer previsões precisas e acessíveis, fundamentais para apoiar o planejamento estratégico de gestão de resíduos na região. Este modelo fornece insumos essenciais para as análises logísticas e ambientais realizadas posteriormente.

No Capítulo 4, são examinados os impactos ambientais associados à logística reversa de PCI no Brasil. O estudo avalia o sistema atual, no qual os componentes são extraídos de dispositivos eletrônicos em território nacional e exportados para reciclagem e recuperação de metais preciosos. Além disso, são explorados cenários alternativos, incluindo a possibilidade de estabelecer plantas de reciclagem no Brasil, com foco na redução de impactos ambientais.

Por fim, o Capítulo 5 sintetiza os principais resultados da pesquisa, oferecendo recomendações práticas para a gestão de RPCI no Brasil. Além de consolidar as contribuições deste estudo, o capítulo aponta caminhos para futuras pesquisas, incentivando o desenvolvimento de estratégias sustentáveis e inovadoras na gestão de resíduos eletrônicos.

## REFERÊNCIAS

BALDÉ, Cornelis P. *et al.* **Global E-waste Monitor 2024**. Genebra/Bonn: International Telecommunication Union (ITU) e United Nations Institute for Training and Research (UNITAR), 2 nov. 2024. Disponível em: <<https://www.itu.int/itu-d/sites/environment.>>.

BERNARDES, Mariana *et al.* Engaging the End User in Waste from Electrical and Electronic Equipment Management: An Action Research Study. **Systemic Practice and Action Research**, v. 37, n. 1, p. 105–126, 1 fev. 2024.

BRASIL. Lei nº 12.305/2010 – Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). . 2 ago. 2010.

BRASIL. Decreto nº 10.240/2020 – Logística Reversa de Produtos Eletroeletrônicos. . 12 fev. 2020.

BRASIL. 11413. DECRETO Nº 11.413, DE 13 DE FEVEREIRO DE 2023. . 2023.

CHEN, Shuyuan *et al.* Comparative effectiveness of technical and regulatory innovations to reduce the burden of electronic waste. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 167, 1 abr. 2021.

DA SILVA SALES, Ingrid Jale; DE AMORIM, Pedro Lopes Lucas; DE SOUZA, Ricardo Gabbay. Multi-criteria analysis of the feasibility of e-waste pre-treatment units in a Brazilian city. **Environment Systems and Decisions**, 1 jun. 2023.

DE OLIVEIRA, José Augusto *et al.* (ORGS.). **Life Cycle Engineering and Management of Products**. Cham: Springer International Publishing, 2021.

DIAS, Pablo *et al.* Electronic waste in Brazil: Generation, collection, recycling and the covid pandemic. **Cleaner Waste Systems**, v. 3, 1 dez. 2022.

FAZARI, James; HOSSAIN, Md Zakir; CHARPENTIER, Paul. A review on metal extraction from waste printed circuit boards (wPCBs). **Journal of Materials Science**, 1 jul. 2024.

FIORENTE, Annarita *et al.* Recovery of Plastics from WEEE through Green Sink–Float Treatment. **Materials**, v. 17, n. 12, 1 jun. 2024.

GUZZO, Daniel *et al.* Analysis of national policies for Circular Economy transitions: Modelling and simulating the Brazilian industrial agreement for electrical and electronic equipment. **Waste Management**, v. 138, p. 59–74, 1 fev. 2022.

KUSCH, Sigrid; HILLS, Colin D. The link between e-waste and GDP-New insights from data from the pan-European region. **Resources**, v. 6, n. 2, 1 jun. 2017.

MULYA, Kyle Sebastian *et al.* A systematic review of life cycle assessment of solid waste management: Methodological trends and prospects. **Science of the Total Environment**, v. 831, 20 jul. 2022.

NIE, Chun chen *et al.* Clean and efficient process for the recycling of all components from waste printed circuit boards: Pre-treatment, bio-metallurgy, and deep utilization. **Journal of Cleaner Production**, v. 466, 10 ago. 2024.

OTTONI, Marianna *et al.* Avaliação de sustentabilidade para alocação de unidades de processamento de resíduos de placas de circuito impresso: O caso brasileiro. **Ambiente & Sociedade**, v. 26, 2023.

PRYSHLAKIVSKY, Jonathan; SEARCY, Cory. Life Cycle Assessment as a decision-making tool: Practitioner and managerial considerations. **Journal of Cleaner Production**, v. 309, 1 ago. 2021.

SAWADOGO, Wendyam Assumpta Missa; ZOUNGRANA, Tibi Didier. Environmental effects of waste electrical and electronic equipment valorization in burkina faso. **Environmental Advances**, v. 17, 1 out. 2024.

SCHWARTZ, Eric *et al.* Comparative life cycle assessment of copper and gold recovery from waste printed circuit boards: Pyrometallurgy, chemical leaching and bioleaching. **Journal of Hazardous Materials**, v. 473, 15 jul. 2024.

SIRILERTSUWAN, Petchprakai; THOMASSEY, Sébastien; ZENG, Xianyi. A strategic location decision-making approach for multi-tier supply chain sustainability. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 20, p. 1–37, 2 out. 2020.

SOUZA, Ricardo Gabbay. 16 - E-waste situation and current practices in Brazil. *In*: PRASAD, Majeti Narasimha Vara; VITHANAGE, Meththika; BORTHAKUR, Anwesha (Orgs.). **Handbook of Electronic Waste Management**. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2020. p. 377–396.

TAHERDOOST, Hamed; MADANCHIAN, Mitra. Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods and Concepts. **Encyclopedia**, v. 3, n. 1, p. 77–87, 9 jan. 2023.

TURAGA, Rama Mohana R. *et al.* E-Waste Management in India: Issues and Strategies. **Vikalpa**, v. 44, n. 3, p. 127–162, 1 set. 2019.

WANG, Yanxia; LI, Yisong; LU, Changxiang. Evaluating the Effects of Logistics Center Location: An Analytical Framework for Sustainable Urban Logistics. **Sustainability (Switzerland)**, v. 15, n. 4, 1 fev. 2023.

ZHANG, Jiawen; MATSUMOTO, Toru. Comparative Life Cycle Assessment Analysis of Sewage Sludge Recycling Systems in China. **Nature Environment and Pollution Technology**, v. 20, n. 5, 25 dez. 2021.

## **CAPÍTULO II: ARTIGO #1 ESTRATÉGIAS DE FIM DE VIDA PARA PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA**

**Resumo:** O resíduo eletrônico proveniente de placas de circuito impresso (PCIs) reúne metais valiosos e aditivos tóxicos, tornando seu descarte uma prioridade ambiental. Este estudo utiliza a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para mapear os principais pontos críticos ambientais na gestão de resíduos de PCIs (RPCIs) e apresentar opções de fim de vida mais sustentáveis. Uma revisão sistemática baseada no método Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) examinou as bases Scopus e Web of Science, resultando em 36 artigos analisados quantitativa e qualitativamente com o IRaMuTeQ. As pesquisas convergem em três temas principais: tecnologias de reciclagem, logística reversa e composição/toxicidade das PCIs. As rotas hidrometalúrgicas e pirometalúrgicas — focadas principalmente na recuperação de ouro e cobre — predominam na literatura. Os resultados também apontam para a necessidade urgente de sistemas logísticos eficientes para coleta e devolução, além de políticas de incentivo, especialmente em países em desenvolvimento como o Brasil, onde faltam estudos empíricos. A revisão destaca ainda que a evolução na formulação das placas altera os perfis de toxicidade, exigindo avaliações atualizadas. De modo geral, inovação tecnológica, logística integrada e incentivos regulatórios são essenciais para minimizar o impacto ambiental dos resíduos de PCIs e fechar o ciclo de materiais no setor eletrônico.

**Palavras-chave:** Avaliação do Ciclo de Vida; Gestão de Resíduos; Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos; Placas de Circuito Impresso; Logística Reversa; Reciclagem.

## **CHAPTER II: ARTICLE #1 END-OF-LIFE STRATEGIES FOR PRINTED-CIRCUIT BOARDS: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW**

**Abstract:** Electronic waste from printed-circuit boards (PCBs) combines valuable metals with toxic additives, making its disposal an environmental priority. This study employs Life-Cycle Assessment (LCA) to map environmental hotspots in PCB waste (PCBW) management and outline more sustainable end-of-life options. A Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA)-based systematic review screened Scopus and Web of Science, yielding 36 articles analysed quantitatively and qualitatively with IRaMuTeQ. Research converges on three themes: recycling technologies, reverse logistics, and PCB composition/toxicity. Hydrometallurgical and pyrometallurgical routes—mainly targeting gold and copper recovery—dominate the literature. Findings also point to the urgent need for efficient take-back logistics and supportive policies, especially in developing countries such as Brazil, where empirical studies are scarce. The review notes that evolving board formulations alter toxicity profiles, demanding updated assessments. Overall, technological innovation, integrated logistics, and regulatory incentives are essential to minimise the environmental burden of PCBW and close material loops in the electronics sector.

**Keywords:** Life Cycle Assessment; Waste Management; Waste Electrical and Electronic Equipment; Printed-Circuit Boards; Reverse Logistics; Recycling.

## 1. INTRODUCTION

Efficient waste management is a global challenge and has been a growing concern worldwide (Mulya et al., 2022). Considering technological advancement and the accelerating pace of industrial production, solid waste generation is on the rise, showing the need to understand and mitigate the environmental impacts of its disposal, particularly electronic equipment waste, such as printed-circuit boards (PCBs). The growing volume of waste electrical and electronic equipment (WEEE) underscores the urgent need for effective management strategies. According to Baldé (2024), 62 million tons of WEEE were generated globally in 2022, with an average of 7.8 kg per capita. Of this amount, only 22.3% (13.8 million tons) was properly documented, collected, and recycled. According to Rocha and Penteado (2021), approximately 3% of WEEE consists of PCBs.

PCBs are essential components in a wide range of electronic devices, serving various functions. However, the improper disposal of these devices can lead to serious environmental and human health risks. PCBs contain toxic substances, such as heavy metals, flame retardants, and polycyclic aromatic hydrocarbons (Nan et al., 2024). In addition, they also contain valuable materials, such as gold and silver, as well as other economically attractive elements, for instance aluminum, copper, and zinc (Pokhrel; Lin; Tsai, 2020).

PCB recycling involves three main metal extraction routes: pyrometallurgical, which uses high temperatures to melt and separate metallic materials; hydrometallurgical, in which chemical agents solubilize metals that are later recovered using electrochemical methods or other precipitation and adsorption techniques; and biohydrometallurgical, which employs microbial cultures that can selectively leach the targeted metal elements. Each approach offers distinct advantages and limitations regarding yield, energy consumption, and waste generation, thereby warranting comparative investigations into their technical, economic, and environmental efficiency. As WEEE management has become a global concern, various regulations have been introduced to ensure it is handled and disposed of properly (Rocha; Penteado, 2021; Xavier; Ottoni; Abreu, 2023; Xavier; Ottoni; Lepawsky, 2021)). In Brazil, Law No. 12,305 was enacted in 2010, establishing the National Solid Waste Policy (PNRS in Portuguese), which sets out principles, goals, targets, and actions for solid waste management, focusing on the shared responsibility of government, producers, importers, distributors, and retailers throughout the product life cycle (Brasil, 2010).

Furthermore, the PNRS requires the adoption of reverse logistics (RL) for WEEE, among other waste types. In 2020, Decree No. 10.240, issued on February 12, established specific targets and deadlines for implementing reverse logistics for WEEE (Brasil, 2020). As

a result, companies in the sector are required to submit periodic reports demonstrating their current performance and future goals.

However, due to various existing uncertainties, such as the quantity and quality of returned materials and the lack of regulations, establishing a structured RL management system for WEEE remains a critical challenge. The quality of the materials to be collected, the volume, the frequency of returns, and the high costs associated with RL are some of the key challenges (Alshamsi; Diabat, 2015). Nevertheless, stricter environmental regulations, the push for sustainable development, and increasing market competitiveness highlight the importance of implementing an efficient RL system (Ayvaz; Bolat; Aydın, 2015).

Designing a RL network requires effective planning, as transportation operations—besides being costly—are also major sources of greenhouse gas (GHG) emissions (Rocha; Penteado, 2021). In this context, WEEE management faces significant inconsistencies, especially in developing countries, where waste management regulations and infrastructure remain insufficient. Studies such as that by Gollakota, Gautam and Shu (2020) support the urgent need for practical solutions and robust policies to mitigate the environmental and public health impacts associated with the improper disposal of WEEE.

To address this complex challenge, Life Cycle Assessment (LCA) emerges as a valuable tool to support decision-making, providing a foundation for proposing and comparing end-of-life strategies. LCA offers a holistic approach to evaluating the environmental impacts of a product or process throughout its entire life cycle, from raw material extraction to final disposal (Finnveden et al., 2009). When applied to waste management, LCA enables the identification of critical points within the system and assesses the impact of different end-of-life strategies (Baldé et al., 2024).

LCA implementation is standardized by ISO 14040 and ISO 14044 (International Organization for Standardization, 2006a, 2006b), which define the necessary procedures to ensure the validity of such analyses. According to these standards, LCA is divided into four phases: Goal and Scope Definition; Life Cycle Inventory Analysis; Life Cycle Impact Assessment; and Interpretation. These phases are interrelated, meaning that the LCA process is iterative. Earlier steps may need to be revisited to refine the analysis and ensure consistency, thereby enhancing the comprehensiveness of the study (European Union Joint Research Centre (EU-JRC), 2018).

Multifunctional problems, characterized by the simultaneous production of a main product and by-products, require adopting allocation methods to appropriately distribute inputs, impacts, and revenues among the different system outputs. Furthermore, considering that

recycling is a multifunctional process, responsible both for waste treatment and for generating raw material for a new production cycle, there is a need to account for the environmental credits associated with the avoidance of virgin raw material extraction due to using recycled materials. Rocha and Penteadó (2021) used the Circular Footprint Formula to carry out this accounting, highlighting its importance, because although many recycling processes demand high energy input, substituting virgin materials can result in significant environmental benefits. On the other hand, studies such as those by Pokhrel, Lin and Tsai (2020) and Rao et al. (2023), which focused exclusively on the impacts caused by the processes, are important as they help identify critical hotspots in the recycling cycle. However, including credit accounting can offer a more holistic perspective, encompassing the benefits associated with avoiding virgin raw material extraction. There is still no consensus on how to approach credit accounting in recycling, as this largely depends on the specific goals of each study. Therefore, further research is needed on adopting methods such as system expansion, the Circular Footprint Formula, and other approaches used for this purpose (He et al., 2024).

Therefore, this chapter aims to propose environmentally sustainable end-of-life strategies by exploring how LCA has been used in PCBW management to identify hotspots and support decision-making. It synthesizes the state of the art and highlights existing gaps in the literature and plays a crucial role in directing future research efforts toward understanding the environmental impacts of managing and treating PCBW. By systematizing the existing knowledge, the study contributes to scientific advancement in the field while simultaneously promoting sustainable practices for the final disposal of PCBs, which can lead to improvements in quality of life and environmental preservation. Tranfield, Denyer and Smart (2003) demonstrate that a systematic literature review can effectively manage existing scientific knowledge by adopting a clear methodology, thereby enhancing the reliability of the study.

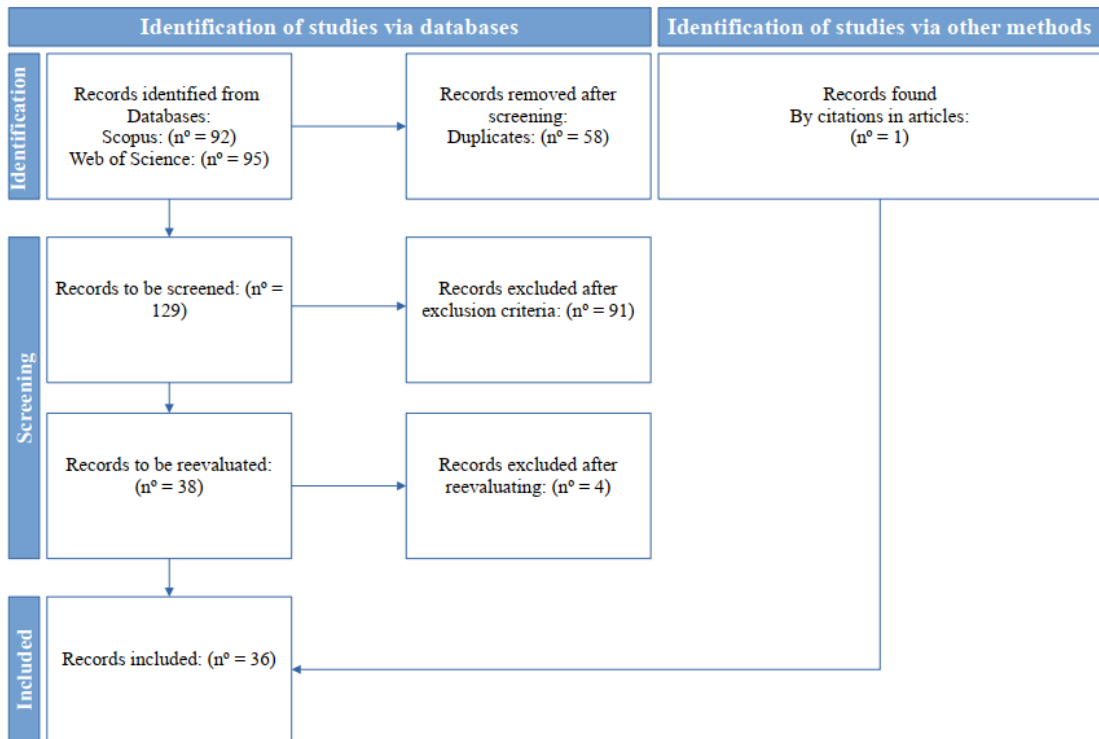
## **2. MATERIALS AND METHODS**

The review was conducted using the PRISMA method, widely recognized for systematic reviews, ensuring a protocol that provides greater transparency to the research by clearly showing the procedure the author followed, what was found, and the reason for the review (Page et al., 2021).

Concerning the systematic review, the databases selected were Scopus and Web of Science. According to Pranckutė (2021), these are the main databases for bibliographic information analysis due to their broad coverage for various purposes, as well as their wide range of specialized indexes, which provide accuracy, transparency, and data control. Figure 1

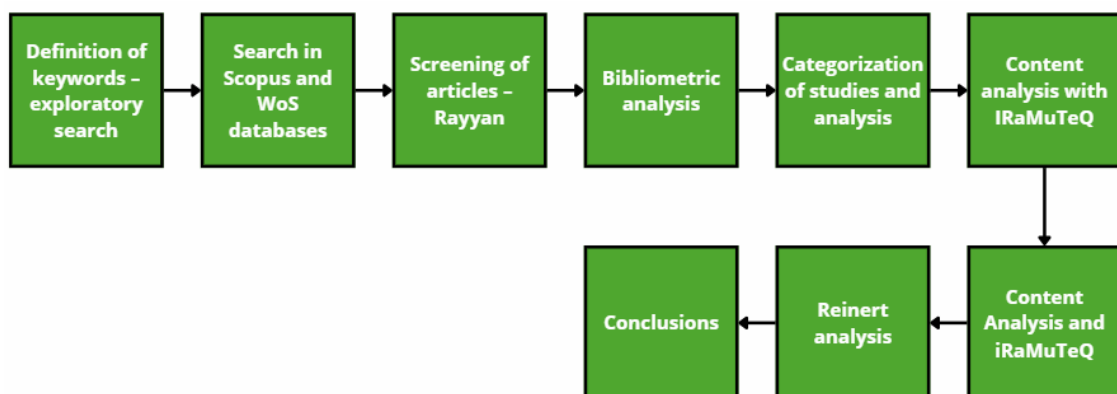
shows the PRISMA diagram developed for the review, while Figure 2 presents all the steps and tools used in the systematic review process.

Figure 1. PRISMA Diagram of the Systematic Review



Source: Authors (2025)

Figure 2. Complete Methodology of the Systematic Review



Source: Authors (2025)

The search began by considering two constructs: "Life Cycle Assessment" and "Printed Circuit Boards". Based on this, an initial exploratory review was conducted to understand the subject in more depth and to find variants of these terms (Gil, 2008). After analyzing the results

using the VOSViewer tool, which enables iterative analysis of article metadata, keywords matching the established constructs were identified based on co-occurrence (De Medeiros Filho; Russo, 2018; Van Eck; Waltman, 2010). Therefore, the database search was performed using the following expression, applied to the topic fields TS in Web of Science and TITLE-ABS-KEY in Scopus, ensuring the search covered the title, abstract, and keywords of the articles:

- For Web of Science: TS = ("life cycle assessment" OR "life cycle analysis" OR LCA) AND TS = ("printed circuit board\*" OR PCB)
- For Scopus: TITLE-ABS-KEY ("life cycle assessment" OR "life cycle analysis" OR LCA) AND TITLE-ABS-KEY ("printed circuit board\*" OR PCB)

The search, filtered for scientific articles in both databases, resulted in 187 articles for an initial analysis. Data from these articles was extracted. Using the Rayyan tool, 58 duplicate articles were removed, leaving 129 articles. According to Ouzzani (2016), Rayyan allows for a more efficient document analysis by separating included and excluded articles based on defined criteria. After reading the titles and abstracts of the articles found, the following exclusion criteria were applied:

- (1).Narrow Scope: Articles exclusively focused on chemical analyses, such as reaction kinetics, without considering waste management or life cycle assessment (LCA) aspects.
- (2).Lack of Relevant Approach: Articles that did not address topics such as reverse logistics/waste management and/or life cycle assessment.
- (3).Article Type: Literature review articles were excluded to focus on empirical studies.
- (4).Content Focus: Articles that did not mention printed circuit boards (PCBs).
- (5).Organic Pollutants: Articles exclusively focused on organic pollutants, without a direct link to PCB management.
- (6).Access to Content: Articles without full-text access were excluded to ensure a complete and detailed analysis.
- (7).Publication Type: Conference papers were excluded to ensure the inclusion of peer-reviewed studies published in recognized journals.

By applying these criteria, 91 articles were excluded, leaving 38 for re-evaluation. After reading these articles, 3 were excluded as they focused on aspects not aligned with the study's objective. Additionally, during the article review, another study that had not been filtered was frequently cited and therefore included in the analysis, resulting in a total of 36 articles.

The 36 articles were analyzed based on their main themes, allowing for the extraction of data about the state of the art and the creation of a categorization according to the focus of each study. This was carried out using a Google Sheets spreadsheet to record relevant information about the articles, such as the year of publication, method, results, conclusions, and country of origin.

After defining the articles included in the review, a descriptive analysis of the literature was conducted. This step focused on presenting general aspects of the selected articles, such as the country of origin and distribution by year of publication, as well as specific methodological characteristics in LCA, including the software and the environmental impact assessment methods that were used.

Afterward, a content analysis was carried out, enabling a comprehensive evaluation of the article themes, their classification based on selected approaches, and an assessment of the discussions they presented. This categorization facilitated the discussion of the identified approaches and possible gaps in the literature. The IRaMuTeQ software, a free and open-source program that enables statistical analyses based on text composition, was then used to carry out this phase through a lexical analysis using Reinert's classification (also known as Descending Hierarchical Classification) (Reinert, 1990), providing a detailed quantitative and qualitative view of emerging trends and patterns in the literature on LCA and reverse logistics of PCBW. Reinert's classification groups text segments into classes based on word co-occurrence, revealing significant thematic categories and their relationships.

Following Bardin's method (Bardin, 2011), this analysis consists of three main steps: organization of the material, coding, and categorization. The first step aims to separate which collected documents should indeed be part of the analysis and which should be excluded — a process already completed previously. In the second step, the recording unit and the context unit are defined. The recording unit corresponds to the element to be analyzed in the text, such as word classes (verbs and nouns) or objects. The context unit refers to the excerpts in which the recording units are inserted, such as, for example, the abstracts of the articles. This step involved preparing the textual corpus for analysis, extracted from the articles' abstracts. The corpus was standardized with adjustments such as acronym uniformity, correction of compound

words, and removal of special characters. Finally, the last step, categorization, leads to forming the categories based on the analysis of the obtained and coded data.

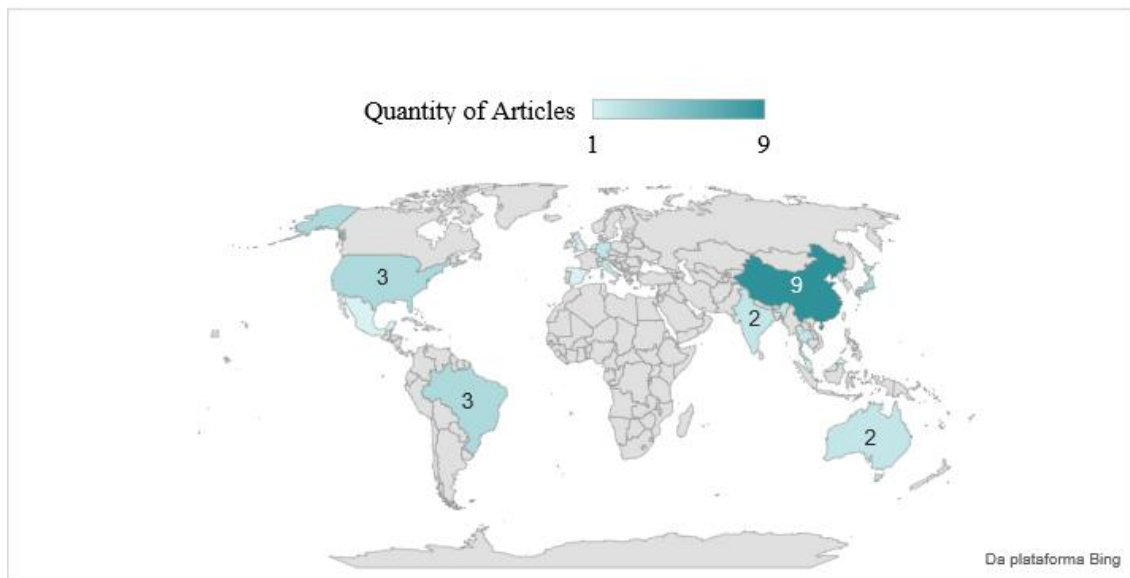
### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1. Bibliometric Analysis

After completing all the stages of the PRISMA protocol, the literature concerning the interface between LCA and PCBW management was successfully mapped.

Firstly, it can be observed that most articles were published by Chinese authors, while Brazil, the United States, and Japan share second place. Figure 3 shows the distribution of articles by country. Despite its large population and growing consumption of electronic devices, Latin America shows a gap in studies on WEEE management, especially regarding PCBW. This shortage is significant as the region combines high WEEE generation with limited infrastructure for proper waste collection and disposal (Baldé et al., 2024). The lower number of studies in Latin America reflects structural challenges such as restricted funding, emerging public policies, and the lack of regional inventories specific to LCA. The situation is similar in the African continent, where studies related to this topic are also scarce.

Figure 3. Distribution of Articles by Country



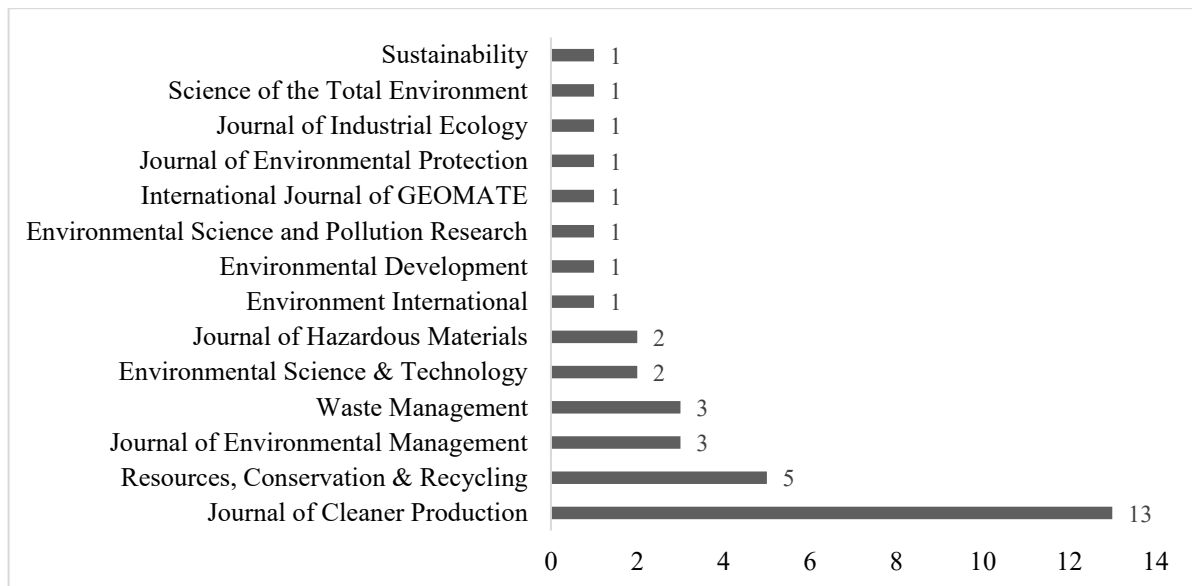
Source: Authors (2025)

Even among developing countries, only Brazil, China, and India have studies on this topic, standing out as exceptions. This highlights an opportunity to explore countries with similar socioeconomic characteristics that remain underrepresented in the literature.

Understanding the specific context of Latin America and Africa, considering their structural limitations and opportunities for reverse logistics and recycling practices for PCBW, is important for developing solutions adapted to these settings.

The *Journal of Cleaner Production* is identified as the main journal, with 13 publications (36.1%) out of the 36 analyzed. The remaining articles are distributed among other journals, notably *Resources, Conservation & Recycling*, *Waste Management*, and *Journal of Environmental Management*. Figure 4 shows the distribution of the number of studies by journal.

Figure 4. Distribution of articles by journal



Source: Authors (2025)

An important aspect of the literature analysis is identifying the authors with the highest number of publications. Among the sample of articles analyzed, four authors can be mentioned: Oladele A. Ogunseitan, with 3 articles; and Ehsan Vahidi, Mengjun Chen, and Roland Hischier, each with 2 articles. The remaining authors contributed to only one paper each.

Oladele A. Ogunseitan researched the toxicity present in WEEE composition, such as PCBW, evaluating the effectiveness of legislation that requires changes in material composition. In the articles related to WEEE toxicity, Mengjun Chen was also one of the prominent authors.

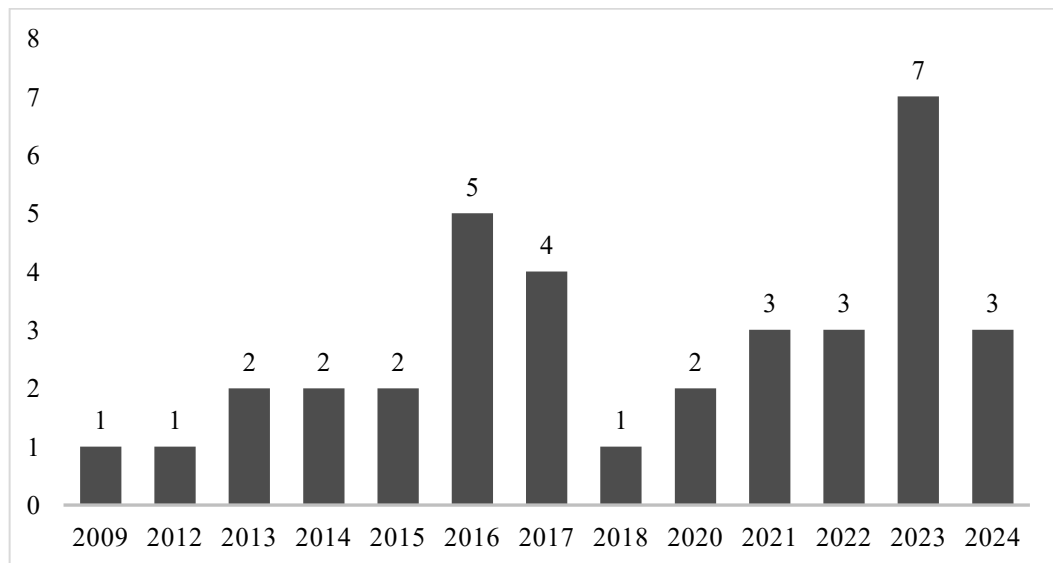
Ehsan Vahidi assessed the environmental impact caused by the production of mobile phones due to the raw materials used, highlighting the components found in PCBs because of

the presence of metals. In another study, the author analyzed compound glycine use in metal recovery processes from PCBW to improve the process.

