

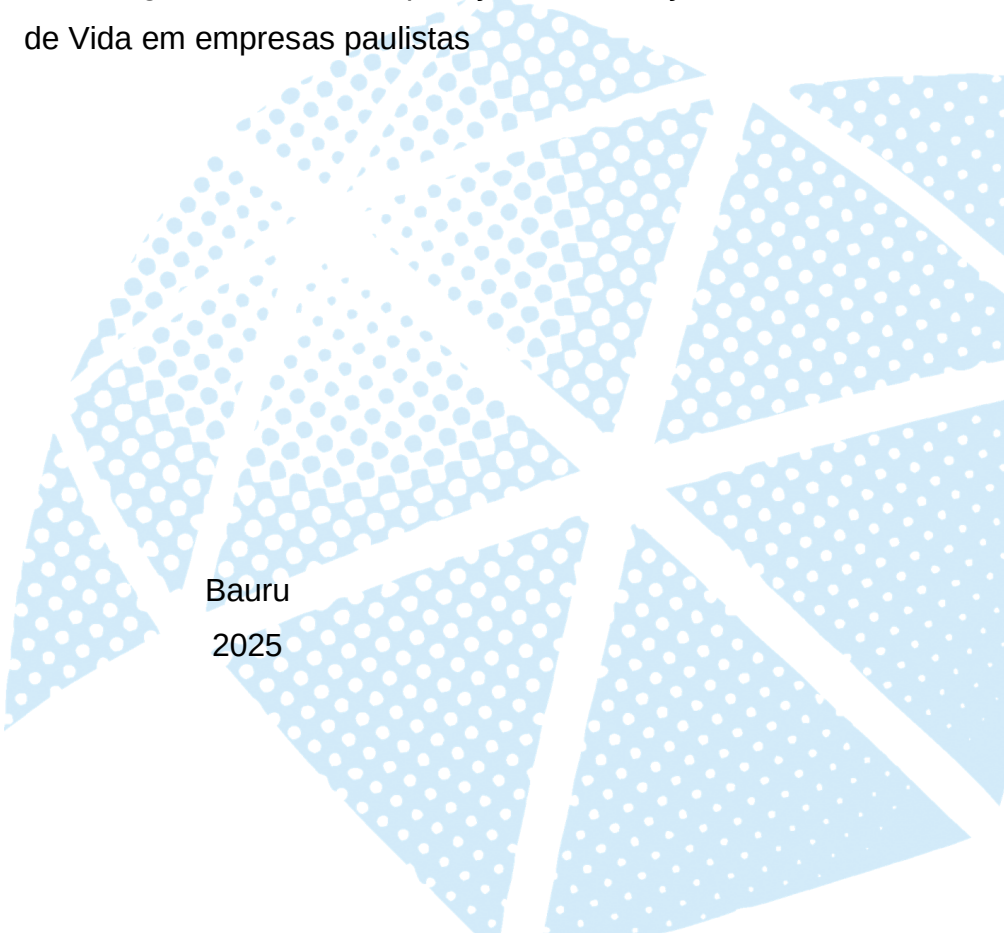
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
Faculdade de Engenharia - Bauru

VERIDIANA SOUZA DA SILVA ALVES

GESTÃO DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS:

Análise dos entraves técnicos e organizacionais da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida em empresas paulistas

Bauru
2025



VERIDIANA SOUZA DA SILVA ALVES

**GESTÃO DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS: análise dos entraves
técnicos e organizacionais da aplicação da avaliação do ciclo de vida em
empresas paulistas**

Dissertação apresentada à
Faculdade de Engenharia de
Bauru – Unesp como parte dos
requisitos para obtenção do título
de mestre em Engenharia de
Produção.

Orientador: Prof. Dr. Carlos do Amaral Razzino
Coorientadora: Prof^ª. Dr^ª. Vívian Karina Bianchini

Bauru
2025

A474g

Alves, Veridiana Souza da Silva

GESTÃO DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS: : análise dos entraves técnicos e organizacionais da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida em empresas paulistas / Veridiana Souza da Silva Alves. -- Bauru, 2026
63 f.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Engenharia, Bauru

Orientador: Carlos do Amaral Razzino

Coorientadora: Vívian Karina Bianchini

1. Avaliação do Ciclo de Vida. 2. Gestão de Resíduos. 3. Reciclagem de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos. 4. Logística Reversa. 5. Economia Circular. I. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE VERIDIANA SOUZA DA SILVA ALVES, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 03 dias do mês de outubro do ano de 2025, às 16h, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de VERIDIANA SOUZA DA SILVA ALVES, intitulada **GESTÃO SUSTENTÁVEL DE REEE: UMA ANÁLISE DE EMPRESAS NACIONAIS**, sob orientação do Prof. Dr. Carlos do Amaral Razzino. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. CARLOS DO AMARAL RAZZINO (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Produção / Unesp - Faculdade de Engenharia - Câmpus de Bauru, Profa. Dra. FABIANE LETÍCIA LIZARELLI (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Produção / Universidade Federal de São Carlos - UFSCAR - São Carlos/SP, Prof. Dr. IRINEU DE BRITO JUNIOR (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Ambiental / Instituto de Ciência e Tecnologia do Câmpus de São José dos Campos/UNESP. Após a exposição pela mestranda e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final: APROVADA. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo (a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.