Roland Hischer, in turn, researched the use of paper as a substitute for some metals found in PCBs, aiming to reduce environmental impact. The author also contributed to a study that conducted a material flow analysis (MFA) and evaluated the economic and environmental performance of informal WEEE recycling in Thailand.

Another important observation is the distribution of publications over the years. The first publication dates back to 2009, followed by growth until 2016, with 5 papers published that year. After this period, there was a sharp decline until 2018, with only one publication. Subsequently, there was another increase, with 7 articles published in 2023 and 3 articles up to May 2024. Figure 5 presents this analysis.

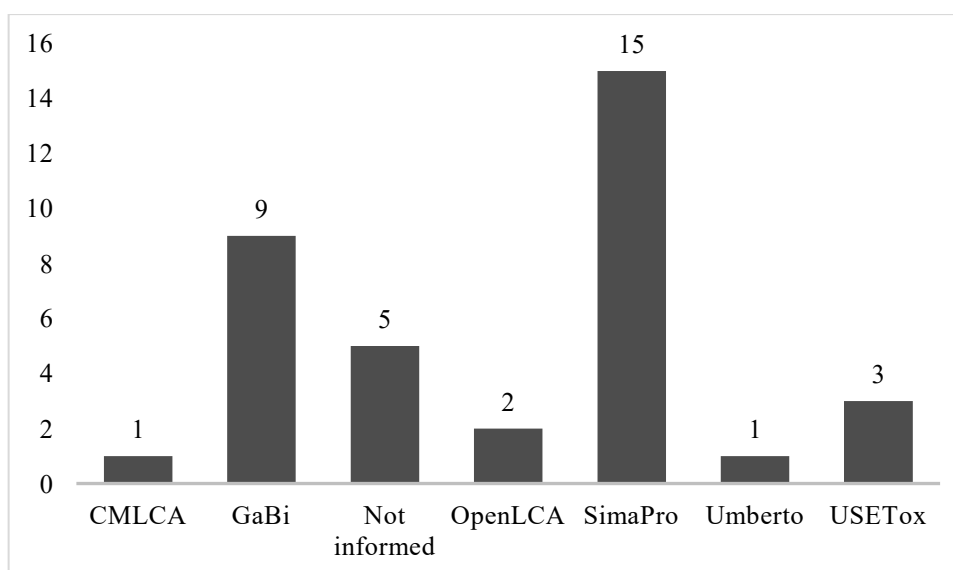
Figure 5. Distribution of articles by year of publication



Source: Authors (2025)

Analyzing the methods used, the main software employed to conduct LCAs in the articles found were SimaPro, followed by GaBi. Others, such as OpenLCA, appeared less frequently. In some publications, the software used was not specified. Figure 6 shows the main software used and their frequencies.

Figure 6. LCA Software used in the Analyzed Studies



Source: Authors (2025)

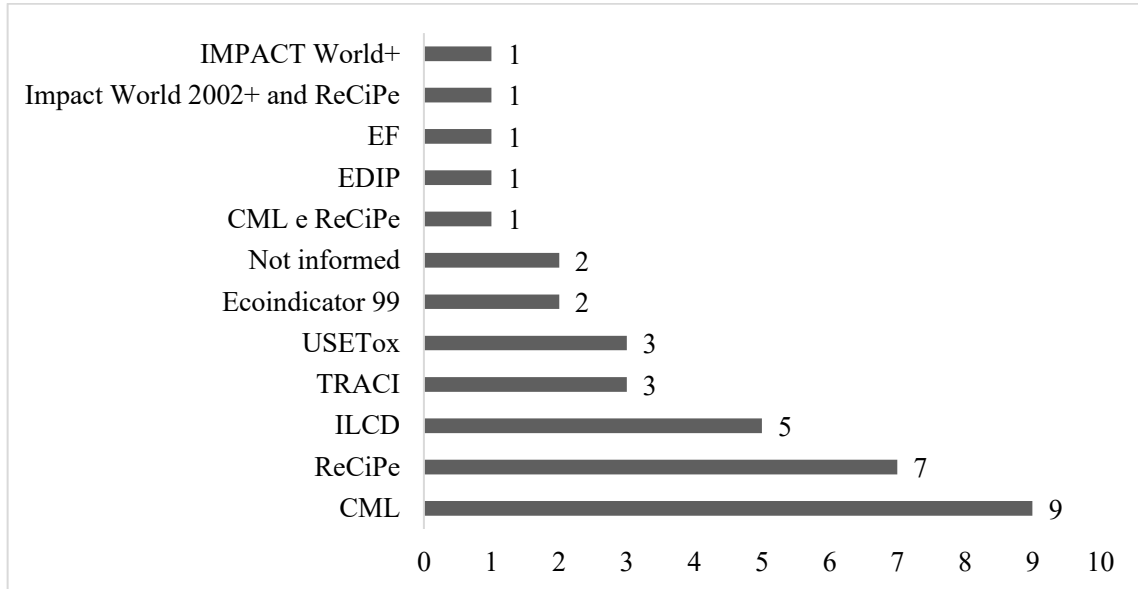
An important consideration in LCA studies is the choice of the functional unit (FU), a fundamental parameter that serves as a reference for the life cycle inventory formulation and can be used for comparison purposes. In LCAs applied to waste, the FU can be based either on the input or the output of the process. This means it can be defined by the waste entering the system (e.g., 1 ton of PCBW) or by the material recovered after processing (e.g., 1 kg of gold). Only 6 out of the 36 studies analyzed adopted this latter approach. Input-based FU appears most frequently, as the main objective of these studies is generally to identify the impacts associated with the waste flow (He et al., 2024).

Another important point is the classification of LCA as either attributional or consequential. The attributional approach focuses on the inherent aspects and impacts of the system studied, while the consequential approach emphasizes the consequences that may arise in other systems due to a particular product, process, or technology (He et al., 2024). None of the analyzed studies adopted the consequential approach, representing a significant gap for further research. Consequential LCA can substantially contribute to assessing impacts from a broader perspective, especially when considering adopting new processes, enabling a more comprehensive and strategic analysis that includes consequences in systems marginally related to the system studied.

To calculate the environmental impact in each category, the CML method was the most prominent, followed by ReCiPe. Some articles used both methods together for comparison purposes. Figure 7 shows the frequency of use of each Life Cycle Impact Assessment (LCIA)

method. In some cases, the articles analyzed the life cycle of PCBW using Material Flow Analysis (MFA) or by administering questionnaires and interviews for data collection.

Figure 7. Life Cycle Impact Assessment (LCIA) Methods used in the Analyzed Studies



Source: Authors (2025)

Regarding the allocation method, most articles either did not use or did not explicitly report the use of any specific method. Among those that mentioned allocation methods, mass allocation and economic allocation were the most prominent, often used together for comparison purposes. Other studies opted for system expansion instead of allocation criteria, considering that the products obtained at the end of the process could replace the extraction of virgin raw materials, thereby avoiding the environmental impacts associated with these processes.

Regarding metal recovery methods, the hydrometallurgical process prevailed in most articles that specified the method used and was mentioned in 68% of the cases. Notably, 30% of the articles did not specify the recovery method employed.

### 3.2. Content Analysis

For effective literature mapping, content analysis focused on categorizing and evaluating the selected studies according to the perspectives of the 36 works reviewed. The articles were grouped into three main approaches, based on the central theme of the analyzed articles and their relevance to PCBW management. The evaluated approaches were:

- **Secondary Material Recovery Process:** Encompasses studies investigating methods to recover precious metals from PCBW. This analysis is essential to identify hotspots in recycling processes and propose improvement opportunities. The studies include hydrometallurgical, pyrometallurgical, and biohydrometallurgical methods.
- **Reverse Logistics Management:** Centers on articles that address reverse logistics comprehensively, including PCBW collection, transportation, processing, and waste management policies.
- **Composition and Toxicity:** Focuses on the analysis of components present in PCBW and the assessment of its toxicity, including proposals for material substitution to reduce environmental and human health impacts if improperly discarded.

Table 1 shows the studies and their classification considering the three reported approaches.

Table 1 – Categorization of the analyzed articles

Approach	Articles	Quantity
Secondary Material Recovery Process	(Choi et al., 2023; Deng et al., 2016; Dias et al., 2023; Ghodrat et al., 2017; He et al., 2023; Hibbert; Ogunseitan, 2014; Iannicelli-Zubiani et al., 2017; Karan; Chakraborty, 2022; Kouloumpis; Yan, 2022; Liu et al., 2024; Nan et al., 2024; Rao et al., 2023; Rezaee et al., 2023; Rocchetti et al., 2013; Rubin et al., 2014; Song et al., 2015; Villares et al., 2016)	17
Reverse Logistics Management	(Alcántara-Concepción; Gavilán-García; Gavilán-García, 2016; Arain et al., 2022; Bian et al., 2016; Bovea; Ibáñez-Forés; Pérez-Belis, 2020; Ikhlal, 2017; Islam; Iyer-Raniga, 2023; Ismail; Hanafiah, 2021; Kwonpongsagoon; Jareemit; Kanchanapiya, 2017; Le et al., 2014; Pokhrel; Lin; Tsai, 2020; Rocha; Penteado, 2021; Xue et al., 2015; Yao et al., 2018)	13
Composition and toxicity	(Chancerel et al., 2009; Chen et al., 2016, 2021; Fuse; Tsunemi, 2012; Nili et al., 2024; Sudheshwar et al., 2023)	6

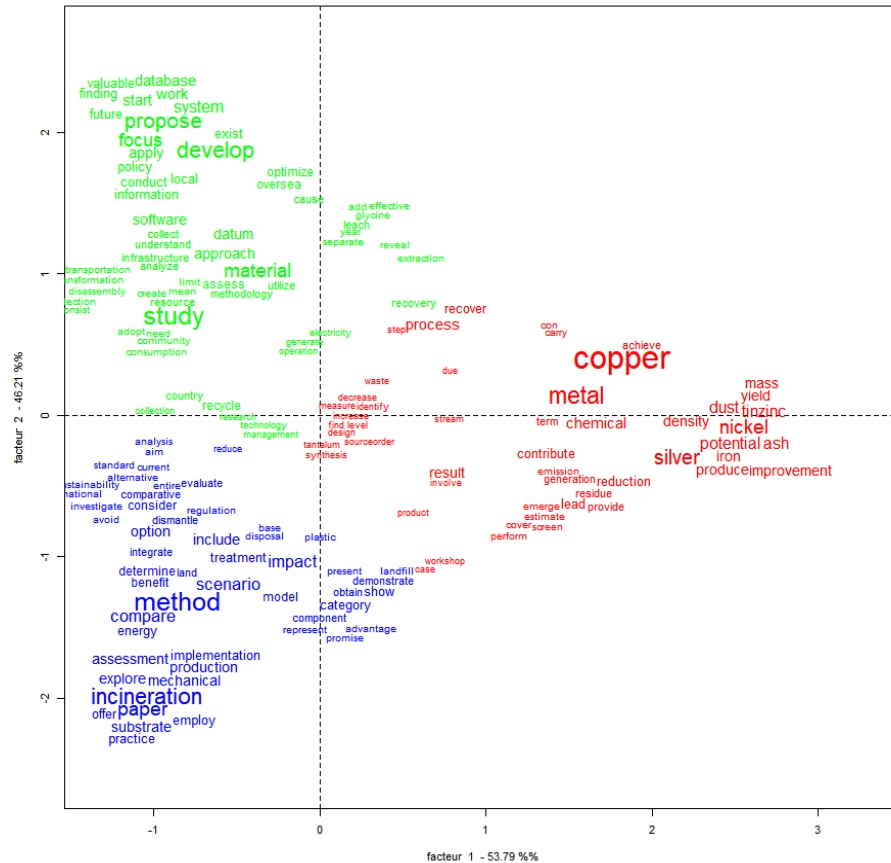
Source: Authors (2025)

Using the iRaMuTeQ software, the articles were also grouped according to the vocabulary used, so that, through Reinert's Analysis, similar articles were clustered, highlighting what differentiates the analyzed works.

The data were then organized into a graph illustrating the relationships between the classes (Camargo; Justo, 2021). For this analysis, the activated textual forms were limited to verbs and nouns, and the focus was on the concepts and actions addressed in the literature.

Figure 8 shows the division between classes, illustrating their relationship with two main factors, one on each axis of the graph. It clearly highlights the separation between the clusters, reinforcing the distinction of the thematic approaches.

Figure 8. Factorial analysis of the analyzed articles



Source: Authors (2025) – Software IRaMuTeQ

In the factor analysis, two main factors account for the differentiation of the article clusters. Factor 1, on the x-axis, explains 53.79% of the variation in cluster classification, while Factor 2, on the y-axis, explains 46.21%. Together, these two factors represent 100% of the causes that determined the formation of the three groups presented.

Factor 1 (horizontal axis) represents the transition between a technical approach, focused on chemical processes and metal recovery, in the positive direction, and a management approach in the negative direction. This indicates that on the right side of the axis are terms related to specific chemical processes, such as "metal," "chemical," and "process," while on the left side are words like "study," "develop," and "policy," which reflect broader themes focused on applied research and the development of waste management systems.

Factor 2 (vertical axis) differentiates the clusters between a proactive and innovative approach, in the positive direction, and practical and impact-focused analyses, in the negative direction. At the top of the axis, words such as "focus," "propose," and "material" stand out,

indicating an emphasis on innovation and development. In contrast, at the bottom are words such as "method," "impact," and "scenario," focusing on evaluation methods and comparative practices.

When analyzed together, these two factors provide a clearer view of the predominant themes in the literature and their thematic organization, distinguishing practical technical approaches from those related to management. This differentiation pattern is also reflected in the distribution of the identified classes.

Classes 2 and 3 (blue and green) are mainly distinguished by factor 2, as both are similarly positioned along the horizontal axis (factor 1) but in opposite directions along the vertical axis. Class 3, located in the positive region of factor 2, emphasizes the development of systems, policies, and solutions for waste management, as indicated by words like "develop," "policy," and "system." Conversely, class 2, situated in the negative region of factor 2, presents a more focused approach on analysis and comparison methods of different waste management scenarios, as reflected by words such as "method," "impact," and "scenario," reinforcing this analytical orientation.

Class 1 (red), in turn, stands out clearly from the other two primarily due to Factor 1 (horizontal axis). Located on the positive side of this axis, Class 1 concentrates words related to chemical processes and metal recovery, such as "copper," "metal," and "chemical." This reflects a more technical and specific approach, focused on analyzing processes and techniques for extracting and recovering valuable materials present in PCBs. Regarding Factor 2, Class 1 occupies an intermediate position, not showing a clear bias toward innovation or impact assessment, but maintaining a stronger emphasis on the technical and scientific nature of the research.

Thus, the horizontal axis (Factor 1) clearly defines the distinction between technical and strategic studies, while the vertical axis (Factor 2) separates more innovative and propositional approaches from evaluative and comparative practices. Thus, the combination of these two factors provides a comprehensive view of the predominant themes in the literature analyzed, highlighting both technological and chemical approaches, as well as waste management and assessment methodologies, revealing clear patterns and trends in the reviewed studies.

The Reinert classification analysis provides a view of literature based on the lexical structure of the studies. Based on this, it became evident that the categorization carried out through qualitative reading and analysis of the studies aligns with the statistical evaluation obtained using iRaMuTeQ. The following sections address each of the three categories separately.

### 3.2.1. *Secondary Material Recovery Process*

The Secondary Material Recovery Process category is the most prominent, comprising 17 articles (47.2% of the sample). In this category, the studies primarily focus on the environmental impacts of metal extraction methods from PCBs. These methods entail using chemicals, heat, bacteria, and energy. Some studies employed chemical process simulations to generate the life cycle inventory. For instance, Rubin et al. (2014) compared two copper extraction methods from PCBW and concluded that aqua regia has a lower environmental impact due to its reduced acidification potential. Conversely, Nan et al. (2024) reported that basic leaching with sodium hydroxide results in a lower environmental impact compared to leaching with nitric acid. In another study, Rao et al. (2023) investigated a hydrometallurgical process for recovering gold and copper from PCBW, identifying delamination—the removal of solder that connects electronic components—as the main hotspot.

Other studies conducted similar analyses using different processes. For example, Villares et al. (2016) examined a biomining operation in a prospective LCA—that is, carried out before the actual implementation of a product or process—demonstrating the potential of biomining as a sustainable technique for recycling precious metals. This highlights a promising avenue for future research, which could explore new biomining processes with lower environmental impacts, as well as assess their economic feasibility.

### 3.2.2. *Reverse Logistics Management*

The second prominent approach is reverse logistics management, which encompasses everything from waste collection and transportation to final disposal. This approach is not limited to Life Cycle Assessment (LCA), but also incorporates complementary methods such as material flow analysis, questionnaires, and system dynamics. Rocha and Penteadó (2021) reported that the recovery of metals, especially gold, from PCBs in the Campinas region offers significant environmental benefits. These authors demonstrated that an efficient reverse logistics system can substantially reduce environmental impacts.

In a different context, Islam and Iyer-Raniga (2023) analyzed PCBW management in Australia, showing that metal recovery followed by incineration of remaining components for energy recovery is the most environmentally sustainable solution for the Australian scenario. In Malaysia, Ismail and Hannafiah (2021) concluded that incineration would be the least impactful strategy due to its high energy efficiency. Xue et al. (2015) studied the reverse

logistics of PCBs in China and identified energy use throughout sorting, dismantling, recycling and transportation processes as the main hotspots, indicating that improving these stages could lead to significant reductions in environmental impact.

### 3.2.3. *Composition and Toxicity*

The composition and toxicity approach is notable for applying the USETox method to assess waste toxicity and for proposing biobased materials as alternatives to PCB components. This approach is essential for mitigating the environmental and human health impacts associated with the improper disposal of PCBs. Chen et al. (2016) and Chen et al. (2021) assessed the composition and toxicity of PCBs in China over a 10-year period, demonstrating the importance of regulations to reduce material toxicity. These studies highlight that effective public policies are crucial to mitigating the environmental impacts associated with WEEE. Similar studies by Nili et al. (2024) support these findings, showing the need for continuous innovation in PCB composition to minimize toxicity. In addition, Fuse e Tsunemi (2012) and Chancerel et al. (2009) used Material Flow Analysis (MFA) to examine the flow of metals such as lead, tin, silver, and gold throughout the PCB life cycle—from raw material extraction to production and end-of-life—further reinforcing the need for effective public policies. Sudheshwar (2023) proposed a biobased PCB in which part of the metallic fraction is replaced by a cellulose substrate, which can significantly reduce environmental impacts across its life cycle, both in terms of raw material extraction and end-of-life operations, showing that it is promising for future research.

The three approaches are interconnected, although they are discussed separately. Recycling methods that use fewer chemicals or less energy offer significant gains in terms of environmental sustainability. For example, substituting chemicals in hydrometallurgical processes can be effective, as demonstrated by Nan et al. (2024) and Rezaee et al. (2023). Emerging techniques such as biometallurgy also show promising prospects. Investigating reverse logistics management is crucial, as a holistic approach can reduce environmental impacts at various stages, including collection, transport, and pre-processing. Similarly, PCB composition affects both the recycling process and the environmental impacts associated with improper disposal. Developing new compositions aimed at reducing component toxicity, such as the use of biobased or paper-based materials, and the elimination of lead and other toxic metals from PCB soldering, can significantly reduce environmental and human health risks while also facilitating recycling. However, there are still no studies assessing the feasibility of implementing these processes on a large scale (Deng et al., 2016; Sudheshwar et al., 2023)

### 3.2.4. *Research Implications*

In summary, recycling processes, reverse logistics management, and composition and toxicity are interconnected in the pursuit of environmentally sustainable management of PCBW. The effectiveness of less impactful recycling techniques is enhanced by efficient reverse logistics systems and robust public policies. However, there are gaps in the literature that present opportunities for future research, such as developing hybrid recycling methods, exploring public policies in different regional contexts, and investigating new biobased materials. Integrating MFA with LCA can provide a holistic view of environmental impacts and identify critical points in PCBW management. MFA maps and quantifies the entire path of raw materials, products, by-products, and waste, showing where the largest material flows occur. Based on this data, LCA calculates impacts such as greenhouse gas emissions, energy consumption, and toxicity at each stage of the life cycle. Thus, we not only understand “how much” material circulates, but also “where” and “why” it generates the greatest impacts. This comprehensive information is essential for guiding adjustments in production processes, defining more efficient reverse logistics routes, and developing recycling policies that make a significant difference.

Therefore, to advance toward more sustainable management of PCBW, it is essential to adopt a holistic approach that integrates recycling, reverse logistics, and innovation in PCB composition. Public and regulatory policies also need to reflect this integration, encouraging solutions that address these three pillars simultaneously, ensuring that improvements in one area are not offset by issues in the others.

Throughout the studies analyzed, it can be observed that recycling methods, particularly hydrometallurgical and pyrometallurgical processes, have been widely discussed in the literature. However, there is a noticeable absence of studies related to the economic assessment and scalability of the processes investigated. Most of the works are limited to laboratory-scale trials, without robust estimates of investment, operational costs, or financial returns under industrial conditions (Iannicelli-Zubiani et al., 2017; Nan et al., 2024; Rao et al., 2023; Villares et al., 2016). Therefore, techno-economic analyses and process engineering studies are needed to investigate the feasibility of these methods in large-scale production.

Furthermore, the literature addresses challenges related to e-waste collection and transportation, particularly in countries where reverse logistics infrastructure is still underdeveloped. Although reverse logistics is widely mentioned, it is important to consider the specific geographical and economic limitations of developing countries, such as Brazil. This represents a significant gap, as efficient reverse logistics for e-waste depends not only on

legislation and sectoral agreements but also on economic incentives that enable companies and consumers to participate in the processes.

Finally, in the field of public policy, although studies (Alcántara-Concepción; Gavilán-García; Gavilán-García, 2016; Pokhrel; Lin; Tsai, 2020) advocate for strengthening regulations for WEEE management, few analyze how these policies can be effectively implemented in contexts with high informality in the waste sector. Additionally, another underexplored area is applying dynamic life cycle assessment (LCA) powered by real-time data. The integration of Internet of Things (IoT) sensors and continuous data acquisition systems would allow for instant monitoring of emissions and energy flows throughout the reverse logistics chain, enabling rapid operational adjustments and evidence-based decision-making.

#### **4. CONCLUSIONS**

The analyses revealed a growing body of literature on Life Cycle Assessment (LCA) in printed circuit board (PCB) waste management, and 2023 recorded the highest number of publications by the end of the research period. Moreover, China, a developing country, leads with the greatest number of publications, indicating that other developing countries, such as Brazil, may follow this trend and produce more relevant research in this context.

The approaches identified in this study allowed for an understanding of how life cycle-related research in PCBW management contributes to different fields. The articles on recycling processes aim to identify opportunities to make these processes less environmentally impactful. Another prominent approach relates to reverse logistics, covering assessments from WEEE collection to final treatment. Although Brazil has a relevant number of scientific publications on this topic, the country still has some shortcomings, such as low collection rates and limited incentives. Thus, it can be stated that there is a gap for advancing the structured implementation of reverse logistics management for PCB waste at the national level. This leads to the need to export PCBW due to a lack of local infrastructure. Biometallurgy still has considerable potential for further study and development, whereas hydro- and pyrometallurgical processes are more established, as reflected in the literature. However, these processes can still be improved to reduce their potential environmental impact.

Furthermore, the use of Life Cycle Assessment (LCA) and Material Flow Analysis (MFA), either combined or in parallel, can contribute to improving end-of-life strategies for printed circuit boards, especially in developing countries that lack the infrastructure for better waste disposal and implementation of structured reverse logistics management at the national level. LCA and MFA integration offers a broader and more detailed perspective on the

environmental impacts associated with PCBW management. While LCA evaluates environmental impacts throughout the entire product life cycle, MFA provides a more detailed understanding of material flows within the system, identifying where the greatest bottlenecks or losses occur during the waste management process.

By integrating these two tools, it is possible not only to identify hotspots in PCB life cycles, but also to visualize how materials move through the different stages, from collection and transport to recycling processes. This integration is particularly relevant in complex systems, where the efficiency of reverse logistics may be limited by geographic and/or economic barriers. MFA, in turn, helps identify critical points where improvements in collection or transport could significantly impact the quantity and quality of waste reaching recycling facilities, while LCA can quantify the environmental benefits of such improvements.

It is important to highlight that the conclusions of this study not only emphasize the need for further research and technological innovation in PCBW management but also underscore the importance of effective public policies and greater environmental awareness to ensure the proper disposal of all types of e-waste. Adopting more sustainable technologies and improving reverse logistics are essential to mitigating environmental impacts. Furthermore, fostering international collaboration can accelerate the development of sustainable and innovative solutions in less developed countries and strengthen the establishment of reverse supply chains.

## **ACKNOWLEDGMENTS**

The authors are grateful to the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES) for financial support, grant number 88887.967130/2024-00, and to the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq), grant number 408190/2021-3.

## **CONFLICTS OF INTEREST**

The authors declare no conflicts of interest.

## **REFERENCES**

- ALCÁNTARA-CONCEPCIÓN, Víctor; GAVILÁN-GARCÍA, Arturo; GAVILÁN-GARCÍA, Irma C. Environmental impacts at the end of life of computers and their management alternatives in México. **Journal of Cleaner Production**, v. 131, p. 615–628, 10 set. 2016.
- ALSHAMSI, Ahmed; DIABAT, Ali. A reverse logistics network design. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 37, p. 589–598, out. 2015.

ARAIN, Aubrey L. *et al.* Material flow, economic and environmental life cycle performances of informal electronic waste recycling in a Thai community. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 180, 1 maio 2022.

AYVAZ, Berk; BOLAT, Bersam; AYDIN, Nezir. Stochastic reverse logistics network design for waste of electrical and electronic equipment. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 104, p. 391–404, nov. 2015.

BALDÉ, Cornelis P. *et al.* **Global E-waste Monitor 2024**. Genebra/Bonn: International Telecommunication Union (ITU) e United Nations Institute for Training and Research (UNITAR), 2 nov. 2024. Disponível em: <<https://www.itu.int/itu-d/sites/environment.>>.

BARDIN, Lawrence. **Análise de Conteúdo**. 1. ed. São Paulo: Grupo Almedina, 2011.

BIAN, Jinghong *et al.* Comparative environmental life cycle assessment of waste mobile phone recycling in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 131, p. 209–218, 10 set. 2016.

BOVEA, María D.; IBÁÑEZ-FORÉS, Valeria; PÉREZ-BELIS, Victoria. Repair vs. replacement: Selection of the best end-of-life scenario for small household electric and electronic equipment based on life cycle assessment. **Journal of Environmental Management**, v. 254, 15 jan. 2020.

BRASIL. Lei nº 12.305/2010 – Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). . 2 ago. 2010.

BRASIL. Decreto nº 10.240/2020 – Logística Reversa de Produtos Eletroeletrônicos. . 12 fev. 2020.

CAMARGO, Brigido Vizeu; JUSTO, Ana Maria. **Tutorial para uso do software IRaMuTeQ**. Florianópolis: UFSC: [S.n.].

CHANCEREL, Perrine *et al.* Assessment of precious metal flows during preprocessing of waste electrical and electronic equipment. **Journal of Industrial Ecology**, v. 13, n. 5, p. 791–810, out. 2009.

CHEN, Mengjun *et al.* Evolution of electronic waste toxicity: Trends in innovation and regulation. **Environment International**, v. 89–90, p. 147–154, 1 abr. 2016.

CHEN, Shuyuan *et al.* Comparative effectiveness of technical and regulatory innovations to reduce the burden of electronic waste. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 167, 1 abr. 2021.

CHOI, B. *et al.* Sustainable recycling process for tantalum recovery from printed circuit boards. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 198, 1 nov. 2023.

DE MEDEIROS FILHO, Adonis Reis; RUSSO, Suzana Leitão. Trademarks as an indicator: Systematic review and bibliometric analysis of literature. **Biblios**, n. 71, p. 50–67, 2018.

DENG, Yelin *et al.* Life cycle assessment of flax-fibre reinforced epoxidized linseed oil composite with a flame retardant for electronic applications. **Journal of Cleaner Production**, v. 133, p. 427–438, 1 out. 2016.

DIAS, Josinaldo *et al.* Environmental and Technological Assessment of Operations for Extraction and Concentration of Metals in Electronic Waste. **Sustainability (Switzerland)**, v. 15, n. 17, 1 set. 2023.

EUROPEAN UNION JOINT RESEARCH CENTRE (EU-JRC). **Product Environmental Footprint Category Rules Guidance (PEF) – Version 6.3**, 2018.

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

FUSE, Masaaki; TSUNEMI, Kiyotaka. Assessment of the effects of the Japanese shift to lead-free solders and its impact on material substitution and environmental emissions by a dynamic material flow analysis. **Science of the Total Environment**, v. 438, p. 49–58, 1 nov. 2012.

GHODRAT, Maryam *et al.* A thermodynamic-based life cycle assessment of precious metal recycling out of waste printed circuit board through secondary copper smelting. **Environmental Development**, v. 24, p. 36–49, 1 dez. 2017.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GOLLAKOTA, Anjani R. K.; GAUTAM, Sneha; SHU, Chi-Min. Inconsistencies of e-waste management in developing nations – Facts and plausible solutions. **Journal of Environmental Management**, v. 261, p. 110234, 2020.

HE, Yifeng *et al.* Environmental footprint analysis of gold recycling from electronic waste: A comparative life cycle analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 432, 20 dez. 2023.

HE, Yifeng *et al.* Driving sustainable circular economy in electronics: A comprehensive review on environmental life cycle assessment of e-waste recycling. **Environmental Pollution**, v. 342, 1 fev. 2024.

HIBBERT, Kathleen; OGUNSEITAN, Oladele A. Risks of toxic ash from artisanal mining of discarded cellphones. **Journal of Hazardous Materials**, v. 278, p. 1–7, 15 ago. 2014.

IANNICELLI-ZUBIANI, E. M. *et al.* Environmental impacts of a hydrometallurgical process for electronic waste treatment: A life cycle assessment case study. **JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION**, v. 140, p. 1204–1216, maio 2017.

IKHLAYEL, Mahdi. Environmental impacts and benefits of state-of-the-art technologies for E-waste management. **Waste Management**, v. 68, p. 458–474, 1 out. 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14040: Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework**. International Organization for Standardization, , 2006a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14044: Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines**. International Organization for Standardization, , 2006b.

ISLAM, Md Tasbirul; IYER-RANIGA, Usha. Life cycle assessment of e-waste management system in Australia: Case of waste printed circuit board (PCB). **Journal of Cleaner Production**, v. 418, 15 set. 2023.