Documento assinado digitalmente

CARLOS DO AMARAL RAZZINO

Data: 10/10/2025 17:47:31-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. CARLOS DO AMARAL RAZZINO

PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

A COMISSÃO EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DO ALUNA:
VERIDIANA SOUZA DA SILVA ALVES DE: "GESTÃO SUSTENTÁVEL DE REEE: UMA ANÁLISE DE EMPRESAS NACIONAIS"

PARA:

GESTÃO DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS: ANÁLISE DOS ENTRAVES TÉCNICOS E ORGANIZACIONAIS DA APLICAÇÃO DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA EM EMPRESAS PAULISTAS

Bauru, 10 de outubro de 2025.

Documento assinado digitalmente
 **CARLOS DO AMARAL RAZZINO**
Data: 10/10/2025 17:47:31-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Carlos do Amaral Razzino
Orientador

DEDICATÓRIA

Dedico esta pesquisa a todos aqueles que me acompanharam nesses dois anos e meio, torcendo por mim e me envolvendo em amor durante todas as etapas do meu mestrado, e em especial, dedico este estudo aos meus dois avôs, Antônio José de Souza e Benedito Rosário da Silva, que me impulsionaram até o último suspiro.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conduzir a esta jornada acadêmica em um momento inesperado da minha vida. Ao meu marido, Silas, e à minha filha, Laura, por renunciarem a momentos em família para compartilharem comigo esta caminhada, mesmo que a pesquisa seja minha, os desafios sempre foram nossos. Aos meus pais, Deise e Dalton, e aos meus avós, Souza e Suely, por acreditarem em mim desde o início e por me guiarem até a engenharia, um caminho que me levou à FEB-Bauru.

À minha melhor amiga, Hellen, por me incentivar a respirar além da pesquisa, e aos meus primos, Carol e Gabriel, por seu apoio incondicional. Aos amigos da FEB-Bauru, que tornaram essa jornada ainda mais enriquecedora e inesquecível.

Aos pesquisadores que se tornaram minha família acadêmica, por me ensinarem, acreditarem no meu potencial e me impulsionarem a crescer. Aos meus orientadores, Professora Dra. Vívian, Prof. Dr. Carlos Razzino e Professora Dra. Bárbara, por sua paciência, orientação e incentivo, sempre me desafiando a ir além.

Por fim, agradeço a todos que, mesmo sem compreender totalmente minha jornada, estiveram ao meu lado com orações, apoio e celebração das pequenas vitórias ao longo do caminho.

“O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES)”

Resumo

O crescimento acelerado da geração de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE), impulsionado pela rápida obsolescência tecnológica e pelo aumento do consumo, tem intensificado os desafios ambientais, econômicos e organizacionais associados à sua gestão. Embora a Economia Circular (EC) e a Logística Reversa (LR) sejam amplamente reconhecidas como estratégias centrais para o enfrentamento desse problema, a incorporação sistemática de ferramentas analíticas, como a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), ainda é limitada no contexto das empresas recicladoras brasileiras. Nesse sentido, esta pesquisa teve como objetivo analisar a gestão de REEE em empresas recicladoras do estado de São Paulo, identificando os entraves técnicos e organizacionais para a aplicação da ACV e avaliando seu uso atual ou potencial como instrumento de apoio à tomada de decisão. Metodologicamente, o estudo adotou uma abordagem qualitativa, estruturada como um estudo de casos múltiplos em três empresas recicladoras, combinando revisão sistemática da literatura, análise documental, observação direta e entrevistas semiestruturadas com gestores e técnicos. Os resultados evidenciaram elevada heterogeneidade estrutural, tecnológica e organizacional entre as empresas analisadas, refletindo diferentes níveis de maturidade operacional, integração com a logística reversa e capacidade de geração e uso de informações ambientais. Verificou-se que a aplicação da ACV é condicionada por fatores como disponibilidade de dados, capacitação técnica, infraestrutura tecnológica, pressão de mercado e exigências regulatórias, sendo, em muitos casos, percebida mais como uma ferramenta externa de conformidade do que como um instrumento de gestão interna. A análise das Cinco Forças de Porter indicou que a dinâmica competitiva do setor, marcada pela informalidade, pela dependência de fornecedores e pela pressão por preços, exerce influência direta sobre a adoção de práticas de sustentabilidade e de ACV. Conclui-se que a integração entre ACV, EC e LR apresenta potencial significativo para o fortalecimento da gestão sustentável de REEE, desde que adaptada às condições operacionais reais das recicladoras, especialmente de pequeno e médio porte, e articulada com políticas públicas e instrumentos de apoio à capacitação e à governança do setor.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida (ACV); Gestão de Resíduos; Reciclagem de REEE; Logística Reversa; Economia Circular.

Abstract

The rapid growth in the generation of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE), driven by accelerated technological obsolescence and increasing consumption, has intensified the environmental, economic, and organizational challenges associated with its management. Although Circular Economy (CE) and Reverse Logistics (RL) are widely recognized as key strategies to address this issue, the systematic incorporation of analytical tools such as Life Cycle Assessment (LCA) remains limited in the context of Brazilian recycling companies.

In this context, this study aims to analyse WEEE management in recycling companies in the state of São Paulo, identifying the technical and organizational barriers to the application of LCA and evaluating its current or potential use as a decision-support tool. Methodologically, a qualitative approach was adopted, based on a multiple case study conducted in three recycling companies, combining a systematic literature review, document analysis, direct observation, and semi-structured interviews with managers and technical staff.