ISMAIL, Haikal; HANAFIAH, Marlia M. Evaluation of e-waste management systems in Malaysia using life cycle assessment and material flow analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 308, 25 jul. 2021.

KARAN, Poulami; CHAKRABORTY, Rajat. E-waste derived silica-alumina for eco-friendly and inexpensive Mg-Al-Ti photocatalyst towards glycerol carbonate (electrolyte) synthesis: Process optimization and LCA. **Waste Management**, v. 140, p. 213–224, 1 mar. 2022.

KOULOUMPIS, Victor; YAN, Xiaoyu. Life cycle assessment of a novel metal recovery method from co-processing of coal mine waste and low-grade printed circuit boards. **Journal of Environmental Management**, v. 314, 15 jul. 2022.

KWONPONGSAGOON, Suphaphat; JAREEMIT, Sawanya; KANCHANAPIYA, Premrudee. Environmental impacts of recycled nonmetallic fraction from waste printed circuit board. **International Journal of GEOMATE**, v. 12, n. 34, p. 8–14, 2017.

LE, Hoang Long *et al.* Assessment of metal recovery efficiency for waste printed circuit boards in Vietnam with memrecs and different end-of-life scenarios. **Journal of Solid Waste Technology and Management**, v. 40, n. 2, p. 100–116, 1 maio 2014.

LIU, Kang *et al.* Negative-carbon recycling of copper from waste as secondary resources using deep eutectic solvents. **Journal of Hazardous Materials**, v. 465, 5 mar. 2024.

MULYA, Kyle Sebastian *et al.* A systematic review of life cycle assessment of solid waste management: Methodological trends and prospects. **Science of the Total Environment**, v. 831, 20 jul. 2022.

NAN, Tianxiang *et al.* Process simulation and life cycle assessment of hydrometallurgical recycling routes of waste printed circuit boards. **Journal of Cleaner Production**, v. 435, 5 jan. 2024.

NILI, Sheida *et al.* Exploring the environmental impact of metallic element usage in smartphone evolution. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 205, 1 jun. 2024.

OUZZANI, Mourad *et al.* Rayyan-a web and mobile app for systematic reviews. **Systematic Reviews**, v. 5, n. 1, 5 dez. 2016.

PAGE, Matthew J. *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **Systematic Reviews**, v. 10, n. 1, 1 dez. 2021.

POKHREL, Prakash; LIN, Sheng Lung; TSAI, Chi Ting. Environmental and economic performance analysis of recycling waste printed circuit boards using life cycle assessment. **Journal of Environmental Management**, v. 276, 15 dez. 2020.

PRANCKUTĖ, Raminta. Web of Science (WoS) and Scopus: the titans of bibliographic information in today's academic world. **Publications**, v. 9, n. 1, 1 mar. 2021.

RAO, Mudila Dhanunjaya *et al.* Life cycle analysis on sequential recovery of copper and gold from waste printed circuit boards. **Waste Management**, v. 171, p. 621–627, 1 nov. 2023.

REINERT, Max. Alceste une méthodologie d'analyse des données textuelles et une application: Aurelia De Gerard De Nerval. **Bulletin of Sociological Methodology/Bulletin de Méthodologie Sociologique**, v. 26, n. 1, p. 24–54, 1 mar. 1990.

REZAEI, Mohammad *et al.* Eco-friendly recovery of base and precious metals from waste printed circuit boards by step-wise glycine leaching: Process optimization, kinetics modeling, and comparative life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 389, 20 fev. 2023.

ROCCHETTI, Laura *et al.* Environmental impact assessment of hydrometallurgical processes for metal recovery from WEEE residues using a portable prototype plant. **Environmental Science and Technology**, v. 47, n. 3, p. 1581–1588, 5 fev. 2013.

ROCHA, Tiago Barreto; PENTEADO, Carmenlucia Santos Giordano. Life cycle assessment of a small WEEE reverse logistics system: Case study in the Campinas Area, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 314, 10 set. 2021.

RUBIN, Ricardo Soares *et al.* Utilization of Life Cycle Assessment methodology to compare two strategies for recovery of copper from printed circuit board scrap. **Journal of Cleaner Production**, v. 64, p. 297–305, 1 fev. 2014.

SONG, Qingbin *et al.* Environmental risk assessment of CRT and PCB workshops in a mobile e-waste recycling plant. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 16, p. 12366–12373, 27 ago. 2015.

SUDHESHWAR, Akshat *et al.* The need for design-for-recycling of paper-based printed electronics – a prospective comparison with printed circuit boards. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 189, 1 fev. 2023.

TRANFIELD, David; DENYER, David; SMART, Palminder. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. **British Journal of Management**, v. 14, n. 3, p. 207–222, 2003.

VAN ECK, Nees Jan; WALTMAN, Ludo. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. **Scientometrics**, v. 84, n. 2, p. 523–538, ago. 2010.

VILLARES, Marco *et al.* Applying an ex-ante life cycle perspective to metal recovery from e-waste using bioleaching. **Journal of Cleaner Production**, v. 129, p. 315–328, 15 ago. 2016.

XAVIER, Lúcia Helena; OTTONI, Marianna; ABREU, Leonardo Picanço Peixoto. A comprehensive review of urban mining and the value recovery from e-waste materials. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 190, 1 mar. 2023.

XAVIER, Lúcia Helena; OTTONI, Marianna; LEPAWSKY, Josh. Circular economy and e-waste management in the Americas: Brazilian and Canadian frameworks. **Journal of Cleaner Production**, v. 297, 15 maio 2021.

XUE, Mianqiang *et al.* Waste management of printed wiring boards: A life cycle assessment of the metals recycling chain from liberation through refining. **Environmental Science and Technology**, v. 49, n. 2, p. 940–947, 20 jan. 2015.

YAO, Liming *et al.* An integrated method of life-cycle assessment and system dynamics for waste mobile phone management and recycling in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 187, p. 852–862, 20 jun. 2018.

### **CAPÍTULO III: ARTIGO #2: PREVISÃO DA GERAÇÃO DE REEE NA AMÉRICA LATINA: MODELO DE REGRESSÃO BASEADO EM INDICADORES SOCIOECONÔMICOS**

**Resumo:** O aumento na geração de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE) é uma preocupação crescente, impulsionado pelo consumo acelerado de dispositivos eletrônicos e sua curta vida útil. Este artigo apresenta um modelo de regressão logarítmico para estimar a geração de REEE em 18 países latino-americanos, utilizando como variável o Produto Interno Bruto (PIB) per capita. Desenvolvido como alternativa a abordagens complexas que exigem grandes volumes de dados históricos, o modelo obteve um bom ajuste ( $R^2 = 0,88$ ), baixos erros preditivos (MAE = 0,945). Além disso, o modelo se destaca por sua simplicidade, sendo uma ferramenta prática para gestores preverem demandas de reciclagem e planejarem estratégias de gestão de resíduos em países em desenvolvimento. Estudos futuros poderão explorar a inclusão de novas variáveis e avaliar o modelo em contextos geográficos distintos, contribuindo para a adaptação de estratégias de gestão sustentável de resíduos em regiões com diferentes níveis de desenvolvimento.

**Palavras-chaves:** Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos, Gestão de Resíduos, Geração de REEE, Regressão Linear, Economia Circular, América Latina.

### **CHAPTER III: ARTICLE #2: FORECASTING WEEE GENERATION IN LATIN AMERICA: A REGRESSION MODEL BASED ON SOCIO-ECONOMIC INDICATORS**

**Abstract:** The growing generation of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)—driven by the rapid consumption of electronic devices and their short lifespans—has become an escalating concern worldwide. This article proposes a log-linear-regression model to estimate WEEE generation in 18 Latin American countries, using gross domestic product (GDP) per capita as the sole predictor. Designed as a simpler alternative to data-intensive approaches, the model achieved a strong fit ( $R^2 = 0.88$ ) and low predictive error (MAE = 0.945). Thanks to its straightforward structure, the tool enables decision-makers to forecast recycling demand and plan waste-management strategies in developing economies more easily. Future research could incorporate additional variables and test the model in other geographic contexts, helping tailor sustainable waste-management strategies to regions with different development levels.

**Keywords:** Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE), Waste Management, WEEE Generation, Linear Regression, Circular Economy, Latin America.

## 1. INTRODUÇÃO

A gestão de resíduos sólidos constitui um desafio global crescente, e a busca por soluções sustentáveis para essa questão tem se tornado uma preocupação internacional de grande urgência (Mulya et al., 2022). O acelerado avanço tecnológico e o ritmo intenso da produção industrial contribuíram significativamente para o aumento na geração de resíduos, trazendo à tona a necessidade de compreender e mitigar os impactos ambientais associados ao descarte inadequado, especialmente de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos. Esses resíduos apresentam uma dualidade única: contêm não apenas substâncias perigosas, mas também materiais de alto valor econômico, ambos demandando um gerenciamento adequado para mitigar riscos e promover a recuperação de recursos (Pokhrel; Lin; Tsai, 2020).

Os REEE frequentemente contêm substâncias tóxicas, como chumbo, mercúrio, cádmio, arsênio, retardantes de chama bromados (BFRs) etc. (Tsydenova; Bengtsson, 2011), todos com alto potencial para causar danos ambientais e à saúde humana se descartados inadequadamente. Esses elementos químicos, ao se acumularem no solo e na água, podem provocar contaminações que afetam a fauna, a flora e a saúde das populações próximas aos locais de descarte. Estudos mostram que a exposição prolongada a essas substâncias pode resultar em problemas neurológicos, renais e respiratórios, além de comprometer ecossistemas inteiros (Baldé et al., 2024; Nan et al., 2024). A presença desses materiais torna o descarte e o tratamento de REEE um desafio crítico, especialmente em países onde os sistemas de gestão de resíduos são insuficientes para prevenir a contaminação.

Ao mesmo tempo, os REEE contêm materiais valiosos, como ouro, prata, cobre, platina, paládio e metais raros, que são essenciais para diversas indústrias de alta tecnologia e para a produção de novos equipamentos eletrônicos (Pokhrel; Lin; Tsai, 2020). Estima-se que as concentrações de metais preciosos em resíduos eletrônicos, como as Placas de Circuito Impresso (PCI), sejam significativamente mais altas do que em muitas minas de metais tradicionais, o que torna a recuperação desses materiais não apenas ecologicamente importante, mas também economicamente viável e estrategicamente vantajosa para reduzir a dependência da extração mineral (Rao et al., 2023). Além disso, a recuperação de metais valiosos dos REEE representa uma oportunidade fundamental para a promoção de uma economia circular, pois permite a reintegração desses materiais no ciclo produtivo, diminuindo a pressão sobre os recursos naturais e promovendo uma cadeia de produção mais sustentável (Rocha; Penteado, 2021).

Com o crescimento exponencial desses resíduos, torna-se essencial o desenvolvimento de métodos de previsão de geração que permitam às autoridades e empresas planejarem e

implementarem uma gestão da logística reversa eficaz e sustentável dos REEE. O volume de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos vem aumentando, com um registro de aproximadamente 62 milhões de toneladas geradas em 2022, o que representa uma média de 7,8 kg per capita (Baldé et al., 2024). Entretanto, apenas 22,3% desse volume (13,8 milhões de toneladas) foi devidamente registrado, coletado e reciclado, evidenciando uma lacuna na gestão da logística reversa dos resíduos e uma oportunidade para explorar novas abordagens preditivas e regulatórias (Baldé et al., 2024). Isso pode acarretar perda de materiais que poderiam ser reaproveitados e um risco de disseminação de poluentes, reforçando a necessidade de métodos preditivos que orientem o planejamento para a coleta transporte, tratamento e descarte de REEE.

O Brasil figura como o segundo maior gerador de REEE das Américas com 2,4 milhões de toneladas geradas em 2022, seguido pelo México, com 1,5 milhões. Em termos mundiais, China, com 12 milhões de toneladas e Estados Unidos, com 7,2 milhões de toneladas são os maiores geradores de REEE.

Em termos de legislação, o Brasil conta com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que obriga os fabricantes a implantarem um sistema de logística reversa (LR), incluindo o setor de eletroeletrônicos (Brasil, 2010). O Decreto 10.240/2020, por sua vez, fixou metas específicas para REEE, com destaque para, até o ano de 2025, ter uma taxa de coleta formal de 17 % da massa colocada no mercado (Brasil, 2020). Para cumprir essas metas, atuam operadoras de LR como a Green Eletron e a Associação Brasileira de Reciclagem de Eletroeletrônicos (ABREE), que firmam parcerias e oferecem um sistema abrangente às empresas aderentes. De acordo com relatórios recentes, a Green Eletron coletou 4610 t de REEE em 2022 (Brasil; Ministério Do Meio Ambiente E Mudança Do Clima, 2024) e a ABREE recolheu 1245 t em 2021 (Associação Brasileira De Reciclagem De Eletroeletrônicos E Eletrodomésticos – ABREE, 2022).

A previsão precisa da geração de REEE não apenas permite que os gestores públicos e privados planejem a infraestrutura necessária, mas também facilita a criação de políticas públicas que incentivem uma economia (Abbondanza; Souza, 2019). Em países em desenvolvimento, como os da América Latina, onde a demanda por dispositivos eletrônicos cresce rapidamente, mas a infraestrutura de tratamento de resíduos permanece limitada, modelos preditivos podem fornecer uma base para o investimento em tecnologias de reciclagem e na construção de instalações adequadas.

Alguns estudos analisam a geração de REEE com a regressão linear como ferramenta principal, como Kusch e Hills (2017), com foco na Europa e Helena Xavier, Cristine Giese e

Freitas Lins (2018), que avaliaram a relação de variáveis socioeconômicas com a geração de REEE na América do Sul, mostrando o Brasil como *outlier*. Porém, nenhum deles propõe um modelo preditivo para a América Latina, realizando além da regressão outros testes estatísticos para atestar a confiabilidade da equação gerada. A ausência de dados limita a capacidade de antecipar e gerenciar eficientemente o crescimento dos resíduos nas nações latino-americanas. Assim, este estudo busca preencher essa lacuna, propondo uma equação preditiva para calcular a geração anual per capita de REEE na América Latina a partir de indicadores socioeconômicos regionais.

Ao fornecer uma abordagem regionalizada e validada para a previsão de geração de REEE, este estudo contribui para a literatura ao oferecer ferramentas práticas para a gestão de resíduos eletrônicos em países da América Latina, possibilitando um sistema de gestão da logística reversa mais eficiente desses materiais.

## **2. REVISÃO DA LITERATURA**

Para compreender os métodos preditivos existentes para a geração de REEE, foi realizada uma revisão sistemática da literatura com o objetivo de mapear as diferentes abordagens utilizadas. A revisão sistemática é amplamente adotada na literatura científica por proporcionar um protocolo bem estabelecido, conferindo maior rigor e transparência ao processo. Conforme destacado por Tranfield, Denyer e Smart (2003), a revisão sistemática permite consolidar o conhecimento científico acumulado por meio de uma metodologia clara e reproduzível, aumentando a confiabilidade dos resultados.

### **2.1. Metodologia da Revisão Sistemática**

Neste estudo, o método PRISMA foi utilizado para conduzir a revisão. Esse protocolo é amplamente aplicado em estudos de revisão, pois explicita as etapas de busca, seleção e exclusão, tornando o processo de pesquisa transparente ao indicar as estratégias de busca, os resultados obtidos e os critérios de inclusão e exclusão adotados (Page et al., 2021).

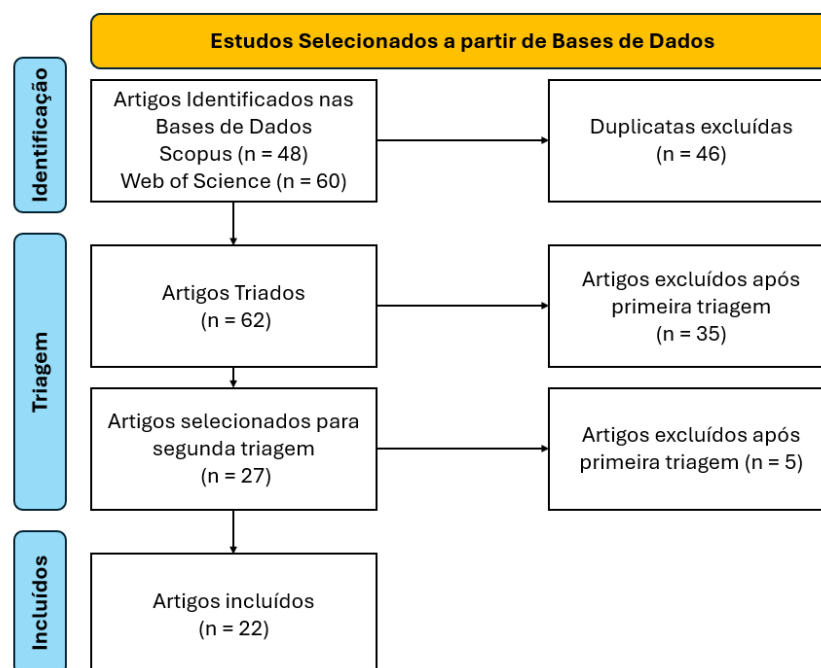
Foram selecionadas as bases de dados Scopus e Web of Science. Segundo Prankutê (2021), essas são as principais bases de dados para análise de informações bibliográficas, pois oferecem abrangência e precisão para diversos objetivos de pesquisa, além de disponibilizarem uma ampla gama de índices especializados, o que garante maior precisão, transparência e controle dos dados.

Neste estudo, o objetivo da revisão foi mapear os métodos existentes para a previsão da geração de REEE. A busca foi conduzida utilizando palavras-chave específicas relacionadas à previsão da geração de REEE, resultando na seguinte string de busca: ("*WEEE Generation*" OR "*WEEE Prediction*" OR "*E-waste Forecasting*" OR "*Electronic Waste Forecasting*").

Inicialmente, foram identificados 108 artigos. Os dados referentes a esses artigos foram extraídos das bases de dados, e a ferramenta Rayyan foi utilizada para facilitar a análise dos documentos. Segundo Ouzzani et al. (2016), Rayyan permite uma análise mais eficiente, oferecendo funcionalidades para separar artigos incluídos e excluídos de acordo com critérios definidos. Durante esse processo, foram identificados e removidos 46 artigos duplicados, resultando em um total de 62 artigos. Após uma leitura atenta dos títulos e resumos, foram aplicados critérios de exclusão, sendo eles: artigos que não abordam diretamente modelos preditivos de geração de REEE, artigos que focam exclusivamente em tecnologias de reciclagem de REEE, estudos sobre tendências e regulamentações de REEE e estudos voltados para comportamento dos consumidores e aspectos culturais da reciclagem de REEE.

Ao final do processo de seleção, restaram 27 artigos para leitura completa. Destes, um se mostrou focado na análise de legislações, em vez de modelos preditivos, e quatro não estavam acessíveis para consulta integral, resultando em um total de 22 artigos incluídos na revisão. Esses artigos foram lidos e analisados com base em sua temática principal e em características gerais, permitindo a extração de informações sobre o estado da arte atual. Além disso, uma categorização foi realizada de acordo com o enfoque específico de cada estudo. A Figura 1 apresenta o diagrama PRISMA elaborado para esta revisão.

Figura 1 - Diagrama PRISMA da Revisão



Fonte: Autores (2025)

Para organizar as informações relevantes, como ano de publicação, método, resultados, conclusões e país de origem, foi elaborada uma planilha no Excel, permitindo o registro sistemático dos dados dos artigos. Com a definição dos artigos incluídos na revisão, foi conduzida uma análise descritiva da literatura, com foco em aspectos gerais dos estudos selecionados, como país de origem, distribuição por ano de publicação e características metodológicas específicas, incluindo o tipo de método preditivo utilizado.

## 2.2. Análise Quantitativa

Primeiramente, destaca-se a forte presença de estudos realizados no Brasil e na China, com 6 e 5 estudos, respectivamente, o que está relacionado ao elevado potencial desses países como geradores de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE), conforme indicado por Baldé et al. (2024). Além do Brasil e da China, a Jordânia ocupa o terceiro lugar em número de publicações, com 2 publicações, enquanto outros países, como Austrália, Itália, Coreia do Sul, Índia, entre outros, aparecem com apenas um artigo publicado cada.

Em relação ao ano de publicação, o primeiro artigo data de 2012. Até 2020, o número de artigos publicados relacionados a essa temática manteve-se entre 1 e 2 por ano. Em 2021, observou-se um aumento significativo, com 5 publicações. Esse pico coincide com o contexto da pandemia de COVID-19, período em que possivelmente ocorreram mudanças no perfil de

geração de resíduos, o que pode ter motivado o aumento nas publicações sobre o tema. Em 2022, o número de publicações retornou ao patamar anterior, permanecendo estável até a data da realização deste estudo.

### 2.3. Análise Qualitativa

A partir da análise detalhada dos 22 artigos incluídos na revisão, realizou-se uma avaliação abrangente dos métodos preditivos utilizados para estimar a geração de REEE. De forma geral, os estudos podem ser agrupados em três categorias principais de modelos preditivos, identificados ao longo da leitura e registro das informações.

A primeira categoria de modelo preditivo encontrada na literatura é baseada em regressão linear. Esses estudos coletaram variáveis possivelmente correlacionadas com a geração de REEE, utilizando a regressão com a geração de REEE como variável dependente. Kusch e Hills (2017) propuseram uma equação para esse cálculo a partir de uma regressão linear obtida a partir do Produto Interno Bruto per capita com paridade de poder de compra (PIB per capita PPP), que segundo os autores, é uma variável que se relaciona diretamente com a geração de REEE justamente por ter relação com o poder econômico do local estudado.

Porém, os dados analisados pelos autores foram apenas de países europeus, com exceção de Luxemburgo, que foi desconsiderado por ter características econômicas muito diferentes dos demais, enquanto países de outras regiões não foram analisados. Assim, para um país em uma localidade com história, cultura e economia diferentes dos países europeu, como é o caso do Brasil, pode ser que o comportamento em questão seja de outra natureza. Assim, cabe a realização de uma análise focada na região em que se localiza o Brasil, buscando confirmar a mesma equação ou uma nova que se ajuste melhor aos dados.

A segunda categoria de modelo identificada é a baseada em Análise de Fluxo de Materiais (AFM) e variação de estoque. Araújo et al. (2012) propuseram dois modelos preditivos nessa linha: o primeiro, baseado no estoque nacional de produtos, considera o volume de produtos em posse da população e a vida útil média dos itens. Esse método foi aplicado a mercados, como o de televisores e refrigeradores, no Brasil. Já para outros mercados, como o de computadores e celulares, foi utilizado o método de passo temporal, que calcula a geração de REEE pela diferença entre as vendas anuais e a variação no estoque. Llerena-Riascos et al. (2021) também aplicaram a AFM, combinando-o com simulação de dinâmica de sistemas e otimização não-linear para prever e otimizar o fluxo de logística reversa de REEE. Kalmykova

et al. (2015) usaram abordagem semelhante para prever a geração de televisores descartados na Suécia.

A terceira categoria de modelo utiliza séries temporais e distribuições probabilísticas. Abbondanza e Souza (2019) usaram dados de vendas anteriores combinados com uma distribuição de probabilidade de descarte, aplicando a distribuição Weibull para calcular a probabilidade de descarte de um item após um determinado período de compra. Métodos semelhantes, com pequenas variações, foram empregados por Huang et al. (2020), Fraige et al. (2012) e Zeng et al. (2016) para a previsão de REEE na China e Jordânia. Nesses modelos, em estudos recentes, tem sido incorporados princípios de machine learning, como em Sun et al. (2024). Além disso, Faria et al. (2021) mostraram que, ao adaptar o modelo *Market Supply* aos registros de um sistema patrimonial, é possível estimar com boa precisão a geração anual de REEE em um órgão federal brasileiro, revelando ainda a tendência de redução da vida útil dos equipamentos.

Alguns estudos também adotaram abordagens híbridas que combinam os tipos de modelos mencionados. Jayasiri, Herat e Kaparaju (2024) integraram AFM com distribuição de probabilidade de descarte e dados de mercado para estimar a geração de REEE na Austrália, projetando um aumento de 90% na geração de pequenos REEE nos próximos 25 anos e destacando a importância de aumentar a vida útil dos produtos. Wang, Yu e Wu (2021) aplicaram uma abordagem híbrida que combina séries temporais e modelos Grey para prever a geração de REEE na China.

Observou-se que os artigos que utilizam modelos de séries temporais são os mais frequentes na literatura, com 9 estudos, refletindo uma preferência pela análise de dados históricos de vendas e descarte para estimar a geração futura de REEE. Em seguida, aparecem os modelos híbridos e os de AFM, com frequências similares, de 6 publicações. O uso de regressão linear é menos explorado, sendo encontrado em apenas 1 estudo na amostra analisada. Isso porque requer a verificação de pressupostos estatísticos e dados bem distribuídos, o que pode ser desafiador em estudos de geração de REEE.

Assim, alguns *gaps* persistem. A análise revelou a escassez de estudos aplicando regressão linear e destacando variáveis socioeconômicas, como PIB e IDH para o contexto de países em desenvolvimento. Além disso, enquanto os modelos híbridos e baseados em AFM apresentam potencial promissor, tecnologias como a inteligência artificial (IA) podem ser utilizadas para aprimorar o processo de previsão da geração de REEE.

Essa revisão também apontou lacunas na literatura atual, especialmente no que se refere à aplicação de modelos que integrem características regionais e sistemas informais de gestão.

Tais lacunas destacam a necessidade de estudos que não apenas avancem metodologicamente, mas que também se adaptem às realidades socioeconômicas e culturais da América Latina. O presente estudo busca, portanto, contribuir para preencher essas lacunas, propondo uma abordagem regionalizada que incorpore variáveis socioeconômicas específicas para uma previsão mais precisa e contextualizada da geração de REEE. A tabela 1 apresenta os artigos pertencentes a cada categoria.

Tabela 1 – Categorização dos artigos revisados

<b>Categoria</b>	<b>Artigos</b>
Regressão Linear	(Kusch; Hills, 2017)
Análise de Fluxo de Materiais	(Fraige et al., 2012; Kalmykova et al., 2015; Made Wahyu Widyarsana; Supramono; Fadel, 2021; Sakthivel; Swaminathan; Anis, 2022; Valente et al., 2021; Wang et al., 2018)
Séries Temporais	(Abbondanza; Souza, 2019; Araújo et al., 2012; Faria et al., 2021; Huang et al., 2020; Kim et al., 2013; Kosai; Kishita; Yamasue, 2020; Lu et al., 2015; Oliveira Neto et al., 2024; Zeng et al., 2016)
Híbridos	(Fraige; Al-Khatib; Al-Shaweesh, 2023; Jayasiri; Herat; Kaparaju, 2024; Llerena-Riascos et al., 2021; Sun et al., 2024; Tian et al., 2023; Wang; Yu; Wu, 2021)

Fonte: Autores (2025)

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

O objetivo deste estudo é desenvolver uma equação para prever a quantidade de REEE gerada no Brasil. Para isso, foram coletados dados relacionados aos países da América Latina, sendo eles: Argentina, Bolívia, Brasil, Chile, Colômbia, Costa Rica, El Salvador, Equador, Guatemala, Haiti, Honduras, México Nicarágua, Panamá, Paraguai, Peru, República Dominicana e Uruguai. Cuba e Venezuela não foram considerados pela ausência de dados. Os dados coletados a partir de Baldé et al. (2024) e do Banco Mundial foram: Geração de REEE

per capita nesses países no ano de 2022, PIB per capita de cada um desses países no ano de 2022, PIB per capita PPP de cada um desses países no ano de 2022, Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) de cada um desses países no ano de 2022, Taxa de Urbanização para cada um desses países 2022.

O estudo de Baldé et al. (2024) estima a geração de REEE utilizando uma metodologia baseada nas vendas anuais de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (EEE). O cálculo projeta a quantidade futura de resíduos aplicando curvas de fim de vida útil (ou distribuições de tempo de vida) aos dados históricos de vendas. Essencialmente, o modelo prevê quando os equipamentos vendidos em anos anteriores provavelmente atingirão o fim de sua vida útil e se tornarão REEE.

Esses dados foram selecionados a partir de sua possível relação quantidade de REEE a ser gerada no país. O PIB per capita e o PIB per capita PPP representam respectivamente a soma de todos os bens e serviços produzidos em uma determinada região ao longo de um ano dividido pelo número de habitantes e essa mesma operação, porém com um ajuste de acordo com o poder de compra da população. Por outro lado, o IDH representa o desenvolvimento de uma determinada região com base principalmente em saúde, educação e renda, trazendo uma visão do desenvolvimento (United Nations Development Programme - UNDP, 2024). Por fim, a taxa de urbanização representa a porcentagem da população e uma determinada região que reside em zonas urbanas. A taxa de urbanização está associada à infraestrutura de coleta de resíduos e ao consumo de dispositivos eletrônicos, que são mais elevados em áreas urbanas devido à maior acessibilidade tecnológica e ao estilo de vida.

A tabela 2 mostra os dados coletados para cada país, sendo que o PIB per capita e o PIB per capita PPC estão em milhares de dólares, a quantidade de REEE per capita gerado está em kg e o IDH e a taxa de urbanização estão em uma escala de 0 a 1.

Tabela 2 - Dados da Regressão Linear e Fontes

	<b>kUS\$</b>	<b>kUS\$</b>	<b>kg</b>	
<b>País</b>	<b>PIB per capita (Banco Mundial)</b>	<b>PIB per capita PPC (Banco Mundial)</b>	<b>REEE per capita (Baldé et al. (2024))</b>	<b>IDH (UNEP)</b>
Argentina	\$ 13.65	\$ 29.04	11.18204609	0.849
Bolívia	\$ 3.60	\$ 10.24	7.280693646	0.698
Brasil	\$ 9.07	\$ 19.40	11.34624639	0.76
Chile	\$ 15.41	\$ 31.59	11.73245932	0.86
Colômbia	\$ 6.66	\$ 21.06	7.479658798	0.758
Costa Rica	\$ 13.37	\$ 26.18	12.73927397	0.806
El Salvador	\$ 5.05	\$ 11.74	6.470559271	0.674
Equador	\$ 6.48	\$ 15.12	5.999666685	0.765
Guatemala	\$ 5.47	\$ 13.30	5.300184596	0.629
Haiti	\$ 1.75	\$ 3.24	1.035822542	0.552
Honduras	\$ 3.01	\$ 6.82	3.45063578	0.624
México	\$ 11.48	\$ 4.07	11.75648239	0.781
Nicarágua	\$ 2.25	\$ 7.53	3.02228199	0.669
Panamá	\$ 17.36	\$ 36.17	12.24883925	0.82
Paraguai	\$ 6.19	\$ 16.28	8.4061572	0.731
Peru	\$ 7.24	\$ 16.36	6.490533747	0.762
República Dominicana	\$ 10.11	\$ 24.36	8.816597931	0.766
Uruguai	\$ 20.50	\$ 32.75	12.85499507	0.83

Fonte: Autores (2025)

A tabela 3 apresenta os testes estatísticos realizados, com sua descrição e a respectiva referência.

Tabela 3 – Testes estatísticos realizados

Teste / Métrica	Descrição	Referência
Correlação de Pearson	Mede o grau de associação linear entre as variáveis estudadas; auxilia na seleção de variáveis para regressão.	Barbetta (2002)
Teste de Shapiro–Wilk (Dados)	Verifica se os dados originais de cada variável provêm de uma distribuição normal (premissa para correlação paramétrica).	Shapiro e Wilk (1965)
Coefficiente de Determinação ( $R^2$ )	Mede a proporção da variação da variável dependente explicada pelo modelo de regressão.	Montgomery, Peck e Vining (2012)
$R^2$ Ajustado	Ajusta o $R^2$ para o número de variáveis preditoras, penalizando a inclusão de variáveis desnecessárias.	Montgomery, Peck e Vining (2012)
Erro Médio Absoluto (MAE)	Quantifica a média das diferenças absolutas entre os valores previstos pelo modelo e os observados.	Willmott e Matsuura (2005)
Média dos Resíduos	Analisa se há viés estatístico no modelo; o valor esperado deve ser próximo de zero.	Montgomery, Peck e Vining (2012)
Teste de Shapiro–Wilk (Resíduos)	Verifica se os resíduos do modelo de regressão seguem uma distribuição normal (premissa da regressão linear).	Shapiro e Wilk (1965)
Teste de Breusch–Pagan	Detecta a presença de heterocedasticidade (variância não constante) nos resíduos.	Breusch e Pagan (1979)
Teste F (ANOVA da Regressão)	Avalia a significância estatística global do modelo de regressão.	Montgomery, Peck e Vining (2012)
Teste t (para coeficientes)	Verifica a significância estatística individual dos coeficientes das variáveis independentes.	Montgomery, Peck e Vining (2012)
Critério de Informação de Akaike (AIC)	Auxilia na seleção do modelo mais parcimonioso, equilibrando qualidade de ajuste e complexidade.	Akaike (1974)
Critério de Informação Bayesiano (BIC)	Similar ao AIC, mas com penalidade maior para complexidade, auxiliando na seleção do modelo mais parcimonioso.	Schwarz (1978) (correção ortográfica)
Teste de Durbin–Watson	Verifica a presença de autocorrelação (dependência serial) nos resíduos do modelo.	Durbin e Watson (1950)
Fator de Inflação da Variância (VIF)	Quantifica o grau de multicolinearidade (correlação entre variáveis independentes).	O'Brien (2007)

Fonte: Autores (2025)

Com os dados obtidos, em um primeiro momento foi feito o cálculo da correlação de Pearson entre cada uma das variáveis estudadas, permitindo a formação de uma matriz de correlação, para medir a associação entre cada variável. A correlação de Pearson traz o grau de associação linear entre duas variáveis, a partir da seguinte equação (Barbetta, 2002):

$$\text{Correlação } (X, Y) = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 \sum_i (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (I)$$

Sendo:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{x} \text{ a média de amostra da variável } x \\ \bar{y} \text{ a média de amostra da variável } y \\ x_i \text{ o item } i \text{ da amostra da variável } x \\ y_i \text{ o item } i \text{ da amostra da variável } y \end{array} \right.$$

O resultado do índice de correlação de Pearson varia entre -1 e 1, sendo que quanto mais próximo de -1, maior é a indicação de uma correlação inversa, ou seja, um incremento na variável x está associado a um decremento na variável y; por outro lado, se o índice de correlação for próximo de 1, a associação entre as variáveis é direta, ou seja, um incremento em corresponder a um incremento em y. Por fim, se o resultado for 0, não há correlação. A partir do resultado da correlação, foi possível analisar quais variáveis tem maior correlação com a geração de REEE. Uma das premissas para o cálculo do coeficiente de correlação é a normalidade dos dados analisados. Para garantir esse quesito, foi realizado o teste de Shapiro-Wilk (Shapiro; Wilk, 1965) em cada uma das variáveis. Esse teste tem como hipótese nula que os dados de uma amostra são provenientes de uma população com distribuição normal. Para isso, é feito o cálculo do parâmetro W, que pode ir de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo de 1, mais próximos os dados estão de uma distribuição normal. O cálculo de W é feito da seguinte forma:

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (I)$$

Sendo:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{x} \text{ a média de amostra da variável } x \\ a_i \text{ coeficientes calculados a partir dos quantis da distribuição normal teórica.} \\ x_i \text{ o item } i \text{ da amostra da variável } x \\ n \text{ o tamanho da amostra} \end{array} \right.$$

O teste calcula a estatística W, que é então convertida em um p-valor. Este p-valor é comparado ao nível de significância, definido neste caso em 5% (ou 0.05). A regra de decisão é: se o p-valor for menor que 0.05, a hipótese nula é rejeitada.

Com o teste de normalidade realizado e feito o cálculo das correlações, foram selecionadas as variáveis para testes de regressão linear.

A regressão linear implica em modelar a relação entre variáveis, sendo uma variável dependente e uma ou mais variáveis independentes ou explicativas (Bussab; Morettin, 2017). No caso de uma regressão linear simples, o modelo pode de ser descrito como:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon, \quad (III)$$

Sendo:

$$\left\{ \begin{array}{l} Y \text{ a variável dependente} \\ X \text{ a variável independente} \\ \beta_0 \text{ o coeficiente linear} \\ \beta_1 \text{ o coeficiente angular} \\ \varepsilon \text{ o erro aleatório ou resíduo} \end{array} \right.$$

Assim, a regressão linear é utilizada para prever novos valores de Y com base em X, sendo que os coeficientes são estimados a partir do método de minimização dos quadrados (Montgomery; Peck; Vining, 2012). O objetivo é minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre os valores observados e os valores preditos pela linha de regressão. Uma regressão é considerada linear se ela for linear nos parâmetros, ou seja, se os parâmetros  $\beta$  estão dispostos de maneira linear.

Para cálculo do coeficiente angular, a seguinte equação é utilizada:

$$\beta_1 = \frac{n\sum(x_i y_i) - \sum x_i \sum y_i}{n\sum(x_i^2) - (\sum x_i)^2}, \quad (IV)$$

Sendo:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{x} \text{ a média de amostra da variável } x \\ \bar{y} \text{ a média de amostra da variável } y \\ x_i \text{ o item } i \text{ da amostra da variável } x \\ y_i \text{ o item } i \text{ da amostra da variável } y \\ n: \text{ o número total de observações} \end{array} \right.$$

Para o cálculo do coeficiente linear, é utilizada a seguinte equação:

$$\beta_0 = \beta_1 \bar{x} + \bar{y}, \quad (V)$$

Neste estudo, além da regressão linear simples, foram ajustados modelos de regressão linear com transformações polinomiais e logarítmicas, bem como uma regressão múltipla. Após o ajuste de cada modelo, foram realizados diversos testes estatísticos com o objetivo de avaliar a adequação dos modelos obtidos e selecionar o mais apropriado.

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foi utilizado para medir a proporção da variação total da variável dependente explicada pelo modelo, sendo que valores mais altos indicam uma maior capacidade explicativa do modelo (Montgomery; Peck; Vining, 2012). O  $R^2$  é calculado pela equação  $R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}$  (VI), onde SSE é a soma dos quadrados dos erros e SST é a soma total dos quadrados. Em complemento, o  $R^2$  ajustado foi calculado para considerar o número

de preditores no modelo, penalizando a inclusão de variáveis desnecessárias (Montgomery; Peck; Vining, 2012).

O erro médio absoluto (MAE) foi empregado como uma métrica para quantificar a média das diferenças absolutas entre os valores previstos e os valores observados (Willmott; Matsuura, 2005). O MAE é calculado como  $MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$  (VII), onde  $y_i$  são os valores observados e  $\hat{y}_i$  são os valores previstos. Além disso, a média dos resíduos foi analisada, calculada como Média dos Resíduos =  $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)$  (VIII), sendo esperado que fosse próxima de zero, o que indicaria a ausência de viés estatístico no modelo.

Para verificar a normalidade dos resíduos, foi realizado o teste de Shapiro-Wilk (Shapiro; Wilk, 1965) onde p-valores maiores que 0.05 indicariam que os resíduos seguem uma distribuição normal, uma suposição importante em regressões lineares. A estatística do teste é dada por  $SW = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i y_{(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$  (IX), onde  $a_i$  são coeficientes calculados a partir dos valores esperados sob normalidade, enquanto  $y_i$  representa os dados da amostra ordenados do menor para o maior, e o denominador representa a soma dos desvios quadráticos dos dados originais  $y_i$  em relação à média amostral ( $\bar{y}$ ).

O teste de Breusch-Pagan (Breusch; Pagan, 1979) foi utilizado para detectar a presença de heterocedasticidade, analisando a variância dos resíduos em relação às variáveis independentes. A estatística do teste é calculada como  $BP = \frac{n \cdot R^2_{\text{resíduos}}}{2}$  (X), onde  $n$  é o número de observações e  $R^2$  é o coeficiente de determinação da regressão dos resíduos ao quadrado em relação às variáveis explicativas. P-valores abaixo de 0.05 indicariam a presença de heterocedasticidade.

O teste F foi aplicado para avaliar a significância global dos modelos, verificando se pelo menos uma das variáveis independentes estava significativamente relacionada à variável dependente. A estatística F é calculada como  $F = \frac{MSR}{MSE}$  (XI), onde MSR é a média dos quadrados do modelo e MSE é a média dos quadrados dos erros (Montgomery; Peck; Vining, 2012). Individualmente, a significância dos coeficientes das variáveis independentes foi verificada por meio do teste T, cuja estatística é calculada como  $t = \frac{\hat{\beta}}{SE(\hat{\beta})}$  (XII), onde  $\hat{\beta}$  é o coeficiente estimado e  $SE(\hat{\beta})$  é o erro padrão associado (Montgomery; Peck; Vining, 2012).

Para a seleção do modelo mais parcimonioso, foram calculados os critérios de informação de Akaike (AIC) e Bayesiano (BIC). O AIC é calculado como  $AIC = 2k - 2 \ln(L)$  (XIII), onde  $k$  é o número de parâmetros e  $L$  é a verossimilhança do modelo. O BIC,

similar ao AIC, aplica uma penalização mais rigorosa e é calculado como  $BIC = \ln(n)k - 2 \ln(L)$  (XIV). Valores menores de AIC e BIC indicam modelos mais adequados (Akaike, 1974; Schwarz, 1978).

A presença de autocorrelação nos resíduos foi verificada por meio do teste de Durbin-Watson, cuja estatística é dada por  $DW = \frac{\sum_{t=2}^n (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^n e_t^2}$  (XV), onde  $e_t$  são os resíduos do modelo no tempo  $t$ . O valor obtido no teste é comparado com um limitante inferior tabelado, chamado  $d_L$ . Valores de Durbin-Watson maiores que  $d_L$  indicam a ausência de autocorrelação nos resíduos (Durbin; Watson, 1950).

Por fim, o fator de inflação da variância (VIF) foi calculado para quantificar o grau de multicolinearidade entre as variáveis independentes, com VIFs acima de 10 sugerindo alta multicolinearidade. O VIF é calculado como  $VIF = \frac{1}{1-R_j^2}$  (XVI), onde  $R_j^2$  é o  $R^2$  da regressão de uma variável independente contra todas as outras (O'Brien, 2007).

Todos esses testes e parâmetros foram essenciais para garantir a robustez e a validade dos modelos de regressão ajustados, permitindo a escolha do modelo que melhor se ajusta aos dados e que oferece a interpretação mais precisa das relações entre as variáveis estudadas. Com os dados e regressões realizadas por meio de métodos estatísticos implementados na linguagem Python, foram obtidas equações que estimam a geração de REEE com base nas variáveis independentes testadas

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos dados obtidos, foram feitos testes com as variáveis independentes PIB per capita, PIB per capita ajustado por PPC e IDH. Após a realização de todas as regressões, observou-se que o PIB per capita e o IDH foram as variáveis que proporcionaram melhor ajuste ao modelo, com um  $R^2$  de 0,85 e erro médio em torno de 1,16, além de resultados positivos em todos os outros testes estatísticos

Especificamente, foram testados modelos lineares simples (com e sem intercepto), logarítmicos, polinomiais e lineares compostos. A tabela 4 apresenta os modelos elaborados e os resultados de  $R^2$ , MAE e AIC para cada um deles.

Tabela 4 – Modelos testados e parâmetros analisados

Variável Independente	Modelo	Equação	R <sup>2</sup>	MAE	AIC	VIF
IDH	Linear com Intercepto	$REEE = 38,2 \times IDH + 20,1$	0,792	1,363	72,211	-
IDH	Polinomial (2º Grau)	$REEE = 4,8 \times IDH^2 + 31,3 \times IDH - 17,7$	0,792	1,368	74,202	-
IDH	Logarítmico	$REEE = 26,95 \times \ln(IDH) + 16,46$	0,787	1,368	72,636	-
PIB per capita PPP	Linear com Intercepto	$REEE = 0,27 \times PIB\_PPP + 3,35$	0,562	1,676	85,618	-
PIB per capita PPP	Polinomial (2º Grau)	$REEE = 0,0017 \times PIB\_PPP^2 + 0,150 \times PIB\_PPP + 3,83$	0,564	1,689	87,538	-
PIB per capita PPP	Logarítmico	$REEE = 3,52 \times \ln(PIB\_PPP) - 1,29$	0,467	1,948	89,138	-
PIB per capita	Linear com Intercepto	$REEE = 0,6 \times PIB\_capta + 2,95$	0,797	1,323	71,713	-
PIB per capita	Polinomial (2º Grau)	$REEE = -0,038 \times PIB\_capta^2 + 1,38 \times PIB\_capta + 0,00543$	0,887	0,971	63,110	-
PIB per capita	Logarítmico	$REEE = 4,85 \times \ln(PIB\_capta) - 1,3$	0,887	0,945	61,220	-
PIB per capita e IDH	Múltipla	$REEE = -9,62 + 20,161 \times IDH + 0,33 \times PIB\_capta$	0,857	1,165	67,463	3,71
PIB per capita PPP (Literatura)	Kush e Hills (2017)	$REEE = 0,489 \times PIB\_PPP$	0,562	1,676	85,618	-

Fonte: Autores (2025)

Dos modelos testados, o modelo logarítmico com PIB per capita revelou-se o mais adequado para prever a geração de REEE per capita na América Latina. Embora o polinomial de segundo grau apresentasse R<sup>2</sup> ligeiramente superior (0,8878), o modelo logarítmico obteve erro médio absoluto menor (MAE = 0,9451) e AIC mais baixo (61,22), indicando melhor equilíbrio entre ajuste e complexidade. Em termos de IDH, o modelo linear com intercepto teve um desempenho muito semelhante ao polinomial de 2º grau, porém sendo ligeiramente melhor por ter um AIC mais baixo.

A equação gerada para o modelo linear com IDH é:

$$REEE = 38.20503 \times IDH - 20.10071 \text{ (XVII)}$$

Por outro lado, a equação gerada para o modelo polinomial com o PIB per capita é:

$$REEE = 4,8483 \times \ln(PIB_{capita}) + 2,95380 \text{ (XVIII)}$$

Embora o  $R^2$  do modelo com IDH, 0,792, contra 0,888 do modelo com PIB per capita, seja ligeiramente menor, o uso dessa variável é interessante, pois incorpora aspectos de desenvolvimento além do fator econômico. Especificamente, as dimensões de saúde e educação do IDH podem capturar nuances sobre o acesso à informação, adoção de tecnologia e padrões de consumo que podem influenciar a taxa de substituição de equipamentos e, conseqüentemente, a geração de REEE. Ambos os modelos são eficazes em estimar a geração per capita de REEE nas regiões estudadas. No entanto, o PIB per capita oferece um ajuste ligeiramente superior, enquanto o IDH captura outros aspectos do desenvolvimento.

Para explorar os benefícios de ambos os modelos, testou-se uma regressão linear composta com as duas variáveis. Uma consideração importante para esse modelo é a possibilidade de multicolinearidade, que poderia prejudicar a precisão dos resultados preditivos. Assim, além dos testes realizados nos outros modelos, aplicou-se o teste VIF para analisar a multicolinearidade. Com os dados e análises realizadas, verificou-se que o modelo proposto apresentou um bom ajuste, com  $R^2$  de 0,85, MAE de 1,16 e ausência de multicolinearidade (VIF = 3,71). A análise indicou que o PIB per capita e o IDH são variáveis significativamente associadas à geração de REEE, conforme ilustrado nas Figuras 2 e 3.

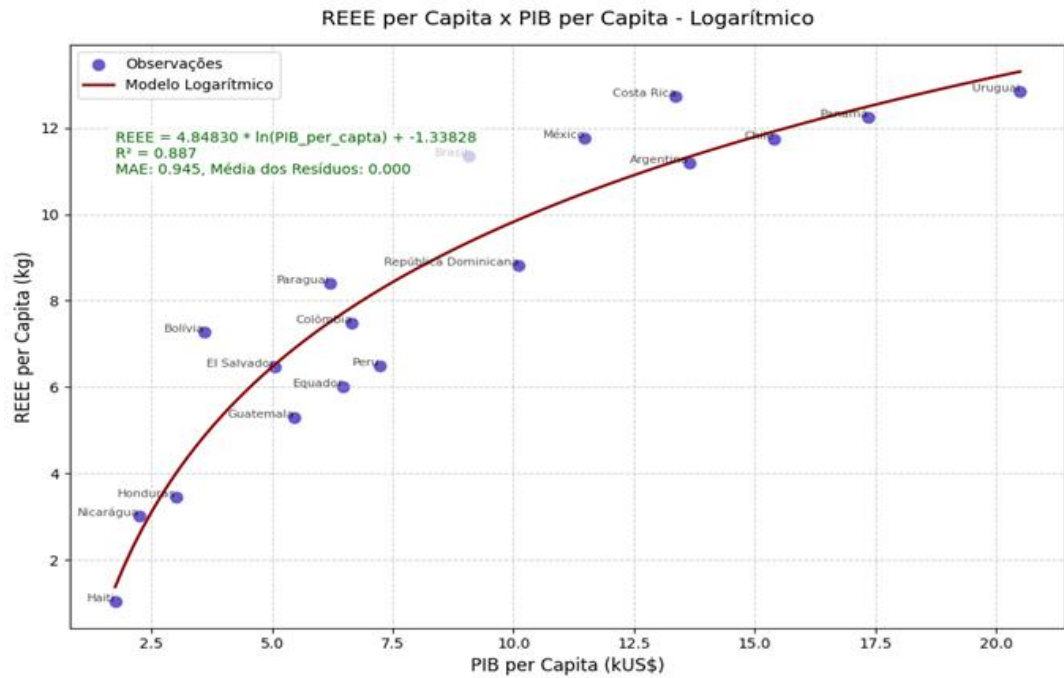
Além disso, ambas as variáveis independentes apresentaram valores menores que 5% no teste t, indicando sua significância para o modelo. Todos os demais testes também apresentaram resultados satisfatórios, incluindo o AIC, que ficou em 67, menor que o de outros modelos simples, ou seja, a maior complexidade devido ao uso de duas variáveis traz de fato um ganho em termos de acurácia. A equação para esse modelo para previsão da geração de REEE é:

$$Y = 20,161IDH + 0,328PIB_{PC} - 9,622 \text{ (XIX)}$$

Sendo Y a quantidade de REEE per capita gerada ao longo de um ano, IDH o índice de desenvolvimento humano do local estudado e  $PIB_{PC}$  o PIB per capita da região considerada. Porém, dado que esse modelo possui um  $R^2$  inferior a alguns outros e devido ao fato de o PIB per capita ser parte do cálculo do IDH, esse modelo não foi considerado como o modelo final.

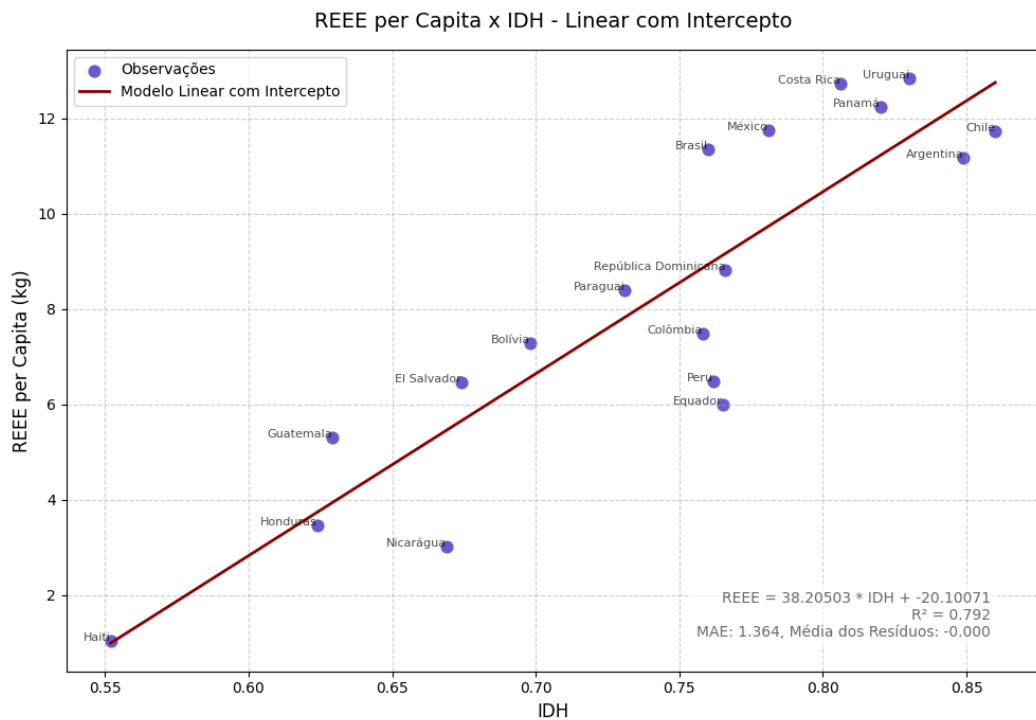
Ademais, todos os modelos avaliados apresentaram resíduos seguindo uma distribuição normal, homocedasticidade e ausência de autocorrelação nos resíduos. Os coeficientes em cada modelo foram estatisticamente significativos, reforçando a robustez das equações propostas.

Figura 2 - Resultado para o modelo com o PIB per capita como variável independente



Fonte: Autor (2025)

Figura 3 - Resultado para o modelo com o IDH como variável independente



Fonte: Autor (2025)

Com base nos resultados estatísticos e no contexto analisado, o modelo logarítmico com PIB per capita, foi selecionado como a melhor alternativa para estimar a geração de REEE na América Latina. Este modelo apresentou  $R^2$  de 0,887, MAE de 0,945 AIC de 72,2, destacando-se por seu equilíbrio entre ajuste estatístico, parcimônia e interpretabilidade. O modelo demonstrou robustez em todos os testes estatísticos realizados, apresentando resíduos normais, homocedasticidade, ausência de autocorrelação e coeficientes significativos.

Ao comparar este modelo com os de Abbondanza e Souza (2019), observa-se um caráter mais simplificado de utilização. No trabalho de Abbondanza e Souza (2019), o modelo empregado inclui elementos como distribuições probabilísticas e métodos de séries temporais, exigindo uma maior quantidade de dados, incluindo histórico de vendas de eletrônicos e distribuições de probabilidade de fim de vida desses produtos. De maneira similar, o estudo de Jayasiri, Herat e Kaparaju (2024) destaca o uso da modelagem por AFM como uma abordagem para prever a geração de REEE, utilizando dados de entradas, saídas e estoques de resíduos eletrônicos na região analisada. No entanto, essa abordagem requer uma quantidade substancial de dados para alcançar resultados precisos.

Dessa forma, fica evidente que o uso da regressão proporciona uma equação mais simples e com boa aderência aos dados, permitindo previsões eficazes de geração de REEE. Essa abordagem também é observada no trabalho de Kusch e Hills (2017), que utilizaram uma regressão linear simples sem intercepto para prever a geração de resíduos, considerado o PIB PPP com a variável independente e obtendo um  $R^2$  de 0,93. Porém, para o cenário latino-americano, o modelo logarítmico com PIB per capita apresenta maior aderência.

No estudo de Kusch e Hills (2017), o PIB PPP foi um preditor mais eficaz da geração de REEE na Europa, devido à homogeneidade socioeconômica e à padronização nos padrões de consumo de eletrônicos entre os países europeus. No entanto, no contexto da América Latina, o PIB nominal demonstrou maior relevância, refletindo diretamente as disparidades estruturais e econômicas significativas entre os países da região. Essa heterogeneidade, marcada por diferenças nos níveis de desenvolvimento, infraestrutura e práticas de descarte, faz com que o PIB nominal capture melhor as variações na geração de REEE. Por outro lado, o PIB PPP, que ajusta os valores para o poder de compra, pode nivelar artificialmente essas diferenças, tornando-se menos representativo no contexto latino-americano.

## 5. CONCLUSÕES

O presente estudo desenvolveu e testou um modelo de regressão logarítmico para prever a geração de REEE em países da América Latina, utilizando o PIB per capita como variável independente. Este modelo, além de simplificado, mostrou-se eficaz, com elevado  $R^2$ , baixos erros preditivos e robustez estatística em testes de aderência, como normalidade dos resíduos, homocedasticidade e ausência de autocorrelação.

Os resultados destacam a relevância do PIB per capita como preditor da geração de REEE. Esses achados contrastam com estudos realizados na Europa, onde o PIB per capita PPP demonstrou melhor ajuste devido à homogeneidade socioeconômica entre os países do continente.

Apesar da eficácia do modelo, algumas limitações devem ser consideradas. Primeiramente, a ausência de variáveis relacionadas ao consumo direto de eletrônicos e às práticas de descarte informal pode limitar sua aplicabilidade em países com grandes disparidades internas ou mercado informal predominante. Adicionalmente, o modelo pode superestimar ou subestimar a geração de REEE em contextos extremos, como países de baixa geração de resíduos ou com infraestrutura limitada para gerenciamento de resíduos. Esses fatores sugerem que, embora o modelo seja robusto, ajustes locais ou a inclusão de variáveis contextuais podem melhorar sua precisão em cenários específicos.

Com base nessas limitações, estudos futuros podem explorar o impacto de variáveis adicionais, como evolução tecnológica, políticas públicas de reciclagem e padrões culturais de consumo e descarte dos REEE. Além disso, a integração de dados de economia circular, como taxas de reutilização e condicionamento, poderia aprimorar o modelo para capturar uma visão mais completa do ciclo de vida dos equipamentos eletrônicos. Outras abordagens metodológicas, como modelos baseados em machine learning, também podem ser investigadas para identificar interações mais complexas entre variáveis.

Este trabalho contribui ao propor uma ferramenta de previsão simplificada, aplicável em contextos de dados, como a América Latina. Com um modelo que não exige dados complexos ou históricos extensos, ele se posiciona como uma alternativa prática para gestores e formuladores de políticas públicas, permitindo antecipar demandas de reciclagem e planejar estratégias de gestão de resíduos eletrônicos.

Por fim, os resultados reforçam a utilidade prática do modelo proposto. Sua aplicação pode contribuir significativamente para melhorar o planejamento e a eficiência na gestão de REEE na América Latina, fornecendo subsídios para o desenvolvimento de políticas públicas e iniciativas de reciclagem mais eficazes e sustentáveis. No entanto, futuras adaptações do

modelo, incorporando variáveis mais específicas e explorando novos contextos geográficos, têm o potencial de ampliar ainda mais sua aplicabilidade e impacto.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro (Processo nº 88887.967130/2024-00) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), (Processo nº 408190/2021-3).

## CONFLITOS DE INTERESSE

Os autores declaram não haver conflito de interesse.

## REFERENCIAS

ABBONDANZA, M. N. M.; SOUZA, R. G. Estimating the generation of household e-waste in municipalities using primary data from surveys: A case study of Sao Jose dos Campos, Brazil. **Waste Management**, v. 85, p. 374–384, 15 fev. 2019.

AKAIKE, H. A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, v. 19, n. 6, p. 716-723, 1974.

ARAÚJO, Marcelo Guimarães *et al.* A model for estimation of potential generation of waste electrical and electronic equipment in Brazil. **Waste Management**, v. 32, n. 2, p. 335–342, fev. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RECICLAGEM DE ELETROELETRÔNICOS E ELETRODOMÉSTICOS – ABREE. **Relatório anual de desempenho do Sistema de Logística Reversa (SLR) de eletroeletrônicos e seus componentes de uso doméstico: ano-base 2021**. São Paulo: ABREE, 2022.

BALDÉ, Cornelis P. *et al.* **Global E-waste Monitor 2024**. Genebra/Bonn: International Telecommunication Union (ITU) e United Nations Institute for Training and Research (UNITAR), 2 nov. 2024. Disponível em: <<https://www.itu.int/itu-d/sites/environment>>.

BARBETTA, Pedro. **Estatística aplicada às ciências sociais**. Florianópolis: UFSC Editora, 2002.

BRASIL. Lei nº 12.305/2010 – Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). . 2 ago. 2010.

BRASIL. Decreto nº 10.240/2020 – Logística Reversa de Produtos Eletroeletrônicos. . 12 fev. 2020.

BRASIL; MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA. **Nota Técnica nº 244/2024-MMA: relatório anual de atividades, ano 2022, do sistema de logística reversa de eletroeletrônicos de uso doméstico e seus componentes**. Brasília: MMA, 2024.

BREUSCH, T.; PAGAN, A. A simple test for heteroscedasticity and random coefficient variation. **Econometrica**, v. 47, n. 5, p. 1287–1294, set. 1979.

BUSSAB, Wilton; MORETTIN, Pedro. **Estatística Básica**. São Paulo: Saraiva, 2017.

DURBIN, J.; WATSON, G. S. TESTING FOR SERIAL CORRELATION IN LEAST SQUARES REGRESSION. I. **Biometrika**, v. 37, n. 3–4, p. 409–428, 1 dez. 1950.

FARIA, Rodrigo da Silva *et al.* Estimating the generation of waste electrical and electronic equipment in organizations: The case of a Brazilian federal agency. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 5, 1 dez. 2021.

FRAIGE, Feras Y. *et al.* Waste electric and electronic equipment in Jordan: willingness and generation rates. **Journal of Environmental Planning and Management**, v. 55, n. 2, p. 161–175, mar. 2012.

FRAIGE, Feras Y.; AL-KHATIB, Laila A.; AL-SHAWEESH, Mou'ath A. Predicting WEEE Generation Rates in Jordan Using Population Balance Model. **Sustainability (Switzerland)**, v. 15, n. 3, 1 fev. 2023.

HELENA XAVIER, Lúcia; CRISTINE GIESE, Ellen; FREITAS LINS, Fernando A. **URBAN MINING AND E-WASTE MANAGEMENT IN SOUTH AMERICA**. [S.l.: S.n.].

HUANG, Huiting *et al.* Gap between discarding and recycling: Estimate lifespan of electronic products by survey in formal recycling plants in China. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 156, 1 maio 2020.

JAYASIRI, Gimhan; HERAT, Sunil; KAPARAJU, Prasad. Repair and Reuse or Recycle: What Is Best for Small WEEE in Australia? **Sustainability (Switzerland)**, v. 16, n. 7, 1 abr. 2024.

KALMYKOVA, Yuliya *et al.* Out with the old, out with the new - The effect of transitions in TVs and monitors technology on consumption and WEEE generation in Sweden 1996-2014. **Waste Management**, v. 46, p. 511–522, 1 dez. 2015.

KIM, S. *et al.* Estimating the amount of WEEE generated in South Korea by using the population balance model. **Waste Management**, v. 33, n. 2, p. 474–483, 2013.

KOSAI, Shoki; KISHITA, Yusuke; YAMASUE, Eiji. Estimation of the metal flow of WEEE in Vietnam considering lifespan transition. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 154, 1 mar. 2020.

KUSCH, Sigrid; HILLS, Colin D. The link between e-waste and GDP-New insights from data from the pan-European region. **Resources**, v. 6, n. 2, 1 jun. 2017.