The results revealed a high level of structural, technological, and organizational heterogeneity among the analysed companies, reflecting different levels of operational maturity, integration with reverse logistics systems, and capacity to generate and use environmental information. It was found that the application of LCA is influenced by factors such as data availability, technical expertise, technological infrastructure, market pressures, and regulatory requirements. In many cases, LCA is perceived more as an external compliance tool than as an instrument for internal management.

The analysis based on Porter's Five Forces indicated that the competitive dynamics of the sector—characterized by informality, dependence on suppliers, and price pressure—directly influence the adoption of sustainability practices and LCA. It is concluded that the integration of LCA, CE, and RL has significant potential to strengthen sustainable WEEE management, provided that it is adapted to the actual operating conditions of recycling companies, particularly small and medium-sized enterprises, and aligned with public policies and capacity-building and governance mechanisms.

Keywords: Life Cycle Assessment (LCA); WEEE Management; WEEE Recycling; Reverse Logistics; Circular Economy

Impacto Potencial da Pesquisa

PORTARIA UNESP Nº 117, DE 21 DE DEZEMBRO DE 2022. INSTRUÇÃO AT/PROPG Nº 02, DE 22 DE DEZEMBRO DE 2022.

Os resultados desta dissertação contribuem para o setor de gestão de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE) ao identificar os entraves operacionais, organizacionais e tecnológicos que condicionam a adoção da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) em recicladoras brasileiras de diferentes portes. A pesquisa oferece subsídios práticos para gestores e formuladores de políticas públicas, propondo caminhos graduais e contextualizados para a incorporação da lógica de ciclo de vida, conforme o porte e a maturidade organizacional de cada empresa. Espera-se, ainda, que o fluxograma analítico desenvolvido e a integração entre ACV, Economia Circular e Logística Reversa sirvam de referência metodológica para estudos futuros e para o fortalecimento da governança do setor de reciclagem eletroeletrônica no Brasil.

Potential Impact of the Research

The findings of this dissertation contribute to the field of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) management by identifying the operational, organizational, and technological barriers that condition the adoption of Life Cycle Assessment (LCA) in Brazilian recycling companies of different sizes. The research provides practical inputs for managers and policymakers, proposing gradual and context-sensitive pathways for incorporating life-cycle thinking according to each company's size and organizational maturity. It is also expected that the analytical flowchart developed and the integration of LCA, Circular Economy, and Reverse Logistics will serve as a methodological reference for future studies and for strengthening governance in Brazil's e-waste recycling sector.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura da Pesquisa.....	18
Figura 2: Projeções na geração de REEE entre 2014 e 2030.....	25
Figura 3: Estatísticas globais do mercado de EEE e seus resíduos.....	26
Figura 4: Gráfico comparativo das metas de REEE em relação aos totais reciclados de 2019 até 2025.....	28
Figura 5: Protocolo Prisma.....	31
Figura 6: Condução do Estudo Múltiplo de casos desenvolvido.....	50
Figura 7: Tipos de resíduos obtidos por mês através do tratamento dos REEE pela empresa B em 2023	55
Figura 8: Operações de separação de REEE e tratamento de cabos e fios na empresa A.....	58
Figura 9: Processo de separação e triagem inicial realizados pela empresa B.	60
Figura 10: Fluxograma representativo das matérias primas obtidas após o tratamento dos REEE pela empresa B.	61
Figura 11: Fluxograma representativo das etapas de separação e triagem da empresa C.....	62
Figura 12: Síntese da análise das empresas A, B e C segundo as 5 forças competitivas de Porter	73

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Uniformização dos termos relacionados a REEE.....	19
Quadro 2: Integração conceitual entre ACV, EC e LR no contexto dos REEE	22
Quadro 3: Relação dos critérios de inclusão e exclusão aplicados na análise da pesquisa.....	30
Quadro 4: Relação das informações centrais levantadas na categorização em relação aos autores dos trabalhos elencados na RSL.	32
Quadro 5: relação entre as contribuições centrais e as limitações das categorizações realizadas.....	34
Quadro 6: Relação das áreas analíticas observadas nos artigos aprovados após a triagem.	35
Quadro 7: Apresentação do embasamento teórico para análise das 5 forças de Porter em recicladoras de REEE.....	41
Quadro 8: Desafios operacionais à aplicação da ACV no contexto da reciclagem de REEE.....	44
Quadro 9: Desafios organizacionais à aplicação da ACV no contexto da reciclagem de REEE	45
Quadro 10: Desafios tecnológicos à aplicação da ACV no contexto da reciclagem de REEE	46
Quadro 11: Classificação das pesquisas científicas quanto aos seus objetivos.	47
Quadro 12: Justificativa e relevância das questões de elegibilidade das empresas elencadas a participarem do estudo	51
Quadro 13: Comparação do perfil das empresas A, B e C.	54
Quadro 14: Comparativo entre a geração e caracterização de resíduos pelas empresas A, B e C.	57
Quadro 15: Equipamentos de tratamento de REEE presentes na empresa B	64
Quadro 16: Comparativo das ações ligadas ao Fluxo Externo das empresas A, B e C	65
Quadro 17: Comparativo das ações ligadas ao Fluxo Interno das empresas A, B e C.....	67
Quadro 18: Comparativo das ações ligadas a Pessoas, Papéis e Treinamento das empresas A, B e C	68