LLERENA-RIASCOS, Camilo *et al.* An optimization-based system dynamics simulation for sustainable policy design in weee management systems. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 20, 1 out. 2021.

LU, B. *et al.* The environmental impact of technology innovation on WEEE management by Multi-Life Cycle Assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 89, p. 148–158, 2015.

MADE WAHYU WIDYARSANA, I.; SUPRAMONO, D. S.; FADEL, N. Electronic Waste Generation Prediction in Bandung City, Indonesia. **Environmental and Climate Technologies**, v. 25, n. 1, p. 111–120, 2021.

MONTGOMERY, Douglas; PECK, Elizabeth; VINING, Geoffrey. **INTRODUCTION TO LINEAR REGRESSION ANALYSIS**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2012.

MULYA, Kyle Sebastian *et al.* A systematic review of life cycle assessment of solid waste management: Methodological trends and prospects. **Science of the Total Environment**, v. 831, 20 jul. 2022.

NAN, Tianxiang *et al.* Process simulation and life cycle assessment of hydrometallurgical recycling routes of waste printed circuit boards. **Journal of Cleaner Production**, v. 435, 5 jan. 2024.

O'BRIEN, Robert M. A caution regarding rules of thumb for variance inflation factors. **Quality and Quantity**, v. 41, n. 5, p. 673–690, out. 2007.

OLIVEIRA NETO, José Francisco *et al.* Potential of metal recovery from printed circuit boards in Brazil. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, n. 39, p. 51702–51718, 2024.

PAGE, Matthew J. *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **Systematic Reviews**, v. 10, n. 1, 1 dez. 2021.

POKHREL, Prakash; LIN, Sheng Lung; TSAI, Chi Ting. Environmental and economic performance analysis of recycling waste printed circuit boards using life cycle assessment. **Journal of Environmental Management**, v. 276, 15 dez. 2020.

RAO, Mudila Dhanunjaya *et al.* Life cycle analysis on sequential recovery of copper and gold from waste printed circuit boards. **Waste Management**, v. 171, p. 621–627, 1 nov. 2023.

ROCHA, Tiago Barreto; PENTEADO, Carmenlucia Santos Giordano. Life cycle assessment of a small WEEE reverse logistics system: Case study in the Campinas Area, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 314, 10 set. 2021.

SAKTHIVEL, U.; SWAMINATHAN, G.; ANIS, J. J. J. Strategies for Quantifying Metal Recovery from Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE/E-waste) Using Mathematical Approach. **Process Integration and Optimization for Sustainability**, v. 6, n. 3, p. 781–790, 2022.

SHAPIRO, S. S.; WILK, ; M B. **An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples)** *Biometrika*. [S.l.: S.n.].

SCHWARZ, G. Estimating the dimension of a model. *The Annals of Statistics*, v. 6, n. 2, p. 461-464, 1978.

SUN, Luxuan *et al.* Environmental benefit of recycling plastics from waste electrical & electronic equipment. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 211, p. 107855, 2024.

TIAN, Ruiyu *et al.* Socio-economic correlation analysis and hybrid artificial neural network model development for provincial waste electrical and electronic equipment generation forecasting in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 418, 15 set. 2023.

TRANFIELD, David; DENYER, David; SMART, Palminder. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. **British Journal of Management**, v. 14, n. 3, p. 207–222, 2003.

TSYDENOVA, Oyuna; BENGTSSON, Magnus. Chemical hazards associated with treatment of waste electrical and electronic equipment. **Waste Management**, v. 31, n. 1, p. 45–58, jan. 2011.

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME - UNDP. **Desenvolvimento Humano e IDH**. Disponível em: <<https://www.undp.org/pt/brazil/idh>>. Acesso em: 20 ago. 2024.

VALENTE, D. B. *et al.* Economic analysis of waste electrical and electronic equipment management: a study involving recycling cooperatives in Brazil. **Environment, Development and Sustainability**, v. 23, n. 12, p. 17628–17649, 2021.

WANG, Fang; YU, Lean; WU, Aiping. Forecasting the electronic waste quantity with a decomposition-ensemble approach. **Waste Management**, v. 120, p. 828–838, 1 fev. 2021.

WANG, Minxi *et al.* Watch more, waste more? A stock-driven dynamic material flow analysis of metals and plastics in TV sets in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 187, p. 730–739, jun. 2018.

WILLMOTT, Cort; MATSUURA, Kenji. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. **Climate Research**, v. 30, p. 79–82, 19 dez. 2005.

ZENG, Xianlai *et al.* Uncovering the Recycling Potential of “new” WEEE in China. **Environmental Science and Technology**, v. 50, n. 3, p. 1347–1358, 2 fev. 2016.

## **CAPÍTULO IV: ARTIGO #3: AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA E ANÁLISE DE DECISÃO MULTICRITÉRIO DE ROTAS DE RECICLAGEM DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO NO BRASIL**

**Resumo:** A geração de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE) é um tema de preocupação mundial. Entre os tipos de REEE, destacam-se os resíduos de placas de circuito impresso (RPCI). Estes contêm metais preciosos, que podem ser recuperados e inseridos em um novo ciclo produtivo. Porém, é necessário que as operações de logística reversa e reciclagem sejam bem planejadas, para que não gerem um impacto ambiental. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar 9 estratégias de fim de vida para resíduos de placas de circuito impresso (RPCI) no Brasil por meio de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). As categorias de impacto foram ponderadas e aplicou-se o método de decisão multicritério (MCDM) TOPSIS para ranquear os cenários. Uma análise de sensibilidade foi executada, variando método de alocação, distâncias percorridas, MDMC e os pesos dados a cada categoria. O cenário que considera a reciclagem local dos metais, a partir de método hidrometalúrgico, e o coprocessamento dos resíduos remanescentes para geração de energia obteve a melhor pontuação. Esses resultados sugerem que a implantação de uma cadeia completa de reciclagem de RPCI no Brasil é ambientalmente eficiente e operacionalmente viável.

**Palavras-chaves:** Avaliação de Ciclo de Vida; Gestão de Resíduos; Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos; Placas de Circuito Impresso; Logística Reversa, Reciclagem.

## **CHAPTER IV: ARTICLE #3 LIFE CYCLE ASSESSMENT AND MULTI-CRITERIA DECISION ANALYSIS OF RECYCLING ROUTES FOR PRINTED CIRCUIT BOARDS IN BRAZIL**

**Abstract:** The generation of waste electrical and electronic equipment (WEEE) is a global concern, and waste printed-circuit boards (WPCB) are among the most critical streams. WPCBs contain valuable precious metals that can be recovered and re-inserted into new production cycles, provided that reverse-logistics and recycling operations are properly planned to avoid additional environmental burdens. In this context, the present study assessed 9 end-of-life strategies for WPCBs in Brazil through Life Cycle Assessment (LCA). Impact categories were weighted, and a multi-criteria decision-making (MCDM) approach—TOPSIS—was applied to rank the scenarios. A sensitivity analysis was performed by varying the allocation method, transport distances, the MCDM technique, and the weights assigned to each impact category. The scenario that achieved the highest score combines local hydrometallurgical metal recovery with co-processing of the remaining residues for energy generation. These results indicate that establishing a complete domestic recycling chain for WPCBs in Brazil is both environmentally advantageous and operationally feasible.

**Keywords:** Life Cycle Assessment; Waste Management; Waste Electrical and Electronic Equipment; Printed Circuit Boards; Reverse Logistics; Recycling.

## 1. INTRODUÇÃO

A geração de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) vem aumentando ano após ano, impulsionada por fatores como o aumento populacional, avanços tecnológicos e padrões de consumo intensivo (Liu et al., 2023). Em 2022, o mundo gerou cerca de 62 milhões de toneladas de REEE (Baldé et al., 2024). Este crescimento traz preocupações, relacionadas tanto à presença de substâncias tóxicas, como metais pesados que contaminam solos e águas, quanto à perda de materiais valiosos e raros que poderiam ser inseridos em um novo ciclo produtivo (Islam; Iyer-Raniga, 2023; Pokhrel; Lin; Tsai, 2020). O Brasil figura como o segundo maior gerador de REEE das Américas com 2,4 milhões de toneladas geradas em 2022. Em termos mundiais, China, com 12 milhões de toneladas e Estados Unidos, com 7,2 milhões de toneladas são os maiores geradores. Entretanto, apenas 22,3% desse volume foi devidamente registrado, coletado e reciclado. Isso representa uma perda de materiais valiosos e um risco de disseminação de poluentes, reforçando a urgência de iniciativas que orientem o planejamento para a coleta transporte, tratamento e descarte de REEE.

O Brasil possui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que exige que fabricantes estabeleçam redes de logística reversa para a coleta e destinação de eletrônicos no fim de vida (Brasil, 2010). No entanto, ao contrário de países como os da União Europeia, que adotaram legislações específicas para REEE já em 2002 (União Europeia, 2003a, 2003b), o Japão, que implementou regulamentações em 1998 e 2000 (Japão, 1998, 2000), e a Colômbia, com legislações específicas desde 2017 (Colômbia, 2017), o Brasil ainda carece de uma abordagem mais direcionada exclusivamente para resíduos eletroeletrônicos. O decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020 representa um avanço, estabelecendo metas como a coleta de 17% dos eletrônicos gerados em 2018 até 2025, além de obrigar a apresentação de relatórios periódicos (Brasil, 2020). Apesar dessas medidas, o país enfrenta desafios na gestão e reciclagem de REEE, incluindo a necessidade de ampliar a infraestrutura e a conscientização pública para melhorar a destinação adequada desses resíduos.

Além disso, a implementação da Estratégia Nacional de Economia Circular (ENEC) (2024) representa um marco na transição do modelo linear para uma economia circular (EC). Recuperar materiais para reintroduzi-los no ciclo produtivo é uma das estratégias fundamentais da EC, que busca proporcionar um sistema mais sustentável ao adotar os princípios de eliminação de poluição e resíduos, circulação de produtos e materiais, e regeneração da natureza. Assim, a ENEC estabelece diretrizes que reforçam esses princípios, além de incentivar a criação de mercados para produtos reciclados e a instalação de recicladoras em todo o país. Ao promover uma abordagem integrada, a ENEC busca alinhar políticas públicas,

compromissos internacionais e iniciativas privadas, criando um ambiente normativo e financeiro favorável para práticas circulares, como a reciclagem (Brasil, 2024a).

Ademais, a Lei de Incentivo à Reciclagem (LIR) (Brasil, 2024b) estabelece incentivos fiscais e benefícios para projetos que estimulem a cadeia produtiva de reciclagem, incluindo a constituição de Fundos de Investimentos para Projetos de Reciclagem (ProRecycle). Em 2024, foi lançada uma portaria que estabelece as regras para apresentação, análise, aprovação, monitoramento, prestação de contas e avaliação de resultados de projetos relacionados a LIR.

Entre os componentes dos REEE, os resíduos de placas de circuito impresso (RPCI) destacam-se por sua complexidade e valor econômico. Os RPCI contêm metais como cobre, prata, ouro e paládio, que podem ser recuperados por meio de processos de reciclagem (Rocha; Penteado, 2021). No entanto, muitos países em desenvolvimento, como o Brasil, não dispõem de infraestrutura adequada para realizar essa reciclagem localmente, exportando os resíduos para tratamento no exterior (He et al., 2024). Esse transporte de longa distância não apenas implica emissões significativas de gases de efeito estufa, mas também resulta na perda do valor econômico que poderia ser retido no país. A reciclagem local pode reduzir a dependência de recursos naturais primários, apoiar o desenvolvimento regional e integrar trabalhadoras e trabalhadores informais à cadeia produtiva formal, em conformidade com os objetivos da ENEC (Xavier; Ottoni; Abreu, 2023).

A implementação da logística reversa e a reciclagem de RPCI envolvem uma série de etapas integradas que vão desde a coleta dos resíduos até a recuperação de metais valiosos. O processo começa com a coleta, que pode ser realizada por programas de retorno promovidos por fabricantes, cooperativas de catadores ou empresas especializadas. Em seguida, ocorre o transporte dos RPCI coletados para instalações de processamento, etapa que deve ser planejada para minimizar custos e emissões de gases de efeito estufa. Nas instalações, os RPCI passam pelo desmonte e separação. Após essa etapa, os resíduos restantes são submetidos à moagem, que reduz os materiais a partículas menores, facilitando a separação posterior. Todos esses processos integram o pré-processamento (Kumar Singh; Chauhan; Sarkar, 2023). Finalmente, o material segue para os processos de recuperação, que podem incluir métodos pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos ou biometalúrgicos (Awasthi et al., 2017).

Os processos pirometalúrgicos envolvem o uso de altas temperaturas para fundir os componentes dos RPCI, permitindo a separação e recuperação de metais preciosos como ouro e prata (Kaya, 2019). Já os processos hidrometalúrgicos consistem na lixiviação dos metais presentes nos RPCI por meio de soluções químicas (ácidas ou básicas), seguida de técnicas como sedimentação ou métodos eletroquímicos para a recuperação dos metais (Nan et al.,

2024). Por outro lado, os processos biohidrometalúrgicos utilizam microorganismos, como bactérias, para promover a lixiviação dos metais. Apesar de serem promissores por sua abordagem, ainda carecem de maior desenvolvimento tecnológico para serem aplicados em larga escala (Villares et al., 2016), como visto detalhadamente no capítulo II. Cada um desses processos possui vantagens e limitações específicas, que devem ser avaliadas conforme os objetivos e o contexto da reciclagem.

No entanto, no Brasil, o processo geralmente é interrompido após o desmonte e separação (triagem) das placas, que são enviadas para empresas especializadas no exterior para a etapa de recuperação dos metais. Essa dependência da exportação reflete desafios locais, como a falta de infraestrutura adequada, tecnologias avançadas e incentivos econômicos para o processamento completo no país. Isso resulta na perda de valor econômico e na dependência de mercados internacionais, além de contribuir para emissões associadas ao transporte internacional a longas distâncias, pois geralmente são destinadas para outros países (Oliveira Neto et al., 2024; Ottoni et al., 2023).

Nesse sentido, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta que permite quantificar os impactos ambientais de um determinado produto ou processo desde a extração de matéria-prima até o descarte (De Oliveira et al., 2021). No contexto da economia circular, a ACV permite identificar os *hotspots* ambientais, ou seja, etapas do ciclo de vida que possuem maior impacto, possibilitando a implementação de melhorias direcionadas (Withanage; Habib, 2021). Além disso, para um planejamento minucioso, uma das principais necessidades é a previsão precisa da geração de REEE, que não apenas permite que os gestores públicos e privados planejem a infraestrutura necessária, mas também facilita a criação de políticas públicas que incentivem uma economia circular (Abbondanza; Souza, 2019).

Dado esse contexto, este artigo tem como objetivo avaliar, por meio da ACV, os impactos ambientais associados à gestão de RPCI no Brasil, comparando o modelo atual, baseado na exportação para reciclagem no exterior, com análise de proposições de cenários alternativos de reciclagem local. O estudo busca identificar as estratégias mais sustentáveis e eficazes para alinhar a gestão de PCIs aos princípios da economia circular, contribuindo para a redução de impactos ambientais, valorização de materiais no mercado interno e fortalecimento da infraestrutura de reciclagem no país. As próximas seções estão divididas da seguinte forma: a seção 2 contém a revisão da literatura, a seção 3, os materiais e métodos utilizados, a seção 4, os resultados e discussões, e a seção 5, as conclusões.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

A ACV e a reciclagem de RPCI têm sido exploradas na literatura por meio de diferentes abordagens. Estudos focados nos métodos de recuperação de materiais, como os processos pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos, biometalúrgicos e outros, têm fornecido contribuições importantes. Rubin et al. (2014), por exemplo, compararam duas rotas para a extração de cobre de RPCI, concluindo que a rota hidrometalúrgica com uso de *aqua regia* apresenta menor impacto ambiental. No entanto, Xue et al. (2015) identificaram que o uso de *aqua regia* é o principal *hotspot* ambiental desse processo, juntamente com o transporte dos resíduos, com variações dependendo do modelo logístico adotado. De forma similar, Nan et al. (2024) compararam rotas hidrometalúrgicas utilizando soluções ácidas e básicas, constatando que a solução ácida é mais eficiente, embora mais impactante ambientalmente.

Rao et al. (2023) investigaram um processo de recuperação de cobre e ouro de RPCI, apontando a etapa de delaminação como o principal hotspot. Rezaee et al. (2023), por sua vez, avaliaram a eficácia da glicina como agente de lixiviação para ouro, revelando que ela é menos impactante que substâncias tradicionais, como o cianeto. Já Villares et al. (2016) exploraram a biolixiviação em escala laboratorial e industrial, indicando que esse método possui potencial ambientalmente favorável, mas carece de avanços tecnológicos para aplicação em larga escala. Outro estudo, realizado por Liu et al. (2024), testou o uso de solventes eutéticos, mostrando que essa abordagem pode reduzir emissões de gases de efeito estufa no processo de reciclagem de RPCI.

No campo dos impactos e benefícios da reciclagem, Rocha e Penteado (2021) destacaram que o ouro é o principal responsável pelos benefícios ambientais da reciclagem de RPCI, uma vez que seu impacto é significativamente menor em comparação à extração de ouro virgem. Islam e Iyer-Raniga (2023) analisaram cenários de gestão de RPCI na Austrália, incluindo o modelo atual de exportação para reciclagem no exterior e alternativas com processamento interno, como recuperação de metais, incineração com recuperação de energia e disposição em aterros e concluíram que a recuperação dos metais preciosos e coprocessamento dos demais componentes é o cenário menos impactante para a Austrália. De forma similar, Ismail e Hannafiah (2021) avaliaram alternativas para o tratamento de RPCI na Malásia e concluíram que a incineração com recuperação de energia é a opção mais viável para o país. Pokhrel, Lin e Tsai (2020) realizaram uma análise ambiental e econômica da reciclagem de metais de RPCI, concluindo que o ouro é o único material com benefícios ambientais significativos e retorno econômico relevante.

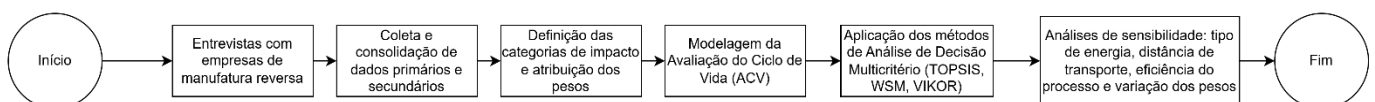
Por outro lado, os métodos de decisão multicritério (MDMC) tem sido aplicado à decisões no contexto de LR de REEE de diferentes maneiras. Queiruga et al. (2008) utilizaram o método PROMETHEE para avaliar potenciais localizações para plantas de reciclagem de REEE com base em uma abordagem multicritério. De forma semelhante, Rousis et al. (2008) aplicaram MDMC para determinar a localização de plantas de reciclagem no Chipre. No Brasil, Ottoni et al. (2023) examinaram possíveis locais para uma planta de reciclagem de PCIs, considerando critérios econômicos, logísticos, ambientais e operacionais. Entre as cidades destacadas, figuram São Caetano do Sul, Jundiaí, Campinas, São Bernardo do Campo, Barueri, Sorocaba, Santo André e Americana, todas no estado de São Paulo. Bonnin et al. (2015) utilizaram MDMC para determinar o melhor processo de recuperação de cobre a partir de PCIs. Em outro contexto, Aidonis et al. (2019) aplicaram MDMC para definir estratégias de gestão de REEE na Grécia, enquanto Vaccari et al. (2020) utilizaram a mesma abordagem para identificar melhorias na gestão de REEE em Gana. Por fim, Grimes e Maguire (2020) empregaram MDMC para priorizar quais materiais deveriam ser recuperados com maior urgência dos REEE, demonstrando o potencial dessa metodologia para orientar decisões estratégicas em diferentes etapas da gestão de resíduos.

Embora existam trabalhos sobre ACV de RPCI e uso isolado de MDMC, poucos têm integrado essas três vertentes num único estudo, focado no Brasil, como faz o presente estudo. Assim, este estudo avalia 9 cenários de gestão de RPCI no Brasil por meio de ACV. Em seguida, classifica esses cenários utilizando MCDM e apresenta análises de sensibilidade tanto no inventário de ACV quanto nos resultados do MDMC.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A figura 1 apresenta um fluxograma da metodologia deste estudo.

Figura 1 – Fluxograma com os passos da metodologia



Fonte: Autor (2025)

#### 3.1. Entrevistas com empresas de manufatura reversa de eletrônicos

Para a obtenção dos dados necessários, foram realizadas entrevistas com gestores de diversas empresas de manufatura reversa de REEE, abrangendo diferentes regiões do Brasil. O objetivo das entrevistas foi compreender a realidade atual da gestão de resíduos de PCI no país.

As empresas participantes foram identificadas como Empresa A, Empresa B, Empresa C, Empresa D, Empresa E e Empresa F, cada uma com características específicas em suas operações. As entrevistas foram realizadas virtualmente a partir da plataforma Google Meet. A autorização para realização desse procedimento foi concedida no Parecer nº 7.493.486 (CAAE: 81516824.3.0000.5504) pelo Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade Federal de São Carlos.

A Empresa A e a Empresa B são especializadas na reciclagem de plásticos provenientes de REEE. Ambas separam outros materiais, incluindo as PCI, que são enviadas para empresas especializadas em seu processamento em países como Bélgica, Estados Unidos, Coréia do Sul e outros. A Empresa C, por sua vez, atua em um espectro mais amplo, trabalhando com diversos componentes de REEE tanto no Brasil quanto em suas filiais internacionais. Já a Empresa D concentra suas atividades na consolidação e desmontagem de REEE, direcionando os componentes para empresas especializadas.

A Empresa E, por outro lado, adota uma abordagem focada no condicionamento de REEE, visando seu reaproveitamento. Apenas uma pequena parcela dos resíduos é destinada à reciclagem, realizada no Brasil ou em filiais da empresa no exterior. Por fim, a Empresa F desempenha um papel estratégico na gestão de REEE no Brasil, conectando diferentes empresas do setor para garantir que cada componente seja direcionado ao destino adequado.

Durante as entrevistas, foram coletadas informações sobre o fluxo de RPCI no Brasil, incluindo a quantidade de REEE coletada por essas empresas e a proporção correspondente de RPCI. Além disso, foram investigados os processos pelos quais os REEE passam em cada empresa, bem como o interesse e iniciativas relacionadas ao desenvolvimento de tecnologias para a reciclagem de RPCI no Brasil. Essas informações foram fundamentais para as etapas subsequentes do estudo.

### 3.2. Avaliação do Ciclo de Vida

A ACV pode ser dividida em 4 etapas principais, sendo: Definição de Objetivo e Escopo, Inventário do Ciclo de Vida (ICV), Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) e Interpretação (International Organization for Standardization, 2006a, 2006b). Cada uma dessas fases traz aspectos essenciais para uma condução bem-sucedida da ACV, sendo fases interativas, ou seja, mesmo que a primeira etapa tenha sido realizada, ao finalizar a segunda, é possível que sejam necessários alguns ajustes na primeira. Isso pode ocorrer em todas as etapas, tornando a ACV uma técnica de abordagem iterativa (De Oliveira et al., 2021). A ACV foi

realizada com base em dados primários coletados de uma empresa recicladora de REEE e na literatura.

### *3.2.1. Definição de Objetivo e Escopo*

No presente estudo, o objetivo é avaliar os impactos ambientais associados à gestão de RPCI no Brasil. O cenário base, realidade atual do país, considera que há a coleta, transporte e desmonte de REEE, seguido pela estocagem dos RPCI. A partir daí, elas são exportadas para reciclagem. Antes da recuperação de material secundário, pode haver, no caso dos processos hidrometalúrgicos, um processo de separação mecânica para separação prévia dos metais antes da recuperação. Para o estabelecimento de cenários alternativos, foi analisada a simulação da existência de uma planta de reciclagem de RPCI localizada na cidade de São Caetano do Sul, conforme Ottoni et al. (2023), além de propor alternativas a gestão da logística reversa. Os cenários são descritos na tabela 1.

Tabela 1 – Descrição dos cenários analisados

Cenário	Título	Descrição
C1	Tratamento no Exterior	Consiste no envio das PCI para tratamento no exterior, onde são recicladas utilizando tecnologias avançadas de recuperação de materiais. Os demais materiais são aterrados, também no exterior, conforme Islam e Iyer-Raniga (2023).
C2	Tratamento no Brasil - 100% Aterro	Consiste no descarte total das placas de circuito impresso (PCI) em aterros no Brasil, sem qualquer tipo de recuperação de materiais.
C3	Tratamento no Brasil - 100% Coprocessamento	Envolve o coprocessamento total das PCI no Brasil, sem recuperação de materiais, mas com recuperação de energia.
C4	Tratamento no Brasil – Hidrometalurgia de Nan et al. (2024) - Básico e Aterro	Utiliza a técnica de hidrometalurgia proposta por Nan et al. (2024) com base em soluções básicas, seguida do descarte dos resíduos em aterros.
C5	Tratamento no Brasil – Hidrometalurgia de Nan et al. (2024) - Básico e Coprocessamento	Emprega a hidrometalurgia básica proposta por Nan et al. (2024), com os resíduos finais sendo tratados por coprocessamento com recuperação de energia.
C6	Tratamento no Brasil – Hidrometalurgia de Nan et al. (2024) - Ácido e Aterro	Adota a hidrometalurgia com soluções ácidas proposta por Nan et al. (2024), seguida do descarte dos resíduos em aterros.
C7	Tratamento no Brasil – Hidrometalurgia de Nan et al. (2024) - Ácido e Coprocessamento	Aplica a hidrometalurgia com soluções ácidas de Nan et al. (2024), com os resíduos finais sendo coprocessados para recuperação de energia.
C8	Tratamento no Brasil – Pirometalurgia e Aterro	Aplica a pirometalurgia no Brasil, com descarte dos resíduos finais em aterros.
C9	Tratamento no Brasil – Pirometalurgia e Coprocessamento	Aplica a pirometalurgia no Brasil, com descarte com os resíduos finais sendo tratados por incineração.

Fonte: Autor (2025)

Os impactos ambientais foram calculados utilizando o método ReCiPe 2016 Midpoint H, no software OpenLCA e alocação mássica para atribuir os impactos aos RPCI. O estudo abrange desde o transporte de REEE a partir dos pontos de coleta da empresa analisada, feito por um caminhão com capacidade entre 16 e 32 toneladas, até a obtenção dos materiais reciclados. Esses pontos são espalhados por todas as regiões do Brasil Considerando que a função do sistema é reciclar RPCI, a unidade funcional foi 1 tonelada de RPCI reciclado. Para avaliar os créditos e impactos ambientais da gestão de resíduos de RPCI, foi utilizada a expansão do sistema, considerando que a obtenção do material reciclado pode substituir o material virgem. Ao longo das etapas de desmonte e estoque, foi utilizada a alocação mássica para ter os impactos correspondentes aos RPCI.

### 3.2.2. *Inventário do Ciclo de Vida*

Nesta etapa, todos os dados necessários foram compilados para serem posteriormente modelados. Foram utilizados dados primários, de uma empresa de manufatura reversa e reciclagem de plásticos de REEE localizada no Brasil, e secundários, provenientes tanto da literatura quanto da base de dados Ecoinvent versão 3.10.

Os dados relacionados ao transporte e ao consumo de energia nos processos de recebimento, desmonte, separação e estoque de RPCI, foram obtidos junto a uma empresa recicladora de REEE localizada no interior do estado de São Paulo. A empresa estudada realiza a logística reversa de REEE a partir dos processos de coleta e transporte, recebimento e triagem, além de desmonte, e estocagem, com posterior envio dos RPCI para reciclagem no exterior.

Esses dados incluem informações sobre os trajetos realizados, combustível utilizado, tipo de caminhão, a energia usada em cada etapa do processo e os fluxos de materiais correspondentes. Para o processo de separação mecânica antes da reciclagem, foram utilizados dados de Pokhrel et al. (2020). Para os processos de extração de metais de RPCI, os dados foram retirados de estudos da literatura, especificamente Nan et al. (2024) e da base Ecoinvent versão 3.10.

Os dados referentes ao coprocessamento e aterro foram obtidos da base de dados Ecoinvent versão 3.10. Além disso, foi considerado que a incineração de 1 kg dos materiais restantes da PCI, em sua maioria plásticos, pode substituir aproximadamente 0,89 kg de coque de petróleo (Jungbluth; Meili; Wenzel, 2018; Tsiamis; Castaldi, 2016). A composição média dos REEE e das PCI foi retirada de Nan et al. (2024). O inventário está nos apêndices, assim como a conexão com a base Ecoinvent 3.10.

### 3.2.3. *Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida*

Diversos métodos de AICV são utilizados em estudos envolvendo ACV e REEE. Por exemplo, Rocha e Penteadó (2021) empregaram o método EF, enquanto Ismail e Hannafiah (2021), assim como Islam e Iyer-Raniga (2023), utilizaram o método ReCiPe 2016 Endpoint H. Rubin et al. (2014) aplicaram o método EDIP, enquanto Nan et al. (2024), Xue et al. (2015) e Iannicelli-Zubianni (2017) optaram pelo método CML.

Neste estudo, as categorias de impacto e os métodos de AICV foram selecionados com base nas recomendações do guia PEF (European Union Joint Research Centre (EU-JRC), 2018). As seguintes categorias de impacto foram avaliadas: mudanças climáticas, destruição do ozônio estratosférico, radiação ionizante, formação de ozônio fotoquímico, formação de material

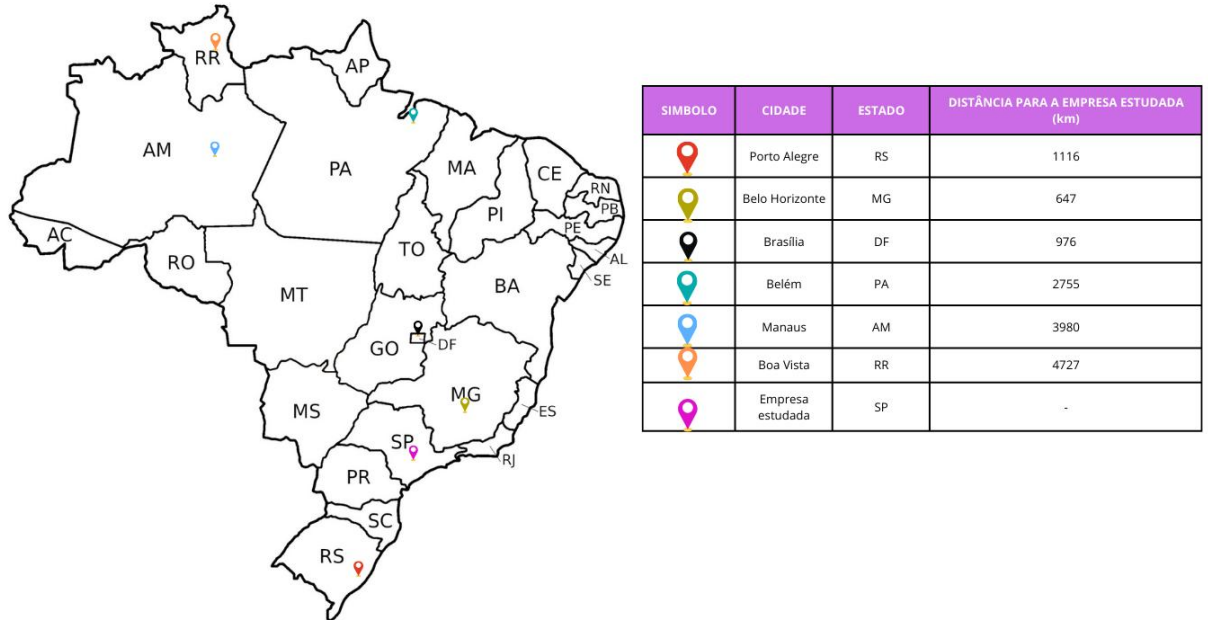
particulado, efeitos à saúde humana não relacionados ao câncer, efeitos à saúde humana relacionados ao câncer, acidificação terrestre, eutrofização (água doce e marinha), ecotoxicidade em água doce, marinha e terrestre, uso da terra, uso da água, uso de recursos (fósseis) e uso de recursos (minerais e metais). O método ReCiPe 2016 Midpoint H foi utilizado no software openLCA versão 2.3.1. Este método foi escolhido por sua capacidade de fornecer fatores de caracterização na escala global, ao mesmo tempo em que permite a implementação de fatores regionalizados (em nível de país ou continente) para categorias de impacto (Huijbregts et al., 2017). Os impactos da produção de material virgem foram obtidos a partir da base de dados Ecoinvent versão 3.10.