Quadro 19: Comparativo das práticas relacionadas a Documentação e Conformidade das empresas A, B e C	69
Quadro 20: Comparativo das ações ligadas aos Custos e Receitas das empresas A, B e C	70
Quadro 21: Comparativo das ações ligadas às Parcerias e Economia Circular das empresas A, B e C	71
Quadro 22: Comparativo das empresas quanto aos planos e próximos passos das empresas A, B e C.	80
Quadro 23: Comparação crítica entre as empresas A, B e C quanto à aplicação e a percepção da realização de uma ACV	83
Quadro 24: Relação dos fatores que influenciam a realização de uma ACV com o posicionamento das empresas A, B e C.	86

SUMÁRIO

1. Introdução	12
1.2. Objetivos	15
1.2.1. Objetivo Geral	15
1.2.2. Objetivos Específicos	15
1.3. Justificativa	15
1.4. Estrutura da Pesquisa	17
2. Referencial teórico	19
2.1. Resíduo de Equipamento Elétrico e Eletrônico	19
2.2. Reciclagem de REEE	20
2.3. Princípios inerentes à ACV e a gestão de Resíduos	21
2.4. Marcos regulatórios e políticas públicas como base estruturante da gestão de REEE	24
2.5. Revisão Sistemática de Literatura	29
3. Método de pesquisa	47
3.1. Classificação da Pesquisa	48
3.2. Condução do Estudo Múltiplo de Casos	48
3.3. Método de análise dos resultados	52
4. Resultados	54
4.1. Perfil das empresas	54
4.2. Geração e caracterização de resíduos	54
4.3. Práticas de separação e triagem	58
4.4. Infraestrutura e tecnologia	63
4.5. Fluxo interno e logística externa	65
4.6. Pessoas, papéis e treinamento	67
4.7. Conformidade e documentação	68
4.8. Custos, receitas e contratos	69
4.9. Parcerias e economia circular	70
4.10. Barreiras e Soluções	71
4.11. Planos e próximos passos	80
4.12. Uso (ou não) de Ferramentas de ACV	81
5. Discussão	89
5.1. Discussão orientada pelos objetivos específicos	89

5.1.1.	Estrutura operacional, organizacional e tecnológica das recicladoras analisadas	89
5.1.2.	Entraves técnicos e gerenciais à adoção da Avaliação do Ciclo de Vida e de práticas de economia circular.....	91
5.1.3.	Uso atual e potencial da ACV nas empresas investigadas	93
5.1.4.	Implicações dos resultados para a formulação de diretrizes práticas baseadas na ACV	94
5.2.	Discussão orientada por dimensão analítica	95
5.2.1.	Dimensão operacional	95
5.2.2.	Dimensão organizacional.....	96
5.2.3.	Dimensão tecnológica	97
6.	Conclusão	100
6.1.	Contribuições para a área.....	101
6.2.	Limitações do estudo.....	102
6.3.	Recomendações práticas	102
6.4.	Recomendações de pesquisas futuras.....	104
Apêndice 1: Detalhamento da relação dos resultados da RSL quanto aos 12 focos analíticos encontrados		106
Apêndice 2: Detalhamento da conexão dos estudos elencados em relação ao proposto neste estudo		108
Apêndice 3: Instrumento de coleta de dados		112
Referências bibliográficas		114

1. Introdução

A globalização, marcada pela intensificação das trocas econômicas e tecnológicas e pela crescente interconectividade entre países, trouxe ganhos sociais expressivos, mas também ampliou de forma significativa a geração de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE), impulsionada pela rápida inovação tecnológica e pela obsolescência acelerada dos produtos. Esses resíduos contêm substâncias tóxicas e metais pesados capazes de contaminar solos e corpos d'água, representando riscos relevantes à saúde humana e ao meio ambiente. No Brasil, esse cenário é agravado por baixas taxas de reciclagem e por uma infraestrutura de tratamento ainda desigual e fragmentada, o que limita a efetividade da gestão desses resíduos (Walter, Bayrhammer e Nadoda, 2024). Estima-se que, globalmente, mais de 54 milhões de toneladas de REEE sejam geradas anualmente, com projeções que indicam a duplicação desse volume até 2050 (Adrian *et al.*, 2020).

A rápida obsolescência dos dispositivos eletrônicos e a intensificação do consumo transformaram o descarte inadequado de REEE em um desafio ambiental de escala global. Esse fenômeno afeta múltiplas dimensões do desenvolvimento sustentável, ao relacionar os REEE a pelo menos seis Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), incluindo a proteção ambiental (ODS 6, 11, 12 e 14), a promoção da saúde (ODS 3) e o estímulo ao trabalho decente e ao crescimento econômico (ODS 8) (Baldé *et al.*, 2017). De forma complementar, estudos indicam que as práticas de descarte e tratamento de REEE exercem impactos diretos sobre os ODS 14 e 15, associados à preservação da vida aquática e terrestre, reforçando a necessidade de abordagens integradas entre legislação, políticas públicas e gestão de resíduos, tanto em países desenvolvidos quanto em economias emergentes, como Brasil e Gana (Lopes Dos Santos e Jacobi, 2022).

Embora a reciclagem e o tratamento de resíduos gerados pela atividade humana sejam atualmente regulamentados, sua consolidação como prática sustentável ainda demanda avanços institucionais, políticos e tecnológicos que promovam a integração efetiva entre os diferentes atores envolvidos nas etapas de consumo, descarte e gestão de equipamentos elétricos e eletrônicos. Até meados da década de 1990, a reciclagem ocorria majoritariamente de forma não

regulamentada, caracterizada por baixa previsibilidade e pela desvalorização econômica de diversos materiais, frequentemente destinados ao descarte inadequado (Ferreira, 2024).

Nesse contexto, este estudo se estrutura a partir de dois referenciais teóricos complementares: a Economia Circular (EC) e a Logística Reversa (LR), que explicam o fenômeno da gestão sustentável dos REEE, e a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), adotada como instrumento analítico para compreender e mensurar seus impactos ambientais e operacionais. A EC propõe a manutenção dos recursos em uso pelo maior tempo possível, por meio da reutilização, reciclagem e recuperação de materiais, reduzindo a geração de resíduos. A LR, por sua vez, refere-se ao conjunto de processos responsáveis pelo retorno de produtos e materiais ao ciclo produtivo, viabilizando o fechamento de fluxos e a recuperação de valor. No estado de São Paulo, esses conceitos assumem especial relevância, uma vez que o território concentra parcela expressiva das operações formais de reciclagem do país, reunindo empresas de diferentes portes e níveis de maturidade tecnológica (ABREMA, 2024), o que possibilita a observação de realidades contrastantes em termos de infraestrutura, gestão e adoção de instrumentos de sustentabilidade.

A transposição desses conceitos para o contexto empresarial revela um conjunto de entraves técnicos e organizacionais, associados a limitações estruturais, déficits de capacitação, desafios tecnológicos e à baixa integração entre setores produtivos e políticas públicas. Essas barreiras dificultam a articulação entre as dimensões ambiental, econômica e operacional da gestão de resíduos e restringem, em especial, a aplicação sistemática de ferramentas analíticas como a ACV, no contexto das recicladoras brasileiras.

Essa avaliação destaca-se como ferramenta capaz de analisar de forma integrada os fluxos de entrada e saída ao longo do ciclo de vida dos produtos e resíduos, permitindo a identificação de impactos ambientais, gargalos operacionais e oportunidades de melhoria. A aplicação da ACV no contexto das recicladoras paulistas oferece, portanto, potencial significativo para apoiar decisões empresariais e estratégias de gestão mais sustentáveis. Apesar desse potencial, a literatura indica que a ACV ainda é pouco explorada na prática das recicladoras brasileiras, o que limita sua incorporação como instrumento de apoio à gestão e ao planejamento operacional.

Embora estudos nacionais e internacionais reconheçam amplamente a relevância da ACV na gestão de REEE (Ottoni, Dias e Xavier, 2020; Sakhre *et al.*, 2024), observa-se uma escassez de pesquisas empíricas que investiguem, de forma sistemática, os entraves técnicos e organizacionais que dificultam sua aplicação prática no contexto real das empresas recicladoras. No estado de São Paulo, onde coexistem organizações de diferentes portes e níveis de maturidade tecnológica, essa lacuna torna-se particularmente evidente, revelando o distanciamento entre o avanço conceitual da literatura e a consolidação operacional da ACV no setor.

Diante desse cenário, é possível evidenciar uma lacuna teórica ainda não plenamente explorada: apesar do reconhecimento conceitual da importância da ACV para a gestão de REEE, permanecem limitadas as investigações empíricas voltadas à identificação, no interior das operações reais de recicladoras brasileiras, dos fatores técnicos e organizacionais que condicionam ou impedem sua adoção, especialmente em empresas de pequeno e médio porte, que constituem a base predominante da atividade de reciclagem no estado de São Paulo. Assim, esta pesquisa parte do entendimento de que a análise desses entraves contribui para aproximar teoria e prática, articulando os fundamentos da EC, LR e ACV, com vistas à consolidação de práticas mais sustentáveis no setor de reciclagem de REEE.

1.1. Problema de pesquisa

Apesar dos avanços regulatórios e do crescente debate sobre EC no Brasil, a aplicação prática da ACV em recicladoras de REEE permanece limitada. Essa lacuna impede a mensuração sistemática dos impactos ambientais e a geração de diretrizes para apoiar decisões empresariais e políticas públicas. Assim, ainda não está claro quais fatores técnicos e organizacionais dificultam a incorporação da ACV no contexto real das empresas brasileiras de reciclagem, especialmente aquelas de pequeno e médio porte, que compõem a base operacional da cadeia em São Paulo. Com base nisso, este estudo busca responder à seguinte pergunta de pesquisa: *Quais são os entraves técnicos e organizacionais para a aplicação da ACV em recicladoras de REEE no estado*

de São Paulo e como essa ferramenta pode ser adaptada para apoiar práticas empresariais e políticas públicas?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

Analisar a gestão de resíduos eletroeletrônicos em empresas recicladoras do estado de São Paulo, identificando os entraves técnicos e organizacionais para a aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e propondo diretrizes para sua implementação prática no setor.

1.2.2. Objetivos Específicos

- a) Mapear a estrutura operacional, tecnológica e organizacional de recicladoras paulistas de REEE participantes do estudo de casos múltiplos.
- b) Identificar entraves técnicos e gerenciais que influenciam a adoção da ACV e de práticas de economia circular.
- c) Analisar o uso atual (ou potencial) de ferramentas de ACV nas empresas investigadas.
- d) Propor diretrizes práticas fundamentadas na ACV aplicáveis ao contexto paulista.