#### *3.2.4. Interpretação*

Para a interpretação dos resultados, foram elaborados gráficos baseados nos dados obtidos, permitindo uma análise detalhada dos principais benefícios e impactos associados à gestão de RPCI.

Além disso, foi realizada uma análise de sensibilidade, variando a distância percorrida na etapa de transporte para a planta de reciclagem. Para isso, considerou-se que a planta seria localizada em outras cidades ao invés de São Caetano do Sul, sendo elas: Porto Alegre (RS), Belo Horizonte (MG), Brasília (DF), Belém (PA), Manaus (AM) e Boa Vista (RR), conforme a figura 2, que apresenta a localização dessas cidades no Brasil e respectiva distância até a empresa estudada. Ademais, variou-se o tipo de energia utilizado, considerando o uso exclusivo de outras fontes de energia, diferentes da matriz local, sendo: energia solar, eólica e nuclear. a eficiência do processo de recuperação de material secundário. Todas essas alterações foram feitas no cenário considerado como o de melhor desempenho ambiental.

Figura 2 - Cidades selecionadas para a análise de sensibilidade



Fonte: Autor (2025)

### 3.2.5. Composição das PCI

Para as análises quanto à recuperação dos materiais presentes nos RPCI, foi considerada a composição conforme a tabela 2.

Tabela 2 - Porcentagem dos materiais presentes nas PCI

<b>Materiais</b>	<b>Porcentagem</b>
Cobre	14,6%
Estanho	5,62%
Ferro	4,79%
Chumbo	2,96%
Níquel	1,65%
Alumínio	0,25%
Zinco	0,25%
Prata	0,05%
Ouro	0,02%
Paládio	0,02%
Outros	0,39%
Resina	28%
Fibra de vidro	41,42%

Fonte: Nan et al. (2024)

### 3.3. Análise de Decisão Multicritério

#### 3.3.1. Critérios, método TOPSIS e pesos

Para definir o melhor cenário, foi aplicado um MDMC, utilizando exclusivamente as categorias de impacto como critérios de avaliação. Os pesos atribuídos a cada categoria foram determinados a partir da relevância de cada categoria de impacto ao contexto estudado.

Após a definição dos pesos, foi utilizado o método *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) (Oflaz et al., 2023) para classificação dos cenários. O TOPSIS consiste em etapas sequenciais que incluem a normalização da matriz de decisão, na qual cada valor é dividido pelo módulo da soma dos quadrados da respectiva coluna, garantindo que todos os critérios fiquem em uma escala uniforme; a construção da matriz ponderada, que resulta da multiplicação da matriz normalizada pelos pesos das categorias de impacto; a identificação das soluções ideais, sendo estas a solução ideal positiva (o melhor valor para cada

critério) e a solução ideal negativa (o pior valor para cada critério); o cálculo das distâncias euclidianas, em que para cada cenário são determinadas as distâncias em relação às soluções ideais positiva e negativa; e, finalmente, a determinação do índice de proximidade relativa, calculado como a razão entre a distância do cenário à solução ideal negativa e a soma das distâncias às soluções positivas e negativas. Esse índice é utilizado para ranquear os cenários, sendo que o maior valor indica o melhor desempenho global. A tabela 3 apresenta os pesos finais considerados:

Tabela 3 - Pesos atribuídos à cada categoria de impacto do método ReCiPe 2016 Midpoint H

<b>Categoria</b>	<b>Peso (%)</b>	<b>Justificativa</b>
Escassez de recursos minerais	16%	Critério-chave e objetivo principal da mineração urbana. O propósito da reciclagem de PCI é recuperar metais valiosos (Au, Cu, Pd), reduzindo diretamente a demanda por mineração virgem.
Escassez de recursos fósseis	14%	Alto consumo de energia de origem fóssil (eletricidade, gás natural) e combustíveis (diesel) nos processos térmicos (pirometalurgia) e logística.
Mudanças climáticas	14%	Alto impacto global. Consequência direta do alto consumo de energia fóssil e transporte, gerando emissões de gases de efeito estufa (GEE).
Uso de água	10%	Consumo de água, especialmente nas rotas hidrometalúrgicas (lixiviação, lavagem de reagentes) e para resfriamento de processos.
Formação de Material particulado	8%	Impacto direto na saúde humana. Geração de material particulado fino (MP2.5) em processos-chave, como transporte.
Toxicidade humana (não câncer)	7%	Risco de exposição ocupacional e pública a material particulado e vapores de solventes/ácidos (hidrometalurgia), causando efeitos adversos à saúde.
Toxicidade humana (câncer)	6%	Risco de exposição ocupacional (trabalhadores) a metais pesados carcinogênicos (ex: cádmio, arsênico) via inalação de poeira ou fumos.
Acidificação terrestre	5%	Impacto regional (chuva ácida) vindo de emissões atmosféricas de SO <sub>x</sub> e NO <sub>x</sub> (processos térmicos e transporte).
Eutrofização em água doce	5%	Descarga de nutrientes (Nitrogênio, Fósforo) nos efluentes de lavagem e tratamento, causando desequilíbrio (algas) em corpos d'água.
Ecotoxicidade em água doce	4%	Liberação de metais pesados (ex: cobre, chumbo) nos efluentes líquidos dos processos hidrometalúrgicos, afetando diretamente mananciais.
Ecotoxicidade marinha	3%	Impacto de efluentes líquidos, considerado menos direto que em água doce, pois as plantas não são tipicamente costeiras, mas o impacto agregado existe.
Uso do solo	2%	Ocupação de área para a planta industrial. Considerado um impacto de baixa magnitude quando comparado à mineração primária (evitada) ou ao uso de aterros.
Radiação ionizante	1%	Impacto negligenciável. Ausência de fontes ou materiais radioativos significativos no manuseio e processamento de placas de circuito impresso.
Eutrofização marinha	1%	Impacto considerado pouco relevante, pois as plantas de reciclagem de PCI não são grandes geradoras de efluentes ricos em matéria orgânica.
Formação de ozônio, saúde humana	1%	Emissão de precursores (NO <sub>x</sub> , VOCs) da queima de combustíveis. Considerada uma contribuição de baixa magnitude no contexto geral.

<b>Categoria</b>	<b>Peso (%)</b>	<b>Justificativa</b>
Formação de ozônio, Ecossistemas Terrestres	1%	Mesmos precursores (NOx, VOCs). Considerada uma contribuição de baixa magnitude no contexto geral.
Depleção de ozônio estratosférico	1%	Impacto negligenciável. Processos de reciclagem de PCI não utilizam nem emitem substâncias destruidoras da camada de ozônio (SDOs, como CFCs ou Halons).
Ecotoxicidade terrestre	1%	Risco de contaminação do solo (derramamentos). Peso baixo por ser um impacto acidental/, e não uma emissão contínua.

Fonte: Autor (2025)

### 3.3.2. *Análise de Sensibilidade*

Complementarmente, para verificar a robustez do ranking obtido pelo TOPSIS frente a possíveis incertezas na atribuição dos pesos, foram conduzidas duas análises de sensibilidade. Na primeira, aplicou-se uma simulação de Monte Carlo em 10 000 iterações, em que cada peso foi aleatoriamente perturbado em  $\pm 95\%$  em relação ao seu valor original e, em seguida, renormalizado para que a soma continuasse igual a 1. A cada iteração, recalculou-se o índice de proximidade relativa e o ordenamento dos cenários, permitindo estimar a probabilidade de cada alternativa assumir a primeira posição, a frequência com que o ranking completo permaneceu idêntico ao baseline e a correlação média de Spearman (Spearman, 1904) em comparação ao ranking de referência. Já na segunda abordagem, geraram-se 10 000 vetores de pesos por meio de uma distribuição Dirichlet ( $\alpha = 1$ ), conforme (Gelman et al., 2025), de modo a explorar uniformemente todo o espaço de ponderações possíveis sem restrição de amplitude. Para cada vetor aleatório, recalculou-se novamente o índice e o ranking, o que possibilitou avaliar a consistência do resultado mesmo quando os pesos diferiam completamente das escolhas iniciais.

Além do TOPSIS, também foram testados outros dois métodos de MDMC para comparação dos resultados. No Weighted Sum Model (WSM) (Goodwin; Wright, 2002), cada valor de impacto é normalizado entre 0 e 1 (através de min-max por critério) e, em seguida, multiplicado pelo peso correspondente; a soma ponderada dessas notas gera um escore único para cada cenário, que é então ordenado de forma decrescente. Já o VIKOR (Opricovic; Tzeng, 2004) combina duas medidas de desempenho: a soma ponderada das distâncias normalizadas a uma solução ideal (S, utilidade agregada) e o máximo arrependimento individual (R), sintetizando-as em um índice Q que pondera ambas as componentes; os cenários são ranqueados pelo menor Q, e testes de vantagem aceitável e estabilidade asseguram a identificação de uma solução de compromisso. Essas análises de sensibilidade e a aplicação comparativa de WSM e VIKOR reforçam a confiabilidade do MDMC adotado, demonstrando

que o cenário mais bem classificado pelo TOPSIS mantém seu desempenho superior mesmo diante de variações na ponderação e sob diferentes lógicas de agregação de avaliações.

### 3.3.3. Método para previsão da Geração de REEE

Para calcular a geração de REEE, foi desenvolvida uma regressão linear múltipla utilizando os dados de PIB per capita, fornecidos pelo Banco Mundial, e da geração de REEE em 2022 (Baldé et al., 2024), para países da América Latina. O desenvolvimento está detalhado no capítulo III. O modelo apresentou um coeficiente de determinação ( $R^2=0,89$ ), indicando um bom desempenho preditivo. A equação obtida é a seguinte:

$$REEE = 4,8483 \times \ln(PIB_{capita}) + 2,95380,$$

onde:

- Y representa a quantidade de REEE per capita gerada ao longo de um ano (kg/habitante/ano),
- PIBPC é o Produto Interno Bruto per capita (kUS\$/hab).

O resultado desta equação foi utilizado como dado de entrada na ACV para estimar o potencial de recuperação de materiais secundários de RPCI no Brasil. A ACV avaliou os impactos e benefícios ambientais potenciais, considerando um cenário de coleta alinhado à meta de 17% definida pelo Acordo Setorial. A Tabela 4 apresenta os dados consolidados desta estimativa, detalhando: (i) a geração total de REEE; (ii) a geração correspondente de RPCI (assumida como 3% dos REEE); e (iii) a fração de PCI efetivamente coletada (17% da geração). Com base neste último valor, foi determinado o potencial de recuperação de materiais. Para maior clareza, a tabela está organizada em duas seções: "Contexto de Geração", que aborda os totais de REEE e RPCI, e "Composição", que detalha os materiais presentes.

Tabela 4 – Quantidade potencial de material secundário a ser recuperado em um ano

Item	Quantidade (t)
<b>Contexto de Geração</b>	
REEE Gerado	2.892.563,41
PCI Gerada	86.776,90
PCI Coletada (Total)	14.752,07
<b>Composição (metálicos)</b>	
Cobre	2.153,80
Estanho	829,07
Ferro	706,62
Chumbo	436,66
Níquel	243,41
Alumínio	36,88
Zinco	36,88
Prata	7,38
Ouro	2,95
Paládio	2,95
<b>Composição (não-metálicos)</b>	
Fibra de Vidro	6.110,31
<b>Composição (outros)</b>	
Resina	4.130,58
Outros	57,53

Fonte: Autor (2025)

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. ACV de Cenários de Gestão de RPCI no Brasil

#### 4.1.1. Entrevistas com empresas de manufatura reversa de eletrônicos

Durante as entrevistas com gestores das empresas de manufatura reversa selecionadas, o principal foco foi entender as operações da empresa, principalmente quanto aos RPCI. Em todas as empresas, os RPCI são vendidos para outras companhias no exterior, seja diretamente por elas ou por intermediários. O destino varia em cada caso, mas de forma geral, os RPCI chegam em países com Bélgica, Estados Unidos, Japão e Coréia do Sul. Porém, duas delas, empresas A e C declararam ter interesse em trazer a recuperação de materiais de RPCI para o Brasil. Entretanto, todas as empresas entrevistadas relataram desafios inerentes a essa temática no Brasil. A coleta de REEE dos pontos de entrega voluntário (PEV), onde indivíduos podem depositar seus REEE para destinação adequada tem um volume pequeno, devido a diversos fatores, principalmente culturais. Assim, muitas delas operam mais com eletrônicos de outras

empresas, que precisam trocar seus equipamentos periodicamente. Com isso, atingir a meta do acordo setorial, de, até 2025, coletar 17% dos eletrônicos vendidos no ano 2018 é desafiador, já que a meta contabiliza REEE coletados via PEV. Ademais os entrevistados alegaram falta de apoio por parte das esferas governamentais. Por conta disso, algumas empresas de manufatura reversa de eletrônicos se uniram e formaram a Associação Brasileira das empresas de Manufatura Reversa, em busca de, a partir da coletividade, reivindicar melhorias nas políticas relacionadas a essa temática no Brasil. Ademais, há uma das principais gestoras de logística reversa de eletroeletrônicos: a Green Electron, que reúne empresas do setor para formar uma rede com o objetivo de ajudar essas companhias a estabelecer os procedimentos definidos em lei quanto a gestão de resíduos.

Antes de enviar os RPCI para o exterior, as empresas precisam consolidar uma quantidade mínima que torne a logística economicamente viável. De acordo com o gestor da empresa E, são necessárias aproximadamente 15 toneladas de RPCI para encher um contêiner, com um custo de transporte de 5.000 dólares por contêiner. Esse transporte é realizado por via marítima. A empresa E consegue consolidar cerca de 30 toneladas de RPCI por ano, o que permite o envio de dois contêineres ao exterior. Em comparação, a empresa B gera aproximadamente 300 toneladas de RPCI por ano, enquanto a empresa D gera 33,86 toneladas, e a empresa A, 90 toneladas. Somando as quantidades de RPCI dessas empresas, obtém-se um total de 453,86 toneladas, suficiente para preencher cerca de 30 contêineres, gerando um custo total de frete de 151 mil dólares.

Por outro lado, a recuperação de metais preciosos a partir dessas operações pode alcançar aproximadamente 134 toneladas, representando uma receita potencialmente atrativa para as empresas envolvidas. No entanto, no modelo atual de gestão dos resíduos de RPCI, apesar de as empresas obterem receita com a venda desses resíduos, uma significativa oportunidade financeira é deixada de lado. Além disso, é fundamental considerar não apenas o potencial ganho financeiro, mas também avaliar os benefícios ambientais de reciclar esses RPCI no Brasil em vez de exportá-las. Essa análise é essencial para determinar se a reciclagem nacional poderia representar uma alternativa mais sustentável e eficiente.

Atualmente, o modelo de negócios predominante para os RPCI no Brasil baseia-se na venda dessas placas para empresas no exterior, responsáveis pela recuperação dos metais preciosos. Em alguns casos, a própria empresa de manufatura reversa estima a quantidade de metais presentes nos RPCI e realiza a venda com base nessa estimativa. Em outros casos, uma empresa intermediária, equipada com tecnologia especializada, recebe as placas, avalia a quantidade de materiais valiosos e paga à empresa de manufatura reversa de acordo com a

análise realizada. No entanto, por ser essa atividade a principal fonte de lucro para muitas dessas empresas.

#### *4.1.2. Avaliação do Ciclo de Vida*

A ACV foi conduzida com o objetivo de compreender os benefícios e impactos ambientais de cada cenário proposto para análise, considerando os créditos pela recuperação dos materiais presentes nos RPCI. A Tabela 5 apresenta os resultados da ACV para cada categoria de impacto analisada. Os resultados demonstram que, em muitos cenários, a reciclagem proporciona benefícios ambientais significativos. Isso ocorre porque, em diversas categorias de impacto, os valores obtidos são negativos, indicando que, devido à substituição de materiais virgens por materiais reciclados recuperados dos RPCI, o sistema evita impactos ambientais adicionais.

Tabela 5 - Resultados da ACV para todos os cenários por tonelada de RPCI

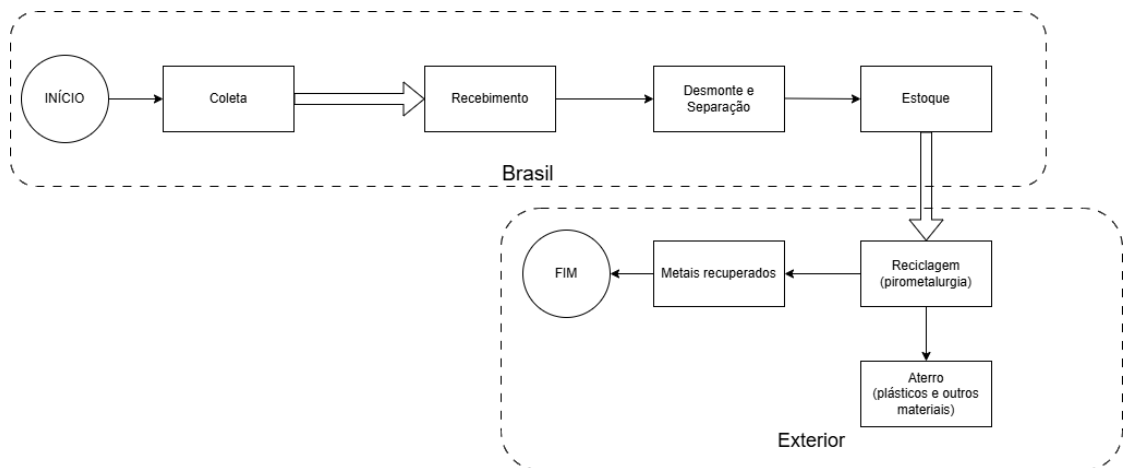
<b>Categorias de Impacto</b>	<b>Unidade</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>	<b>C6</b>	<b>C7</b>	<b>C8</b>	<b>C9</b>
Formação de material particulado fino	kg PM2.5 eq	-1.39E+02	2.25E-01	-3.46E-01	-1.37E+02	-1.37E+02	-1.39E+02	-1.39E+02	-1.39E+02	-1.40E+02
Escassez de recursos fósseis	kg oil eq	-3.30E+03	4.75E+01	-7.19E+02	-3.04E+03	-3.55E+03	-3.22E+03	-3.73E+03	-3.33E+03	-3.84E+03
Ecotoxicidade em água doce	kg 1,4-DCB	-2.57E+04	4.76E+00	7.57E-01	-2.60E+04	-2.60E+04	-2.62E+04	-2.62E+04	-2.57E+04	-2.57E+04
Eutrofização da água doce	kg P eq	-4.17E+01	1.21E-02	-1.06E-02	-4.18E+01	-4.18E+01	-4.23E+01	-4.23E+01	-4.17E+01	-4.17E+01
Aquecimento global	kg CO2 eq	-1.16E+04	8.31E+02	2.61E+02	-1.05E+04	-1.09E+04	-1.04E+04	-1.07E+04	-1.17E+04	-1.21E+04
Toxicidade carcinogênica para humanos	kg 1,4-DCB	-2.79E+03	1.61E+01	-5.51E+01	-4.13E+03	-4.18E+03	-4.20E+03	-4.24E+03	-2.81E+03	-2.86E+03
Toxicidade não carcinogênica para humanos	kg 1,4-DCB	-3.69E+05	6.79E+01	-1.10E+01	-4.22E+05	-4.23E+05	-4.30E+05	-4.30E+05	-3.69E+05	-3.69E+05
Radiação ionizante	kBq Co-60 eq	-1.03E+03	2.04E+01	1.59E+01	-1.11E+03	-1.11E+03	-1.15E+03	-1.15E+03	-1.03E+03	-1.03E+03
Uso do solo	m2a crop eq	-9.28E+02	1.11E+01	4.89E+00	-9.09E+02	-9.13E+02	-9.25E+02	-9.29E+02	-9.29E+02	-9.33E+02
Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DCB	-3.36E+04	1.38E+01	3.54E+00	-3.40E+04	-3.40E+04	-3.43E+04	-3.43E+04	-3.36E+04	-3.36E+04
Eutrofização marinha	kg N eq	-9.00E-01	6.52E-03	-7.36E-03	-3.10E-01	-3.19E-01	-8.66E-01	-8.75E-01	-9.01E-01	-9.10E-01
Escassez de recursos minerais	kg Cu eq	-7.15E+02	2.62E-01	-5.45E-01	-1.20E+03	-1.20E+03	-1.29E+03	-1.30E+03	-7.15E+02	-7.15E+02
Formação de ozônio, Saúde humana	kg NOx eq	-8.53E+01	4.19E-01	-8.50E-01	-8.67E+01	-8.75E+01	-8.74E+01	-8.82E+01	-8.72E+01	-8.80E+01
Formação de ozônio, Ecossistemas terrestres	kg NOx eq	-8.71E+01	4.40E-01	-1.21E+00	-8.85E+01	-8.96E+01	-8.93E+01	-9.04E+01	-8.91E+01	-9.02E+01
Destruição da camada de ozônio	kg CFC11 eq	-1.03E-02	4.10E-04	2.80E-04	-9.67E-03	-9.76E-03	2.25E-02	2.24E-02	-1.03E-02	-1.04E-02
Acidificação terrestre	kg SO2 eq	-4.43E+02	3.88E-01	-1.24E+00	-4.22E+02	-4.23E+02	-4.26E+02	-4.27E+02	-4.45E+02	-4.46E+02
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DCB	-2.59E+05	4.46E+03	-5.04E+01	-2.67E+05	-2.70E+05	-3.07E+05	-3.10E+05	-2.60E+05	-2.63E+05
Consumo de água	m3	-1.39E+02	1.15E+01	1.13E+01	-1.67E+02	-1.67E+02	-2.04E+02	-2.04E+02	-1.39E+02	-1.39E+02

Fonte: Autor (2025)

O cenário atual, no qual a recuperação de materiais ocorre no exterior, apresenta um benefício líquido devido à valorização dos materiais recuperados. No entanto, a longa distância percorrida para exportação reduz a eficiência ambiental desse cenário. Assim, para verificar se esse cenário é o melhor em termos ambientais, ou não, foi utilizado o método TOPSIS, com os pesos definidos previamente. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 6.

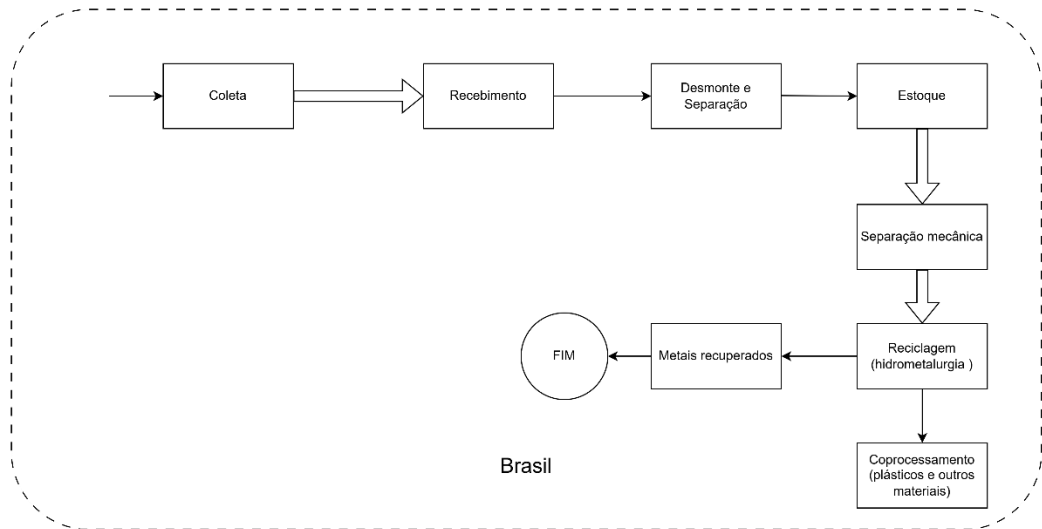
O melhor cenário identificado foi o 7, com a instalação de uma planta no Brasil, utilizando o método hidrometalúrgico proposto por Nan et al. (2024), que emprega produtos químicos com pH menor que 7 (ácidos) e inclui o coprocessamento dos materiais residuais para geração de energia. Em segundo lugar, foi classificado o cenário que utiliza o outro método hidrometalúrgico proposto pelos mesmos autores, com foco em produtos alcalinos e coprocessamento dos materiais residuais. Em seguida, os 3º e 4º colocados também utilizam a hidrometalurgia ácida e alcalina, respectivamente, porém com o encaminhamento dos materiais residuais para aterro. A figura 3 apresenta um fluxograma com as etapas do cenário 1, o atual, destacando a parte que é feita no exterior, enquanto a figura 4 mostra o cenário 7, destacando que todo o processo é realizado em solo brasileiro.

Figura 3 - Fluxograma do cenário 1



Fonte: Autor (2025)

Figura 4 - Fluxograma do cenário 7



Fonte: Autor (2025)

Tabela 6 - Classificação das alternativas

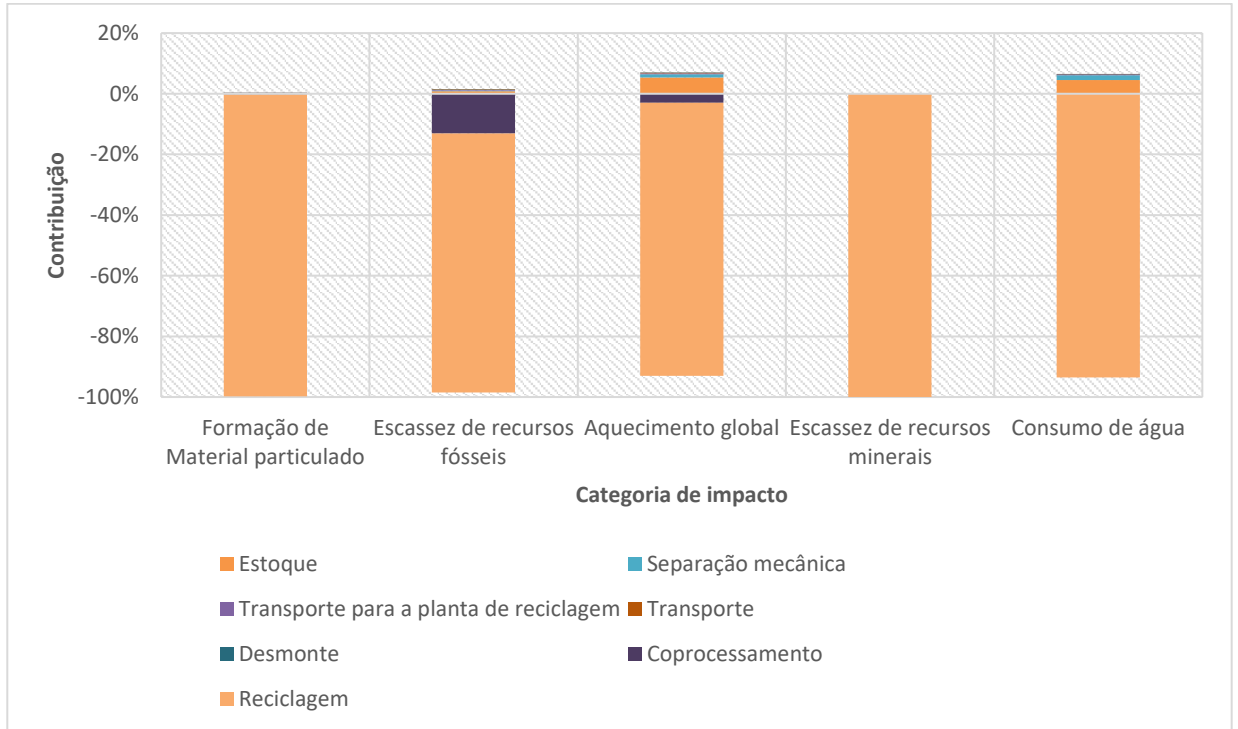
<b>Classificação das Alternativas</b>	<b>Escore de Desempenho</b>
C7	0.9254
C5	0.9083
C6	0.8969
C4	0.8729
C9	0.7536
C8	0.7414
C1	0.7389
C3	0.0922
C2	0.0396

Fonte: Autor (2025)

A Figura 5 apresenta a contribuição de cada etapa do processo para os resultados do cenário 7 relacionadas às principais categorias de impacto analisadas, considerando as categorias de impacto com maior peso. A análise de contribuição dos cenários 1 (reciclagem

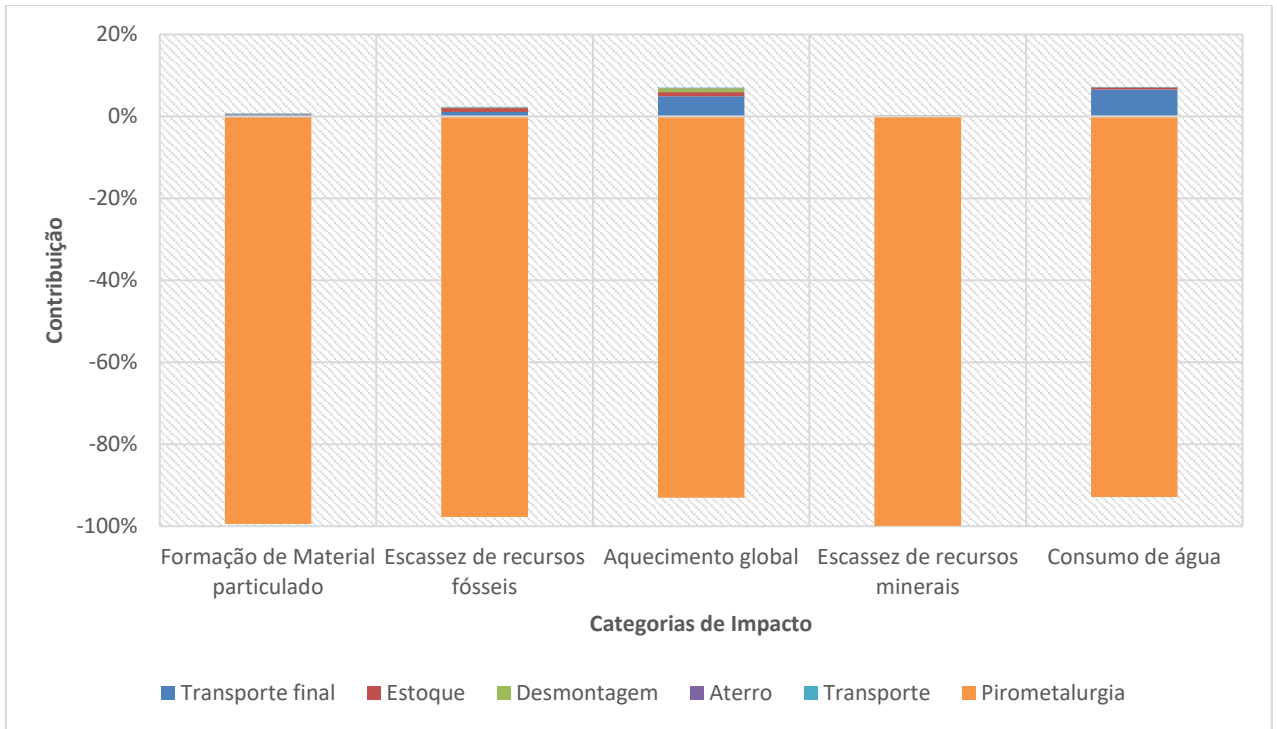
no exterior) e 5 (hidrometalurgia alcalina e coprocessamento) estão nas figuras 6 e 7, respectivamente.