1.3. Justificativa

A ACV constitui um instrumento amplamente reconhecido na literatura como essencial para compreender os impactos ambientais associados à produção, uso e descarte de REEE, permitindo identificar pontos críticos e orientar decisões de mitigação (Mendes Campolina *et al.*, 2017). No contexto brasileiro, especialmente no estado de São Paulo, onde coexistem empresas de diferentes portes e níveis de maturidade tecnológica, a aplicação da ACV torna-se ainda mais relevante ao oferecer subsídios para práticas de gestão alinhadas aos princípios da EC e da LR.

Os REEE contêm metais valiosos e recursos naturais escassos, cuja recuperação pode gerar benefícios econômicos e reduzir pressões sobre a

extração primária. A compreensão dos fluxos desses materiais ao longo do ciclo de vida contribui para avaliar cenários de reaproveitamento e fortalecer estratégias de MU (Ottoni, Dias e Xavier, 2020; Giese, Lins e Xavier, 2021). Além disso, a presença de substâncias tóxicas e componentes perigosos reforça a necessidade de abordagens sistemáticas de análise, capazes de subsidiar medidas de segurança e proteção à saúde de trabalhadores, comunidades e consumidores (Zhu *et al.*, 2022a).

Apesar desse potencial, a literatura evidencia que a implementação prática da ACV ainda enfrenta desafios significativos em países em desenvolvimento. Nas recicladoras brasileiras, entraves técnicos, estruturais e organizacionais limitam sua adoção, dificultando a geração de indicadores ambientais robustos, a rastreabilidade dos materiais e a integração entre etapas do processo produtivo e fluxos logísticos. Embora essas limitações sejam amplamente reconhecidas em nível conceitual, investigar como esses entraves se manifestam no ambiente real das empresas constitui uma lacuna científica ainda pouco explorada. (Ottoni, Dias e Xavier, 2020).

Nesse cenário, compreender os fatores que dificultam a aplicação da ACV é fundamental para aprimorar a gestão de REEE, apoiar políticas públicas e fortalecer práticas de economia circular. A análise ganha relevância adicional diante do aumento expressivo do volume de resíduos eletrônicos no país, o que demanda respostas mais estruturadas, baseadas em evidências empíricas e alinhadas a modelos sustentáveis de tratamento (Pan, Wong e Li, 2022; Mosora *et al.*, 2023).

Portanto, esta pesquisa justifica-se por sua contribuição teórica, empírica e prática: do ponto de vista teórico, ao articular de forma integrada os fundamentos da EC, da LR e da ACV no contexto da gestão de REEE; sob a perspectiva empírica, ao investigar, a partir de operações reais de recicladoras paulistas, os entraves técnicos e organizacionais que condicionam a aplicação da ACV, especialmente em empresas de pequeno e médio porte; e do ponto de vista prático, ao fornecer subsídios para o aprimoramento de processos internos, para o desenvolvimento de indicadores aplicáveis à realidade brasileira e para o fortalecimento das políticas de gestão de resíduos eletrônicos, promovendo avanços rumo a um setor mais eficiente, transparente e sustentável.

1.4. Estrutura da Pesquisa

A presente dissertação está estruturada em seis capítulos, organizados de forma a assegurar a progressão lógica entre fundamentação teórica, procedimentos metodológicos, análise empírica e discussão dos resultados.

O Capítulo 1 apresenta a contextualização do problema de pesquisa, abordando o crescimento da geração de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos e os desafios associados à sua gestão. Neste capítulo, são delineados os referenciais teóricos centrais do estudo, os objetivos da pesquisa, sua justificativa e a questão investigativa que orienta o trabalho.

O Capítulo 2 reúne os principais conceitos e abordagens que sustentam a análise desenvolvida, contemplando: (i) a caracterização dos resíduos eletroeletrônicos; (ii) os métodos de reciclagem de REEE; (iii) os princípios da Avaliação do Ciclo de Vida aplicados à gestão de resíduos; (iv) os marcos regulatórios e as políticas públicas relacionadas à gestão de REEE; e (v) a Revisão Sistemática de Literatura, conduzida segundo o protocolo PRISMA 2020, que fundamenta a construção das categorias analíticas do estudo.

O Capítulo 3 descreve os procedimentos metodológicos adotados, incluindo a classificação da pesquisa, a justificativa para a escolha do estudo de casos múltiplos, os critérios de seleção das empresas analisadas, os instrumentos de coleta de dados e o método de análise dos resultados.

O Capítulo 4 apresenta os achados empíricos obtidos a partir da investigação nas empresas A, B e C, organizados segundo doze focos analíticos previamente definidos com base na literatura. Esse capítulo descreve as características operacionais, organizacionais e tecnológicas das empresas, bem como suas práticas, barreiras e iniciativas relacionadas à gestão de REEE e ao uso (ou não) da ACV.

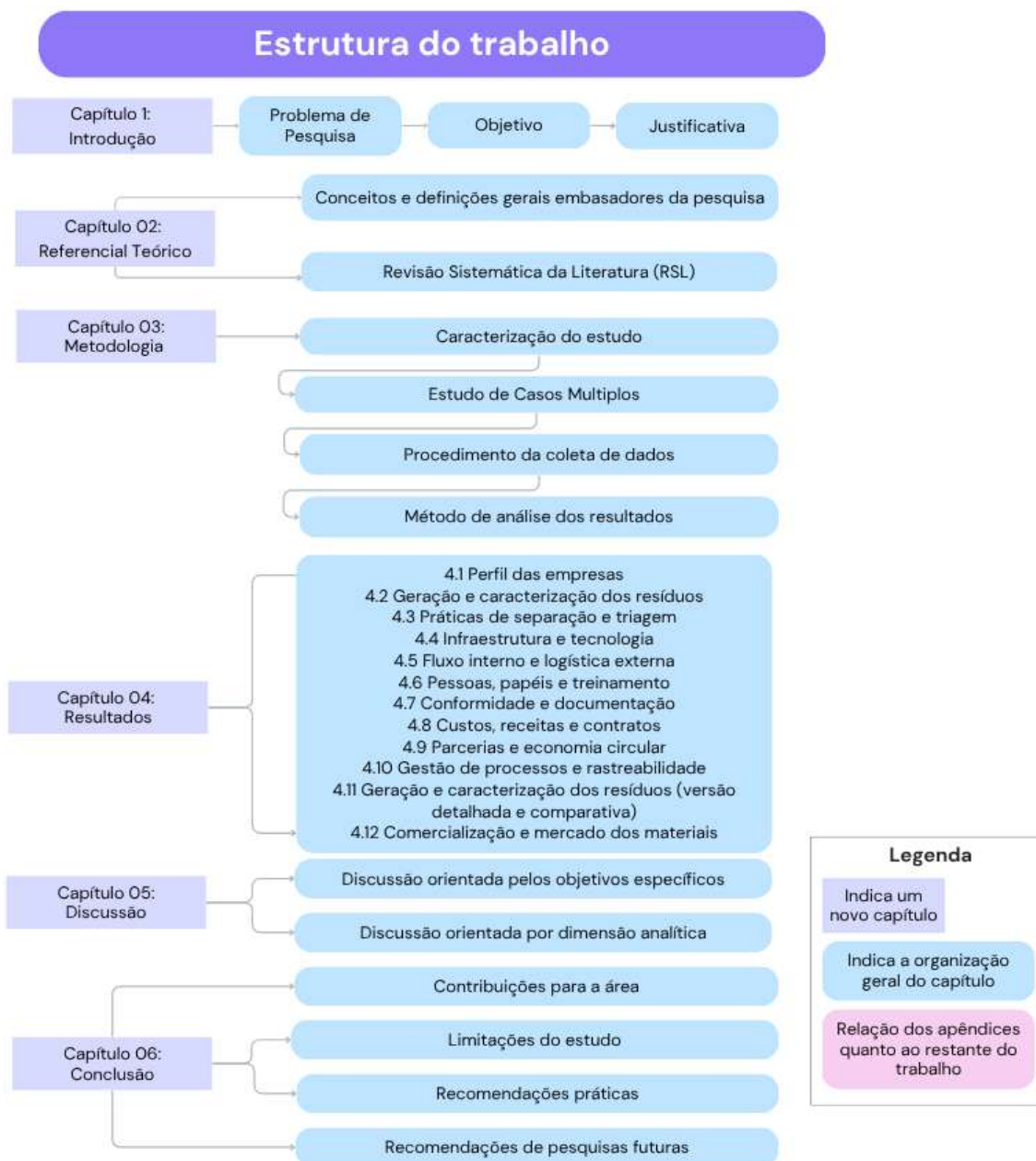
O Capítulo 5 analisa criticamente os resultados à luz dos objetivos específicos da pesquisa e das dimensões analíticas estabelecidas, articulando os achados empíricos com o referencial teórico e evidenciando convergências, divergências e contribuições do estudo para a literatura e para a prática empresarial.

Por fim, o Capítulo 6 sintetiza os principais resultados da pesquisa, apresenta suas contribuições teóricas, empíricas e práticas, discute as

limitações do estudo e propõe recomendações para a aplicação da ACV no contexto das recicladoras de REEE, bem como direções para pesquisas futuras.

A Figura 1 apresenta, de forma esquemática, a estrutura geral da pesquisa, sintetizando a organização e o encadeamento dos capítulos.

Figura 1: Estrutura da Pesquisa



Fonte: Autora (2026)

2. Referencial teórico

2.1. Resíduo de Equipamento Elétrico e Eletrônico

O termo genérico REEE refere-se a diversos equipamentos eletroeletrônicos que perdem seu valor para seus proprietários, seja por questões ligadas à inutilidade do item ou devido a alguma quebra ou falha em seu sistema (Smith, 2015). Diferentemente do resíduo, o lixo eletrônico é o equipamento elétrico e eletrônico (EEE) que perde seu valor ao ser descartado de maneira indevida, sem intenção de reaproveitamento (Kawamoto, 2022). Esses resíduos são compostos por diferentes materiais, como plásticos, metais, vidros, circuitos eletrônicos e baterias. Os metais, como cobre, alumínio e ferro, são amplamente utilizados devido às suas propriedades condutoras, enquanto os circuitos e baterias contêm substâncias potencialmente tóxicas, como mercúrio, chumbo e cádmio, que podem causar impactos ambientais e à saúde humana quando descartados de forma inadequada (Wäger e Hischier, 2015; Turner, 2018; Korf *et al.*, 2019)

Essas características físicas e químicas reforçam a necessidade de compreender não apenas o resíduo em si, mas também as etapas de destinação e tratamento, que determinam os riscos e oportunidades associados aos REEE. Contudo, esse termo pode ser facilmente confundido com termos relacionados a ele, como apresenta o Quadro 1.