Figura 5 - Contribuição de cada etapa para o impacto ambiental no cenário 7



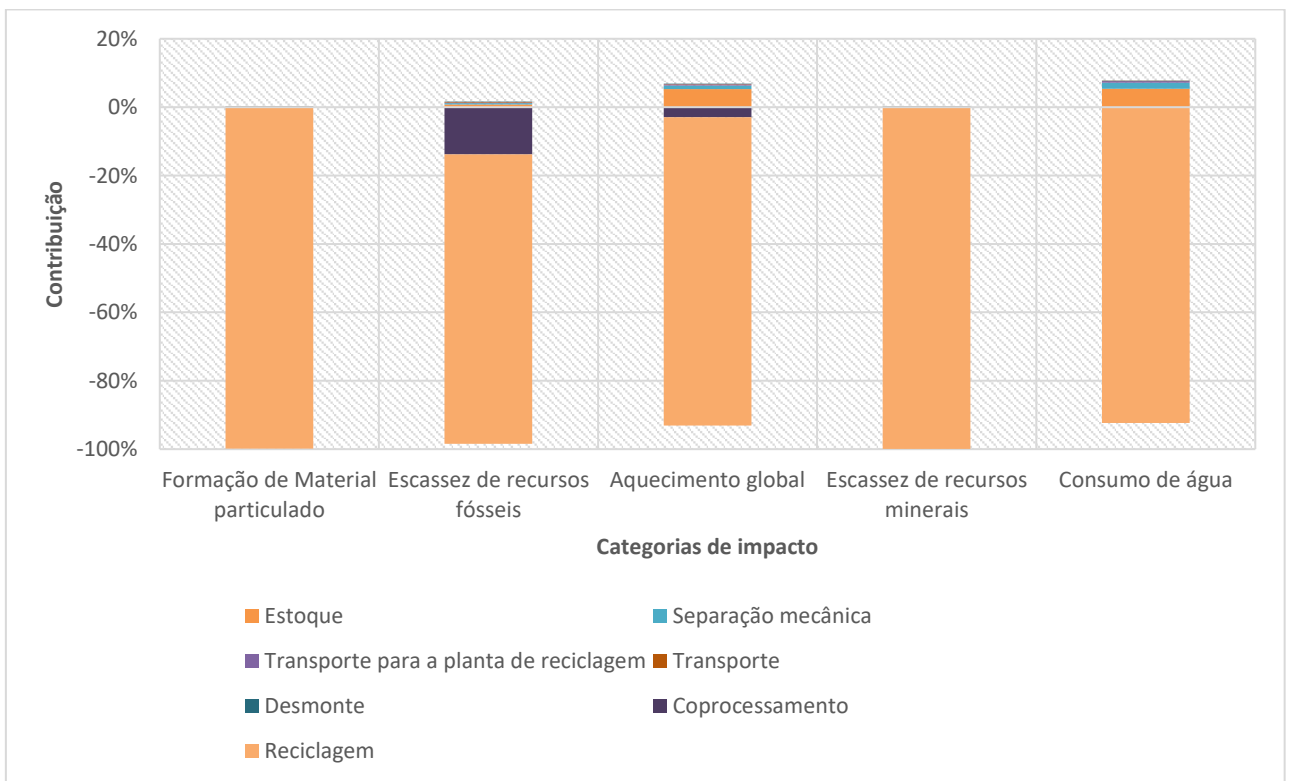
Fonte: Autor (2025)

Figura 6 - Contribuição de cada etapa para o impacto ambiental no cenário 1



Fonte: Autor (2025)

Figura 7 - Contribuição de cada etapa para o impacto ambiental no cenário 9



Fonte: Autor (2025)

A reciclagem é, claramente, a etapa que proporciona o maior benefício ambiental, pois evita a extração de matéria-prima virgem, um processo altamente impactante em diversas categorias de impacto. Os destaques nesse contexto são o ouro e o paládio, cuja extração envolve procedimentos intensivos e prejudiciais ao meio ambiente. No cenário atual, com os RPCI indo para o exterior, o transporte, especialmente na categoria de mudanças climáticas, apresenta impacto significativo, abrangendo tanto o transporte dentro do Brasil, para a coleta dos REEE, quanto, principalmente, a exportação dos RPCI. Contudo, o benefício ambiental advindo da substituição de materiais virgens pelos reciclados compensa esse impacto. Dado que o material residual da reciclagem é encaminhado para aterro, não há o benefício da recuperação de energia pelo coprocessamento.

Quando comparado ao cenário de tratamento no exterior, o cenário hidrometalúrgico ácido com coprocessamento apresentou desempenho ambiental superior em diversas categorias de impacto. As reduções mais expressivas ocorreram nas categorias de escassez de recursos fósseis e escassez de recursos minerais, representando, respectivamente, benefícios adicionais de cerca de 13% e 82% em relação à rota pirometalúrgica. Tais ganhos decorrem principalmente da substituição da etapa de fundição em altas temperaturas por reações em meio aquoso, que demandam menor uso de combustíveis fósseis. Além disso, o controle operacional em reatores hidrometalúrgicos reduz emissões difusas de partículas, o que se reflete no melhor desempenho em formação de material particulado fino.

Por outro lado, o cenário ácido apresentou melhor desempenho em consumo de água, com uma economia estimada de aproximadamente 47% em relação ao processo pirometalúrgico. Esse resultado está associado à recuperação parcial de água de processo e à ausência de fusão em altas temperaturas, o que reduz a demanda hídrica indireta relacionada à geração de energia. As etapas modeladas, embora incluam fluxos de água ultrapura, hidróxido de sódio (NaOH) e ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>), ainda apresentam balanço líquido favorável, pois o crédito obtido pela recuperação de metais e substituição de produtos primários supera o consumo direto desses insumos. A categoria de aquecimento global também apresentou um trade-off relevante: enquanto o cenário pirometalúrgico totalizou aproximadamente  $-1,21 \times 10^4$  kg CO<sub>2</sub> eq, o cenário ácido resultou em  $-1,07 \times 10^4$  kg CO<sub>2</sub> eq, um impacto 7,6% mais elevado.

Essa diferença é explicada por dois fatores principais. Primeiro, a produção industrial dos reagentes empregados, especialmente o ácido nítrico e o hidróxido de sódio, é responsável por emissões de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), este último com potencial de aquecimento global cerca de 298 vezes superior ao CO<sub>2</sub>. Segundo, a inclusão do coprocessamento por incineração adiciona emissões diretas de CO<sub>2</sub> fóssil, provenientes da

combustão de coque de petróleo e resíduos orgânicos. Embora parte dessas emissões seja compensada pelos créditos energéticos de substituição de combustíveis fósseis em cimenteiras, o balanço líquido ainda favorece ligeiramente o processo pirometalúrgico na categoria de mudanças climáticas.

Ao comparar o cenário Nan et al. (2024) – Ácido + Coprocessamento com o Nan et al. (2024) – Básico + Coprocessamento, observa-se comportamento semelhante nas categorias de formação de material particulado fino e escassez de recursos minerais.

Entretanto, o cenário ácido apresentou impacto ligeiramente superior em aquecimento global ( $\approx 2\text{--}3\%$ ), resultado da produção de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), um insumo com elevada emissão de óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Já o cenário alcalino, que utiliza amônia e hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ), tem menor contribuição nessa categoria, ainda que apresente maior consumo de água devido às etapas adicionais de neutralização e diluição de subprodutos amoniacaais.

As pequenas variações observadas nas categorias de escassez de recursos fósseis e minerais refletem as diferenças nas cadeias de fornecimento dos reagentes, e não na eficiência metalúrgica em si. De modo geral, ambas as rotas apresentam desempenho ambiental próximo, com algumas categorias apresentando diferença maior.

De forma geral, os resultados indicam que o cenário ácido com coprocessamento oferece o melhor desempenho agregado entre as rotas hidrometalúrgicas avaliadas, sendo competitivo inclusive frente à rota pirometalúrgica feita no exterior. Essa vantagem é mais expressiva nas categorias que possuem maior peso na avaliação global. Ainda assim, as categorias de aquecimento global e consumo de água merecem atenção, pois refletem a dependência de insumos químicos com alto conteúdo energético e hídrico. É importante, portanto, a atenção às etapas de neutralização e lavagem, bem como a substituição parcial de reagentes por alternativas de menor intensidade de carbono.

Ao avaliar o potencial de geração de REEE no Brasil pela equação de regressão utilizada, caso a meta do acordo setorial, contando com 14.752,07 toneladas de RPCI sendo coletadas e devidamente destinadas, cerca de 2153 t de cobre, 2,95 t de ouro, 2,95 t de paládio e 7,38 t de prata podem ser recuperadas, o que tem potencial de evitar a emissão de 1,58E8 kg de  $\text{CO}_2$  eq., além de evitar o uso de 5,49E7 kg de petróleo eq., 1,91E7 kg de Cu eq. em termos de recursos minerais e 3E6 m<sup>3</sup> de água. Isso relacionado apenas às PCI.

Assim, realizar a reciclagem de RPCI no Brasil pode, além de trazer benefícios ambientais, recuperar uma grande quantidade de metais preciosos em território nacional, o que contribui para a economia circular no país, já que esses materiais têm a possibilidade de entrar

novamente no ciclo produtivo e evitar a extração de matéria-prima virgem, que traz altos impactos ao meio ambiente.

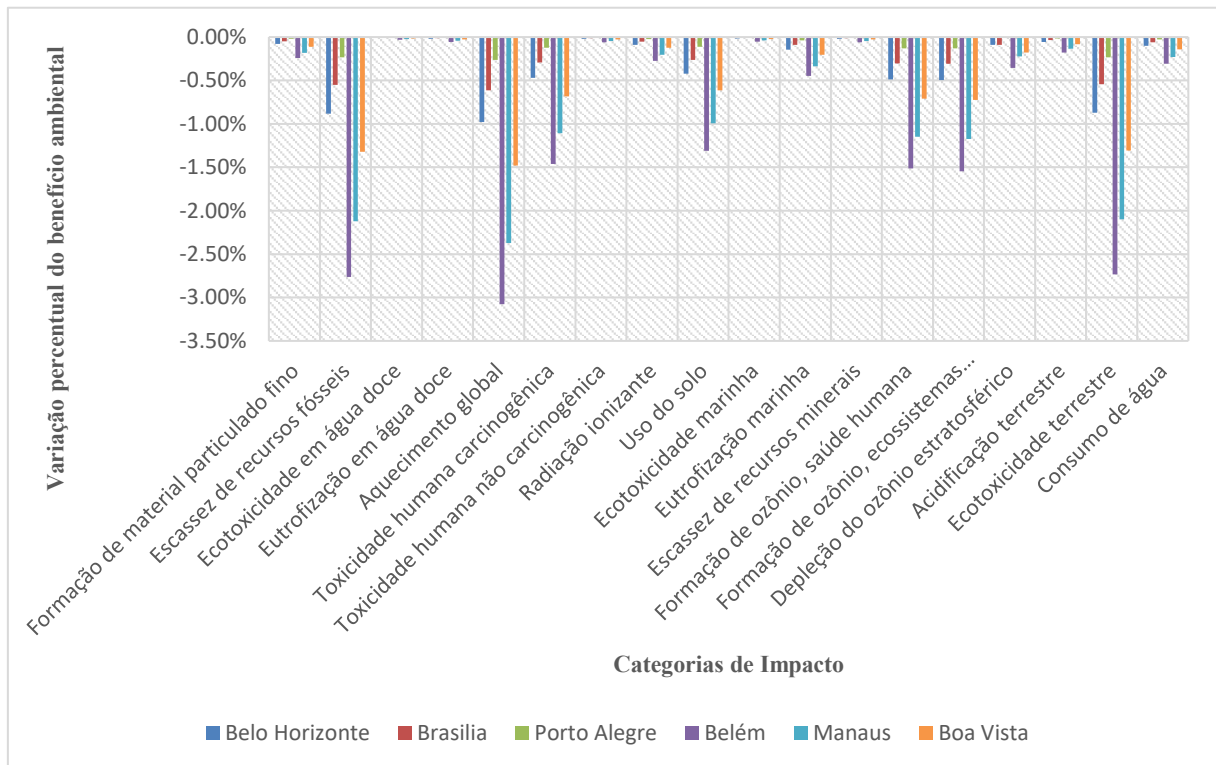
Os resultados deste estudo vão na linha de Islam e Iyer-Raniga (2023), realizaram uma comparação entre diversos cenários para a reciclagem de RPCI na Austrália, chegando a conclusão de que recuperar os metais e incinerar o restante seria a melhor condição. Estes autores, porém, não compararam diferentes métodos de recuperação, e não consideraram os créditos ambientais. Por outro lado, Ismail e Hannafiah (2021), concluíram que no caso da Malásia, seria melhor o cenário apenas com a promoção da incineração. Ademais, Rocha e Penteadó (2021) mostraram que, de fato, ouro e paládio são metais que, reciclados, trazem grande benefício ambiental, já que evitam o processo de extração virgem desses materiais, processos esses que são consideravelmente impactantes. Por fim, Pokhrel, Lin e Tsai (2020) também mostraram o ouro reciclado de RPCI como um causador de benefício ambiental.

## 4.2. Análise de Sensibilidade

### 4.2.1. Avaliação do Ciclo de Vida

Para avaliar o impacto das mudanças nos parâmetros sobre os resultados, foi realizada uma análise de sensibilidade para o cenário 7. Nessa análise, variou-se a localização da planta brasileira de reciclagem de RPCI e testou-se um cenário com o uso exclusivo de energias renováveis em todos os processos. Os impactos da mudança de localização da planta de reciclagem estão apresentados na figura 8.

Figura 8 - Alterações nos impactos ambientais devido à alteração da localização da planta de reciclagem



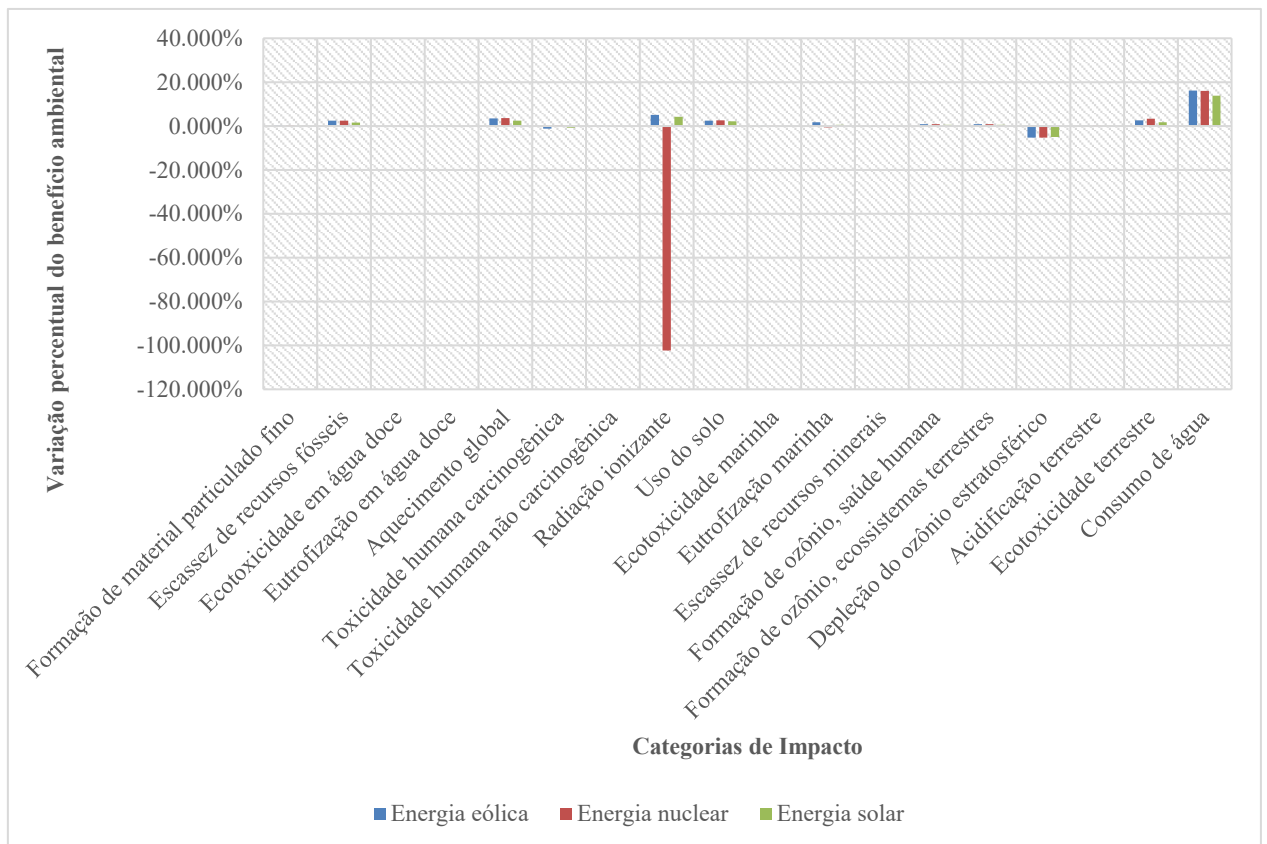
Fonte: Autor (2025)

Observa-se que os impactos ambientais aumentam gradualmente à medida que as distâncias consideradas se tornam maiores, com Boa Vista (RR) apresentando os maiores valores em quase todas as categorias devido à maior distância de transporte até a planta de tratamento. Ainda assim, as variações são relativamente pequenas, limitando-se a cerca de 3,5% em relação ao cenário de referência.

As categorias que mais contribuíram para esse aumento foram aquecimento global, ecotoxicidade terrestre e consumo de água, refletindo o acréscimo nas emissões de gases de efeito estufa e no uso indireto de recursos hídricos associados ao transporte rodoviário de longa distância. Apesar disso, todas as rotas continuam apresentando benefícios ambientais líquidos, uma vez que os créditos gerados pela recuperação de metais secundários e evitação da extração mineral primária superam os impactos adicionais decorrentes da logística reversa.

Outro ponto importante para analisar é a utilização de energia. Para isso, foram realizadas alterações no tipo de energia, sendo, ao invés do mix brasileiro, uso exclusivo de energia solar ou eólica ou nuclear. A figura 9 apresenta a variação percentual em cada categoria impacto de acordo com o tipo de energia utilizado, comparado com o cenário base.

Figura 9 - Alterações nos impactos ambientais devido à alteração do tipo de energia utilizado



Fonte: Autor (2025)

De maneira geral, observa-se que a substituição do mix elétrico brasileiro por fontes eólica, solar ou nuclear resultou em reduções médias de impacto entre 2% e 3,5% na maioria das categorias avaliadas. As maiores reduções foram registradas em aquecimento global (até 3,6% com energia nuclear), escassez de recursos fósseis (até 2,5%) e uso do solo (cerca de 2,6%), o que reflete a menor intensidade de carbono e a menor dependência de combustíveis fósseis nas matrizes de energia renovável.

Um destaque importante é o aumento expressivo na categoria de radiação ionizante no cenário de energia nuclear, que apresentou um incremento superior a 100%, resultado direto da natureza do combustível utilizado e da geração de rejeitos radioativos inerente a esse tipo de matriz. Em contraste, as opções eólica e solar apresentaram melhor desempenho global, com reduções consistentes e sem aumento relevante em nenhuma categoria de impacto.

Adicionalmente, o consumo de água mostrou-se sensivelmente maior em todas as alternativas, com elevação entre 13,8% e 16,1%, devido à maior participação de sistemas de resfriamento e purificação de água em matrizes energéticas renováveis e nucleares.

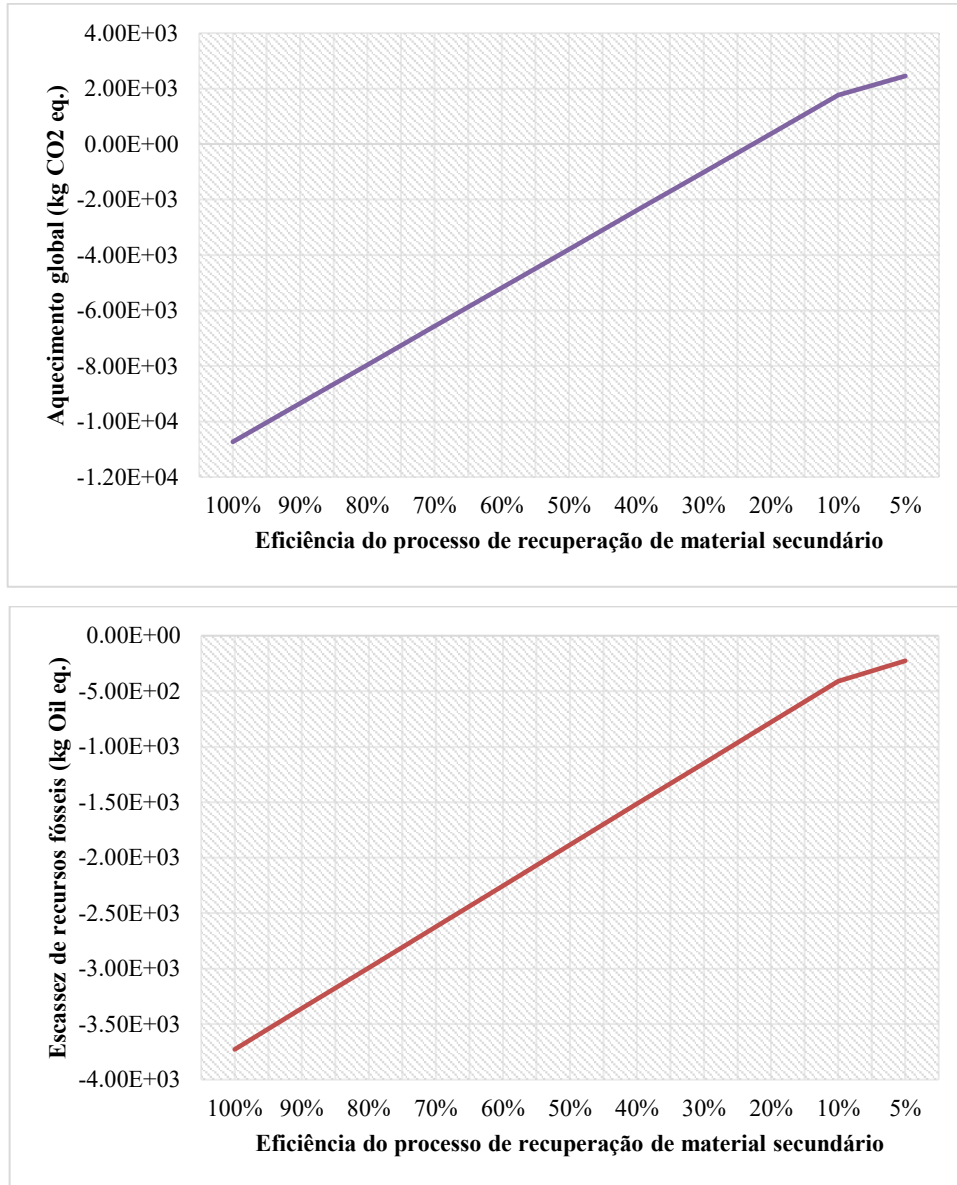
Esses resultados reforçam que o tipo de matriz energética exerce influência direta sobre o desempenho ambiental da logística reversa de REEE, principalmente nas categorias associadas às emissões atmosféricas e ao uso de recursos naturais. Assim, a priorização de fontes renováveis de baixa demanda hídrica, como a energia eólica, pode aumentar os benefícios ambientais líquidos do sistema.

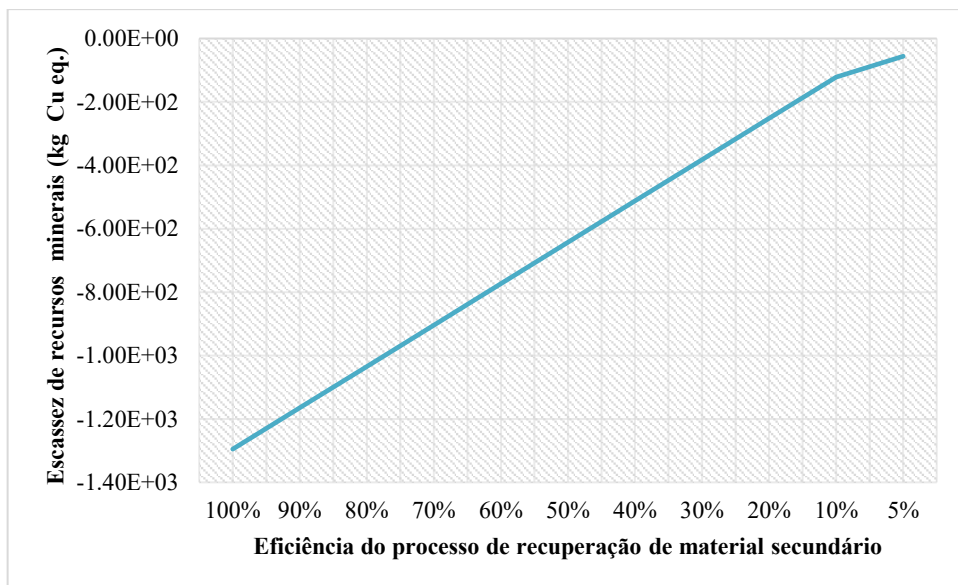
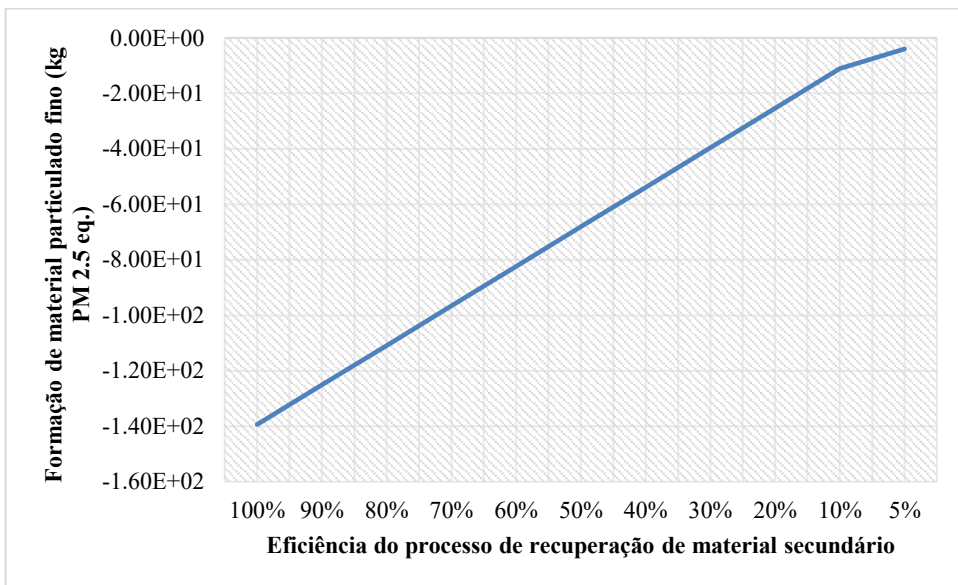
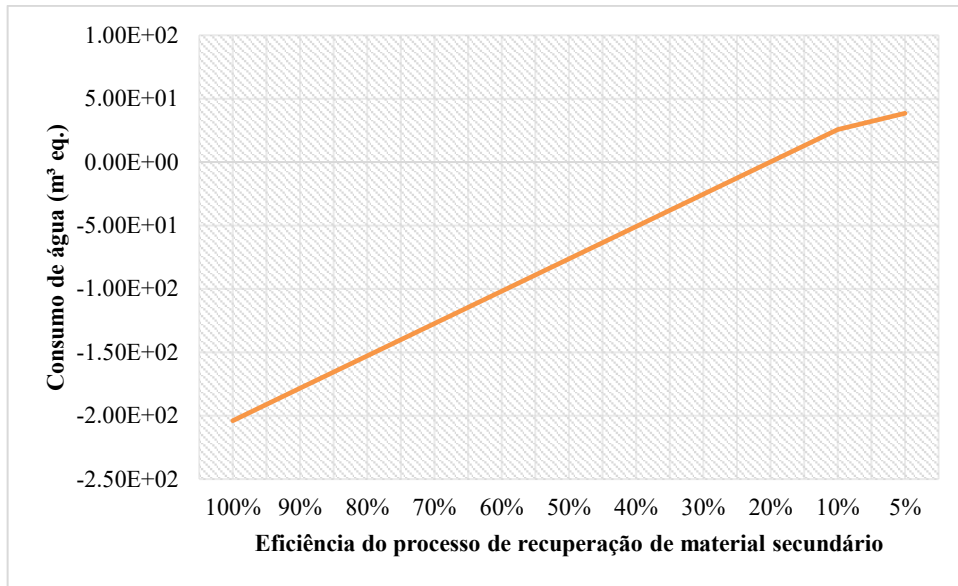
Por fim, a eficiência do processo de recuperação exerce papel determinante sobre o desempenho ambiental do sistema, pois define diretamente o volume de material secundário efetivamente recuperado e, conseqüentemente, os créditos ambientais associados à substituição da matéria-prima virgem. Essa análise é essencial para avaliar a escalabilidade industrial do processo e estimar o ponto a partir do qual a recuperação deixa de ser ambientalmente vantajosa.

A Figura 10 apresenta os resultados obtidos para diferentes níveis de eficiência (de 100% a 5%) considerando as categorias de formação de material particulado fino, aquecimento global, escassez de recursos fósseis, escassez de recursos minerais e consumo de água. Observa-se um comportamento linear decrescente dos benefícios ambientais em todas as categorias à medida que a eficiência é reduzida, refletindo a menor geração de créditos pela recuperação de metais.

Entre as categorias avaliadas, apenas aquecimento global deixa de apresentar benefício líquido, tornando-se positivo (impacto) quando a eficiência do processo atinge cerca de 60%. Nas demais categorias, o benefício ambiental é mantido mesmo em níveis reduzidos de eficiência, embora com magnitude proporcionalmente menor

Figura 10 - Alterações nos impactos ambientais devido à eficiência do processo de reciclagem para as categorias de aquecimento global, escassez de recursos fósseis, consumo de água, formação de material particulado fino e escassez de recursos minerais, respectivamente.





Fonte: Autor (2025)

#### 4.2.2. Método de Decisão Multicritério

Para avaliar a robustez do ranking obtido pelo método TOPSIS, foi conduzida uma análise de sensibilidade envolvendo tanto as ponderações dos critérios quanto a própria técnica de decisão multicritério. No que diz respeito aos pesos, adotaram-se duas abordagens: (i) perturbação aleatória de cada peso em  $\pm 95\%$  do valor nominal e (ii) geração de vetores de peso a partir de uma distribuição de Dirichlet ( $\alpha = 1$ ), assegurando-se em ambos os casos que a soma das ponderações fosse igual a 1. Em cada abordagem, realizaram-se 10 000 simulações de Monte Carlo, recalculando em cada iteração o ranking de cenários e comparando-o ao ordenamento original por meio do coeficiente de correlação de postos de Spearman. Além disso, para verificar a consistência metodológica, também foram aplicados o Weighted Sum Model (WSM), que combina normalização min-max com soma ponderada, e o método VIKOR, que integra utilidade agregada (S) e arrependimento máximo (R) em um índice Q.

Nas Tabelas 7 e 8 são apresentados, respectivamente, os escores e os rankings gerados pelos métodos VIKOR e Weighted Sum Model (WSM). No VIKOR, valores menores de Q correspondem a melhor compromisso entre desempenho médio e pior caso; já no WSM, cenários com escores mais altos indicam maior desempenho agregado. Em ambos os métodos, o ordenamento dos 9 cenários coincidiu integralmente com o ranking original do TOPSIS ( $\rho$  de Spearman = 1,00), o que demonstra que, independentemente da técnica de agregação adotada, a identificação do cenário menos impactante permanece estável.

Tabela 7 - Classificação das alternativas pelo método VIKOR

<b>Cenário</b>	<b>Pontuação</b>
C7	0.0000
C5	0.0273
C6	0.0367
C4	0.0801
C9	0.2503
C8	0.2623
C1	0.2652
C3	0.9807
C2	1.0000

Fonte: Autor (2025)

Tabela 8 - Classificação das alternativas pelo método WSM

<b>Cenário</b>	<b>Pontuação</b>
C7	0.9684
C5	0.9453
C6	0.9306
C4	0.9063
C9	0.8641
C8	0.8410
C1	0.8364
C3	0.0431
C2	0.0067

Fonte: Autor (2025)

Para avaliar a robustez dos resultados frente a variações na ponderação dos critérios, foram aplicadas simulações Monte Carlo (10.000 iterações, variação  $\pm 95\%$ ) e Dirichlet (pesos 100% aleatórios).

No TOPSIS (Monte Carlo), o cenário hidrometalúrgico ácido com coprocessamento apresentou probabilidade de 75,2% de ocupar a primeira posição, seguido do hidrometalúrgico básico com coprocessamento com 23,8%. As demais alternativas apresentaram probabilidades inferiores a 1%, e o ranking permaneceu idêntico ao baseline em 34,9% das iterações, com correlação média de Spearman = 0.968.

O WSM demonstrou ainda maior robustez: o cenário ácido manteve a primeira posição em 99,6% das simulações, com correlação média de 0.989. No teste Dirichlet, o mesmo cenário obteve 57,8% das ocorrências em primeiro lugar, seguido do básico (24,0%) e do pirometalúrgico (18,1%), com Spearman médio = 0.735.

O TOPSIS com Dirichlet apresentou distribuição mais dispersa, com 46,9% para o cenário básico, 27,5% para o pirometalúrgico e 25,7% para o ácido, ainda com tendência à liderança hidrometalúrgica (Spearman médio = 0.557).

No caso do VIKOR, os resultados foram igualmente consistentes. Sob a análise Monte Carlo ( $\pm 95\%$ ), o cenário hidrometalúrgico ácido com coprocessamento manteve a liderança em 95,6% das simulações, seguido do hidrometalúrgico básico com coprocessamento com 3,6% e do pirometalúrgico + coprocessamento com 0,8%. O coeficiente médio de Spearman (0.979) indica alta estabilidade entre as simulações e o ranking determinístico.

Na abordagem Dirichlet, que assume pesos totalmente aleatórios, o cenário ácido continuou predominante, com 38,6% das iterações em primeiro lugar, seguido do cenário básico (37,3%) e do pirometalúrgico (24,2%), com Spearman médio de 0.638 — confirmando que,

mesmo sob total incerteza nas preferências dos critérios, as rotas hidrometalúrgicas permanecem as mais favorecidas.

## 5. CONCLUSÕES

Este estudo avaliou diferentes estratégias de fim de vida para os RPCI gerados no Brasil, utilizando a metodologia de ACV. Os resultados indicaram que o processo hidrometalúrgico ácido proposto por Nan et al. (2024) é atualmente a opção mais adequada para a reciclagem de RPCI caso o processo seja realizado no Brasil. Esse método, que foca em químicos com pH ácido (menor que 7), mostrou-se eficiente na recuperação de metais preciosos, como ouro e paládio, apresentando impactos ambientais reduzidos em comparação com outros métodos de tratamento para recuperação dos metais das PCI analisados.

Assim, o cenário ideal para a gestão desses resíduos no Brasil consiste na implantação de uma planta nacional localizada em São Caetano, cidade escolhida a partir de análises presentes na literatura, utilizando o processo hidrometalúrgico ácido. Além disso, o incentivo ao uso de energias renováveis no país pode amplificar os benefícios ambientais dessa abordagem. Observou-se ainda que, mesmo com o aumento da distância percorrida para o transporte das PCI, os impactos ambientais adicionais permanecem pouco significativos.

O estudo apresenta algumas limitações. Métodos alternativos, como os biometalúrgicos, poderiam ser explorados em futuras análises. Além disso, é necessária uma avaliação econômica detalhada para determinar a viabilidade financeira da instalação e operação de uma planta desse tipo nas condições brasileiras. Ademais, não houve uma diferenciação dos tipos de PCI, sendo considerado que elas representam 3% dos REEE. Por fim, recomenda-se que pesquisas futuras realizem uma Avaliação Social do Ciclo de Vida (ASCV) para compreender os impactos sociais associados à implementação dessa planta no Brasil e uma análise de viabilidade econômica.

A presente pesquisa oferece uma contribuição ao campo da gestão de resíduos de PCI ao trazer uma abordagem que compara diferentes cenários de gestão de PCI no Brasil. Com ênfase nos aspectos ambientais, este estudo integra a ACV e MDMC. Essa abordagem permite não apenas avaliar o desempenho ambiental de diferentes estratégias de gestão, mas também fornecer uma ferramenta prática para orientar a tomada de decisão em contextos nacionais. Dessa forma, a pesquisa complementa a literatura existente ao oferecer uma visão holística e adaptada à realidade brasileira, preenchendo lacunas relacionadas à sustentabilidade e à eficiência da gestão de RPCI.

Do ponto de vista prático, o estudo aponta caminhos promissores para a implantação de plantas de reciclagem de RPCI no Brasil, destacando a viabilidade ambiental e os benefícios econômicos de internalizar a reciclagem. Isso inclui a redução de impactos associados ao transporte internacional e a retenção de valor econômico no país. Além disso, ao abordar o potencial de recuperação de materiais críticos, como ouro e paládio, o estudo reforça a importância de promover uma economia circular e sustentável, alinhada às diretrizes da Estratégia Nacional de Economia Circular e da Lei de Incentivo à Reciclagem.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro (Processo nº 88887.967130/2024-00) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), (Processo nº 408190/2021-3).

## CONFLITOS DE INTERESSE

Os autores declaram não haver conflito de interesse.

## REFERENCIAS

ABBONDANZA, M. N. M.; SOUZA, R. G. Estimating the generation of household e-waste in municipalities using primary data from surveys: A case study of Sao Jose dos Campos, Brazil. **Waste Management**, v. 85, p. 374–384, 15 fev. 2019.

AIDONIS, Dimitrios *et al.* Decision support model for evaluating alternative waste electrical and electronic equipment management schemes-A case study. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 12, 2019.

AWASTHI, Abhishek Kumar *et al.* Evaluating waste printed circuit boards recycling: Opportunities and challenges, a mini review. **Waste Management and Research**, v. 35, n. 4, p. 346–356, 1 abr. 2017.

BALDÉ, Cornelis P. *et al.* **Global E-waste Monitor 2024**. Genebra/Bonn: International Telecommunication Union (ITU) e United Nations Institute for Training and Research (UNITAR), 2 nov. 2024. Disponível em: <<https://www.itu.int/itu-d/sites/environment.>>.

BONNIN, Marie *et al.* Multicriteria optimization of copper scrap management strategy. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 99, p. 48–62, 1 jun. 2015.

BRASIL. Lei nº 12.305/2010 – Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). . 2 ago. 2010.

BRASIL. Decreto nº 10.240/2020 – Logística Reversa de Produtos Eletroeletrônicos. . 12 fev. 2020.

BRASIL. 12082. Estratégia Nacional de Economia Circular. . 2024 a.

BRASIL. 12106. Lei de Incentivo à Reciclagem. . 2024 b.

COLÔMBIA. Política Nacional para la Gestión Integral de RAEE. . 31 maio 2017.

CLASSEN, M. et al. **Life Cycle Inventories of Metals**. Ecoinvent v2.1 Report N° 10. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2009

DE OLIVEIRA, José Augusto *et al.* (ORGS.). **Life Cycle Engineering and Management of Products**. Cham: Springer International Publishing, 2021.

EUROPEAN UNION JOINT RESEARCH CENTRE (EU-JRC). **Product Environmental Footprint Category Rules Guidance (PEF) – Version 6.3**. , 2018.

GELMAN, Andrew *et al.* Bayesian Data Analysis Third edition (with errors fixed as of 20 February 2025). 2025.

GOODWIN, Paul; WRIGHT, George. **Decision Analysis for Management Judgment**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2002.

GRIMES, Sue M.; MAGUIRE, David. Assessment of priorities in critical material recovery from Waste Electrical and Electronic Equipment. **Resources Policy**, v. 68, 1 out. 2020.

HE, Yifeng *et al.* Driving sustainable circular economy in electronics: A comprehensive review on environmental life cycle assessment of e-waste recycling. **Environmental Pollution**, v. 342, 1 fev. 2024.

HUIJBREGTS, Mark A. J. *et al.* ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 2, p. 138–147, fev. 2017.

IANNICELLI-ZUBIANI, E. M. *et al.* Environmental impacts of a hydrometallurgical process for electronic waste treatment: A life cycle assessment case study. **JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION**, v. 140, p. 1204–1216, maio 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14040: Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework**. International Organization for Standardization, , 2006a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14044: Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines**. International Organization for Standardization, , 2006b.

ISLAM, Md Tasbirul; IYER-RANIGA, Usha. Life cycle assessment of e-waste management system in Australia: Case of waste printed circuit board (PCB). **Journal of Cleaner Production**, v. 418, 15 set. 2023.

ISMAIL, Haikal; HANAFIAH, Marlia M. Evaluation of e-waste management systems in Malaysia using life cycle assessment and material flow analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 308, 25 jul. 2021.

JAPÃO. Home Appliance Recycling Law. . 5 jun. 1998.

JAPÃO. Act on the Promotion of Effective Utilization of Resources. . 2 jun. 2000.

JUNGLUTH, Niels; MEILI, Christoph; WENZEL, Paula. **Life cycle inventories of oil refinery processing and products**. Schaffhausen, Switzerland: ESU-services Ltd. Commissioned by BAFU, BFE & Erdöl-Vereinigung, 2018.

KAYA, Muammer. **Electronic Waste and Printed Circuit Board Recycling Technologies The Minerals, Metals & Materials Series**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<http://www.springer.com/series/15240>>.

KUMAR SINGH, Shubham; CHAUHAN, Anand; SARKAR, Biswajit. Supply Chain Management of E-Waste for End-of-Life Electronic Products with Reverse Logistics. **Mathematics**, v. 11, n. 1, 1 jan. 2023.

LIU, Kang *et al.* A global perspective on e-waste recycling. **Circular Economy**, v. 2, n. 1, p. 100028, mar. 2023.

LIU, Kang *et al.* Negative-carbon recycling of copper from waste as secondary resources using deep eutectic solvents. **Journal of Hazardous Materials**, v. 465, 5 mar. 2024.

NAN, Tianxiang *et al.* Process simulation and life cycle assessment of hydrometallurgical recycling routes of waste printed circuit boards. **Journal of Cleaner Production**, v. 435, 5 jan. 2024.

OFLAZ, Fikret *et al.* A novel fuzzy decision-making methodology for ranking energy storage investments in emerging economies. **Decision Analytics Journal**, v. 9, p. 100345, 2023.

OLIVEIRA NETO, José Francisco *et al.* Potential of metal recovery from printed circuit boards in Brazil. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, n. 39, p. 51702–51718, 2024.

OPRICOVIC, Serafim; TZENG, Gwo-Hshiung. Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. **European Journal of Operational Research**, v. 156, n. 2, p. 445–455, jul. 2004.

OTTONI, Marianna *et al.* Avaliação de sustentabilidade para alocação de unidades de processamento de resíduos de placas de circuito impresso: O caso brasileiro. **Ambiente & Sociedade**, v. 26, 2023.

POKHREL, Prakash; LIN, Sheng Lung; TSAI, Chi Ting. Environmental and economic performance analysis of recycling waste printed circuit boards using life cycle assessment. **Journal of Environmental Management**, v. 276, 15 dez. 2020.

QUEIRUGA, Dolores *et al.* Evaluation of sites for the location of WEEE recycling plants in Spain. **Waste Management**, v. 28, n. 1, p. 181–190, 2008.

RAO, Mudila Dhanunjaya *et al.* Life cycle analysis on sequential recovery of copper and gold from waste printed circuit boards. **Waste Management**, v. 171, p. 621–627, 1 nov. 2023.

REZAEI, Mohammad *et al.* Eco-friendly recovery of base and precious metals from waste printed circuit boards by step-wise glycine leaching: Process optimization, kinetics modeling, and comparative life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 389, 20 fev. 2023.

ROCHA, Tiago Barreto; PENTEADO, Carmenlucia Santos Giordano. Life cycle assessment of a small WEEE reverse logistics system: Case study in the Campinas Area, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 314, 10 set. 2021.

ROUSIS, K. *et al.* Multi-criteria analysis for the determination of the best WEEE management scenario in Cyprus. **Waste Management**, v. 28, n. 10, p. 1941–1954, 2008.

RUBIN, Ricardo Soares *et al.* Utilization of Life Cycle Assessment methodology to compare two strategies for recovery of copper from printed circuit board scrap. **Journal of Cleaner Production**, v. 64, p. 297–305, 1 fev. 2014.

SPEARMAN, C. The proof and measurement of association between two things. **The American Journal of Psychology**, v. 15, n. 1, p. 72–101, 1904.

TSIAMIS, Demetra; CASTALDI, Marco. **Determining accurate heating values of non-recycled plastics (NRP)**. Earth Engineering Center City: University of New York, 2016. Disponível em: <<https://plastics.americanchemistry.com/Energy-Values-Non-Recycled-Plastics.pdf>>.

UNIÃO EUROPEIA. Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council of 27 Jan 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment. . 27 jan. 2003 a, p. 19–23.

UNIÃO EUROPEIA. Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council on Waste Electrical and Electronic Equipment. . 27 jan. 2003 b, p. 24–39.

VACCARI, Mentore *et al.* Application of an integrated assessment scheme for sustainable waste management of electrical and electronic equipment: The case of Ghana. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 8, p. 3191, 1 abr. 2020.

VILLARES, Marco *et al.* Applying an ex-ante life cycle perspective to metal recovery from e-waste using bioleaching. **Journal of Cleaner Production**, v. 129, p. 315–328, 15 ago. 2016.

WITHANAGE, Sohani Vihanga; HABIB, Komal. Life cycle assessment and material flow analysis: Two under-utilized tools for informing e-waste management. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 14, 2 jul. 2021.

XAVIER, Lúcia Helena; OTTONI, Marianna; ABREU, Leonardo Picanço Peixoto. A comprehensive review of urban mining and the value recovery from e-waste materials. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 190, 1 mar. 2023.

XUE, Mianqiang *et al.* Waste management of printed wiring boards: A life cycle assessment of the metals recycling chain from liberation through refining. **Environmental Science and Technology**, v. 49, n. 2, p. 940–947, 20 jan. 2015.

## APÊNDICES

Tabela S1 - Conexão entre os produtos e processos estudados e a base Ecoinvent

Produto/Processo	Ligação com a Base Ecoinvent
Transporte Terrestre	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4   transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4   APOS, U - RoW
Diesel	market for diesel   diesel   APOS, U - BR
Eletricidade	electricity, medium voltage market for electricity, medium voltage   electricity, medium voltage   APOS, U - BR-South-eastern/Mid-western grid
Energia Solar	electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, multi-Si, panel, mounted   electricity, low voltage   APOS, U - BR-South-eastern/Mid-western grid
Energia Eólica	electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore   electricity, high voltage   APOS, U - BR-Southern grid
Energia Nuclear	electricity production, nuclear, pressure water reactor   electricity, high voltage   APOS, U - BR-South-eastern/Mid-western grid
Transporte marítimo	transport, freight, sea, container ship transport, freight, sea, container ship   transport, freight, sea, container ship   APOS, U - GLO
Coprocessamento	process-specific burdens, hazardous waste incineration plant   process-specific burdens, hazardous waste incineration plant   APOS, U - RoW
Coque de petróleo	petroleum coke petroleum coke production, petroleum refinery operation   petroleum coke   APOS, U - RoW
Produto evitado cobre	market for copper, cathode   copper, cathode   APOS, U - GLO
Produto evitado níquel	market for nickel, class 1   nickel, class 1   APOS, U - GLO
Produto evitado ouro	market for gold   gold   APOS, U - GLO
Produto evitado chumbo	market for lead   lead   APOS, U - GLO
Produto evitado paládio	market for palladium   palladium   APOS, U - GLO
Produto evitado prata	market for silver   silver   APOS, U - GLO
Produto evitado alumínio	market for aluminium, primary, ingot   aluminium, primary, ingot   APOS, U - RoW
Pirometalurgia	electronics scrap treatment of electronics scrap, metals recovery in copper smelter   electronics scrap   APOS, U - RoW
Amônia	ammonia, anhydrous, liquid market for ammonia, anhydrous, liquid   ammonia, anhydrous, liquid   APOS, U - RoW
Sulfato de amônia	ammonium sulfate market for ammonium sulfate   ammonium sulfate   APOS, U - RoW
Hidróxido de Sódio	sodium hydroxide, without water, in 50% solution state market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state   sodium hydroxide, without water, in 50% solution state   APOS, U - RoW
Sulfito de Sódio	sodium sulfide market for sodium sulfide   sodium sulfide   APOS, U - GLO
Ácido Sulfúrico	sulfuric acid market for sulfuric acid   sulfuric acid   APOS, U - RoW
Água pura	water, ultrapure market for water, ultrapure   water, ultrapure   APOS, U - RoW
Produto evitado estanho	tin market for tin   tin   APOS, U - GLO
Monossulfato de Zinco	zinc monosulfate market for zinc monosulfate   zinc monosulfate   APOS, U - RoW
Aterro	process-specific burdens, residual material landfill   process-specific burdens, residual material landfill   APOS, U - RoW

<b>Produto/Processo</b>	<b>Ligação com a Base Ecoinvent</b>
Ácido hidroclorídrico	hydrochloric acid, without water, in 30% solution state market for hydrochloric acid, without water, in 30% solution state   hydrochloric acid, without water, in 30% solution state   APOS, U - RoW
Dimetilacetamida	dimethylacetamide market for dimethylacetamide   dimethylacetamide   APOS, U - GLO
querosene	kerosene market for kerosene   kerosene   APOS, U - BR
Ácido Nítrico	nitric acid, without water, in 50% solution state market for nitric acid, without water, in 50% solution state   nitric acid, without water, in 50% solution state   APOS, U - RoW
Solvente organico	solvent, organic market for solvent, organic   solvent, organic   APOS, U - GLO
Água desoionizada	water, deionised market for water, deionised   water, deionised   APOS, U - RoW
Efluente	wastewater, average market for wastewater, average   wastewater, average   APOS, U - RoW

Fonte: Autor (2025)

Tabela S2 – Inventário de Ciclo de Vida para Transporte e pré-processamento

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
<b>Logística e Coleta</b>		
Transporte - Diesel	62,77	kg/t de RPCI
Transporte para o porto - distância	175,40	km
Transporte para a planta nacional - distância	113,90	km
Transporte para a Bélgica - distância	9678,00	km
<b>Pré-processamento</b>		
Desmontagem - Energia	0,48	MWh/t de RPCI
Estoque – Energia	0,57	MWh/t de RPCI
Separação mecânica – Energia (Pokhrel et al., 2020)	196,27	kWh/t de RPCI

Fonte: Autor (2025)

Tabela S3 – Inventário de Ciclo de Vida para a pirometalurgia

<b>Categoria</b>	<b>Item</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
<b>Resíduo tratado</b>	Placas de Circuito Impresso	1	kg
<b>Entradas</b>	Eletricidade	4,62E-02	kWh
	Óxido de Cálcio	3,75E-01	kg
<b>Emissões para o Ar</b>	Arsenic	3,29E-11	kg
	Cadmium	1,19E-09	kg
	Chlorine	2,51E-06	kg
	Copper	7,37E-08	kg
	Dioxin, 2,3,7,8 Tetrachlorodibenzo-p-	4,98E-11	kg
	Fluorine	2,02E-08	kg
	Lead	5,06E-07	kg
	Mercury	2,37E-09	kg
	Nitrogen oxides	6,87E-06	kg
	Particulates, < 2.5 um	1,52E-06	kg
	Particulates, > 10 um	5,05E-07	kg
	Particulates, > 2.5 um, and < 10um	1,01E-06	kg
	Sulfur dioxide	0,000146	kg
	Zinc	6,58E-08	kg
<b>Emissões para a Água</b>	Arsenic	3,79E-10	kg
	Cadmium	3,29E-11	kg
	Copper	1,32E-08	kg
	Lead	4,61E-09	kg
	Mercury	9,88E-11	kg
	Zinc	4,28E-09	kg
<b>Tratamento de resíduos</b>	Refino eletrolítico	3,67E-01	kg
	Lama residual	6,17E-01	kg

Fonte: Classen et al. (2009)

Tabela S4 – Inventário de Ciclo de Vida para a o tratamento de metais preciosos (pirometalurgia)

<b>Categoria</b>	<b>Item</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
<b>Tratamento de resíduos</b>	Tratamento de metais preciosos (anode slime)	1	kg
<b>Entrada</b>	Eletricidade (Suécia)	1,362505	kWh
	Calor (gás natural)	0,171053	MJ
	Oxigênio Líquido	0,052375	kg
<b>Emissões para o Ar</b>	Cadmium	7,41E-08	kg
	Chlorine	0,000157	kg
	Copper	1,11E-06	kg
	Dioxin, 2,3,7,8 Tetrachlorodibenzo-p-	3,11E-09	kg
	Fluorine	1,26E-06	kg
	Lead	3,07E-05	kg
	Mercury	1,48E-07	kg
	Nitrogen oxides	0,00043	kg
	Particulates, < 2.5 um	3,3E-05	kg
	Particulates, > 10 um	1,1E-05	kg
	Particulates, > 2.5 um, and < 10um	2,2E-05	kg
	Sulfur dioxide	0,000333	kg
	Zinc	4,11E-06	kg

Fonte: Classen et al. (2009)

Tabela S5 – Inventário de Ciclo de Vida para o refino eletrolítico (pirometalurgia)

<b>Categoria</b>	<b>Item</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
<b>Resíduo tratado</b>	Resíduo do processo Pirometalúrgico para tratamento por Refino eletrolítico	1	kg
<b>Entrada</b>	Eletricidade	0,20667	kWh
	Calor (gás natural)	0,024325	MJ
	Ácido Sulfúrico	0,02325	kg
	Água Desmineralizada	0,129166	kg
<b>Emissões para o Ar</b>	Arsenic	4,05E-08	kg
	Copper	6,95E-08	kg
	Lead	1,53E-07	kg
	Nickel	2,61E-08	kg
	Particulates, < 2.5 um	1,88E-06	kg
	Particulates, > 10 um	6,27E-07	kg
	Particulates, > 2.5 um, and < 10um	1,25E-06	kg
	Water/m3	1,94E-05	m3
<b>Emissões para a Água</b>	Arsenic	2,33E-08	kg
	Cadmium	2,06E-08	kg
	Copper	9,02E-07	kg
	Lead	4,87E-08	kg
	Mercury	2,61E-10	kg
	Nickel	8,31E-08	kg
	Water, SE	0,00011	m3
	Zinc	4,87E-08	kg
<b>Tratamento de resíduos</b>	Recuperação de metais preciosos	0,016567	kg

Fonte: Classen et al. (2009)

Tabela S6 – Inventário de Ciclo de Vida para a hidrometalurgia ácida

<b>Categoria</b>	<b>Item</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
<b>ENTRADAS</b>			
	WPCBs (Placas)	1,00	t
	Água de Processo	4,28	t
	Energia Elétrica	3511,57	MJ
	NaOH	0,28	t
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,12	t
	Na <sub>2</sub> S	0,02	t
	O <sub>3</sub>	0,03	t
	HNO <sub>3</sub>	0,75	t
	HCl	0,12	t
	Pó de Cobre	1,32	kg
	Cal (Lime)	0,13	t
<b>SAÍDAS</b>			
<b>Produtos Recuperados</b>			
	Cu (Cobre)	0,15	t
	Sn (Estanho)	0,05	t
	ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O (Sulfato de Zinco)	0,01	t
	NiSO <sub>4</sub> ·6H <sub>2</sub> O (Sulfato de Níquel)	0,09	t
	Produtos Não-metálicos	0,66	t
	Au (Ouro)	0,18	kg
	Ag (Prata)	0,41	kg
	Pd (Paládio)	0,18	kg
<b>Emissões e Resíduos</b>			
	O <sub>3</sub>	0,04	t
	H <sub>2</sub>	5,42	kg
	Vapor d'água	0,86	t
	Resíduo Sólido	0,30	t
	Água Residual	5,30	t
	HCl	5,14	kg
	NO	0,78	kg
	NO <sub>2</sub>	0,01	kg

Fonte: Nan et al. (2024)

Tabela S7 – Inventário de Ciclo de Vida para a hidrometalurgia básica

<b>Categoria</b>	<b>Item</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
<b>ENTRADAS</b>			
	WPCBs (Placas)	1,00	t
	Água de Processo	6,67	t
	Energia Elétrica	3726,81	MJ
	NaOH	0,17	t
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,34	t
	Na <sub>2</sub> S	0,02	t
	O <sub>3</sub>	0,09	t
	NH <sub>3</sub> ·H <sub>2</sub> O	0,30	t
	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,39	t
<b>SAÍDAS</b>			
<b>Produtos Recuperados</b>			
	Cu (Cobre)	0,15	t
	Sn (Estanho)	0,05	t
	ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O (Sulfato de Zinco)	0,01	t
	NiSO <sub>4</sub> ·6H <sub>2</sub> O (Sulfato de Níquel)	0,09	t
	Produtos Não-metálicos	0,66	t
	Au (Ouro)	0,18	kg
	Ag (Prata)	0,41	kg
	Pd (Paládio)	0,18	kg
<b>Emissões e Resíduos</b>			
	O <sub>3</sub>	0,04	t
	H <sub>2</sub>	9,46	kg
	Vapor d'água	0,38	t
	Resíduo Sólido	0,29	t
	Água Residual	7,34	t
	NH <sub>3</sub>	0,04	kg
	N <sub>2</sub>	0,01	kg

Fonte: Nan et al. (2024)

## **CAPÍTULO V: CONCLUSÕES**

O objetivo deste trabalho foi analisar a gestão de fim de vida de RPCI no Brasil, considerando diversos cenários e abordagens. A dissertação foi estruturada em três estudos complementares, cada um contribuindo para a compreensão e avanço do conhecimento sobre a gestão de resíduos eletrônicos no país.

O primeiro marco deste trabalho foi a realização de uma revisão sistemática da literatura, com foco no estado da arte do uso da ACV aplicada ao fim de vida de RPCI. Essa revisão revelou que os estudos relacionados a métodos de recuperação de metais em RPCI vêm crescendo significativamente, com destaque para os métodos hidrometalúrgicos. Contudo, ainda há lacunas importantes em áreas como biometalurgia, análises econômicas e sociais, bem como em aspectos relacionados à logística reversa, indicando que o campo da gestão de fim de vida de RPCI ainda oferece vastas oportunidades para futuras pesquisas. O primeiro artigo desta dissertação evidenciou esses esforços e destacou a contribuição de pesquisadores de diferentes regiões para tornar a recuperação de metais mais sustentável, apontando caminhos promissores para estudos futuros.

O segundo estudo abordou a previsão da geração de REEE em locais da América Latina. A partir desse estudo, foi possível identificar uma relação significativa entre a geração de REEE e indicadores socioeconômicos, como PIB per capita e IDH. Um modelo de regressão foi desenvolvido, permitindo prever a geração de REEE com base nesses indicadores. Os resultados evidenciaram que o nível de desenvolvimento social e econômico de uma região impacta diretamente a quantidade de resíduos gerados, destacando a importância de políticas públicas alinhadas às especificidades regionais para gerenciar de forma eficiente os REEE.

Por fim, o terceiro artigo tratou da análise de diferentes cenários para o fim de vida de RPCI, utilizando a ACV combinada com métodos de decisão multicritério. Os resultados indicaram que a instalação de uma planta de reciclagem de REEE no Brasil seria uma alternativa ambientalmente e economicamente vantajosa. O estudo mostrou que a recuperação de metais preciosos, como ouro e paládio, pode reduzir significativamente os impactos ambientais ao evitar a extração de matérias-primas virgens. Além disso, o estudo reforçou que a internalização do processamento no Brasil pode minimizar os impactos associados ao transporte internacional, promovendo uma economia circular mais eficiente.

Como desdobramento deste trabalho, diversas possibilidades de estudos futuros se apresentam para o avanço da gestão sustentável de placas de circuito impresso no Brasil. Destaca-se, inicialmente, a necessidade de aprofundar a avaliação de diferentes rotas tecnológicas de reciclagem, incluindo métodos inovadores como a biometalurgia e o uso de

solventes verdes, além da realização de análises comparativas de ciclo de vida entre alternativas já estabelecidas, como os processos hidrometalúrgicos, pirometalúrgicos e híbridos. Outra vertente relevante diz respeito à integração de dimensões econômicas e sociais de maneira quantitativa, utilizando modelos que incorporem custos, geração de empregos e impactos nas comunidades locais, bem como a aplicação de Avaliação Social do Ciclo de Vida (S-ACV).

Adicionalmente, futuros trabalhos podem explorar o uso de técnicas avançadas de modelagem preditiva, tais como inteligência artificial e análise de séries temporais, para prever a geração de resíduos eletrônicos em diferentes escalas geográficas. Estudos sobre a otimização da logística reversa, a aplicação de tecnologias digitais como IoT e blockchain para rastreabilidade, e o desenvolvimento de modelos dinâmicos de ACV que incorporem incertezas e variações temporais, também se mostram promissores. Por fim, a análise da viabilidade industrial de plantas-piloto, a avaliação de instrumentos de políticas públicas e a realização de estudos comparativos internacionais podem contribuir significativamente para o fortalecimento do setor de reciclagem nacional e para a promoção da economia circular no país.

No conjunto, este estudo contribui para ampliar o entendimento sobre a gestão de resíduos de RPCI, fornecendo subsídios para a tomada de decisão em políticas públicas e iniciativas empresariais. Ao integrar análises baseadas em ACV, previsões de geração de REEE e avaliação de cenários de gestão, o trabalho demonstra a relevância de abordagens interdisciplinares para enfrentar os desafios da gestão sustentável de resíduos eletrônicos no Brasil e em países emergentes. Os resultados ressaltam a importância de fomentar iniciativas de reciclagem nacional e de investir em tecnologias inovadoras, destacando o potencial de transformação ambiental, econômica e social desse setor.