Quadro 1: Uniformização dos termos relacionados a REEE.

Termo	Definição adotada na dissertação	Diferenças relevantes	Principais referências
Equipamento Elétrico e Eletrônico (EEE)	Produto que funciona por corrente elétrica ou campos eletromagnéticos, ainda em uso ou com potencial de uso.	Não é resíduo; refere-se ao equipamento enquanto bem de consumo.	Wäger e Hischier, 2015; Kawamoto, 2022
Resíduo de Equipamento Elétrico e Eletrônico (REE)	Equipamento elétrico e eletrônico que perdeu seu valor para o proprietário por inutilidade, falha, quebra ou obsolescência, tornando-se resíduo.	É o termo técnico central. Refere-se ao EEE após descarte, independentemente da forma de coleta.	Smith, 2015; Turner, 2018; Korf <i>et al.</i> , 2019
Lixo eletrônico	EEE descartado de forma inadequada, sem intenção de reaproveitamento ou sem destinação ambientalmente adequada.	Mais restrito que REEE. Só existe quando há descarte irregular. Não será usado como termo técnico principal, apenas quando citado pela literatura.	Kawamoto, 2022

Fonte: Autora (2026)

A uniformização dos termos apresentada no Quadro 1 permite estabelecer um vocabulário técnico consistente para o desenvolvimento do capítulo, evitando ambiguidades conceituais e assegurando que expressões como EEE, REEE, lixo eletrônico, frações e subprodutos recuperados sejam utilizadas de forma precisa ao longo da dissertação. Essa clareza terminológica é fundamental para compreender a composição dos resíduos, seus riscos potenciais e suas rotas de destinação, formando a base necessária para a análise das etapas que compõem o processamento industrial dos REEE. A partir dessa padronização, o capítulo 2.2 aprofunda os métodos de reciclagem aplicados a esses resíduos, descrevendo as abordagens tecnológicas e operacionais que orientam o tratamento nas recicladoras e sustentam a estrutura analítica empregada no estudo.

2.2. Reciclagem de REEE

Mais do que caracterizar os resíduos, é fundamental compreender as dinâmicas de destinação e tratamento nas empresas que os processam e inserem no ciclo produtivo. A reciclagem de REEE é industrialmente complexa, requerendo infraestrutura técnica, mão de obra qualificada e padrões rigorosos de segurança ambiental (Mendes Campolina *et al.*, 2017).

O desempenho das recicladoras depende da logística reversa e da coleta seletiva, que ainda apresentam limitações estruturais no Brasil: a ausência de rede de coleta consolidada e a informalidade na triagem reduzem o volume que chega às plantas, afetando a capacidade operacional e financeira; fatores culturais e comportamentais (como a baixa conscientização para descarte correto) ampliam o desequilíbrio entre volume gerado e efetivamente tratado (Singh, Dasgupta e Routroy, 2022; Ciccarelli *et al.*, 2025).

Para lidar com essas demandas, as recicladoras precisam integrar aspectos logísticos, tecnológicos e sociais (Souza, 2024). O desempenho dessas empresas depende diretamente da eficiência da logística reversa e da coleta seletiva, que ainda enfrentam limitações estruturais no Brasil (Romanel, 2025).

A ausência de uma rede de coleta consolidada e a informalidade na triagem reduzem o volume de resíduos que chegam às recicladoras, comprometendo sua capacidade operacional e financeira. Além disso, fatores

culturais e comportamentais, como o baixo nível de conscientização sobre o descarte adequado, agravam o desequilíbrio entre o volume gerado e o efetivamente tratado (Singh, Dasgupta e Routroy, 2022; Ciccarelli *et al.*, 2025). Esses gargalos revelam que os principais desafios da reciclagem de REEE não se limitam ao domínio técnico do processo, mas se estendem à gestão, ao planejamento e à integração entre os agentes da cadeia.

No Brasil, a predominância da reciclagem mecânica reflete a busca por soluções economicamente viáveis, mas também evidencia a limitação tecnológica do setor (Gerbase e Oliveira, 2012a). As empresas recicladoras operam com restrições de capital, infraestrutura e acesso a tecnologias limpas, o que reduz sua eficiência e amplia os impactos ambientais indiretos. Assim, compreender os entraves técnicos e organizacionais enfrentados por essas empresas é essencial para aprimorar a gestão dos resíduos eletroeletrônicos e fortalecer as políticas de economia circular no país.

2.3. Princípios inerentes à ACV e a gestão de Resíduos

No capítulo 2.2 foram descritos os principais métodos de reciclagem aplicados ao tratamento de REEE. Com base nesse referencial, o capítulo 2.3 trata da ACV e da gestão de resíduos, apresentando os fundamentos normativos e conceituais que orientam a incorporação dessa ferramenta como apoio à sustentabilidade no setor, além de discutir princípios relacionados a essa área temática. A ACV é uma ferramenta analítica que avalia os impactos ambientais de um produto desde a extração das matérias-primas até seu descarte final.

Na EC, a ACV é utilizada para identificar pontos críticos e oportunidades de melhoria, garantindo que os produtos sejam desenvolvidos e gerenciados de forma a minimizar os impactos ambientais ao longo de todo seu ciclo de vida (Guinée *et al.*, 2011; Saavedra, 2022). A integração prática entre esses cenários é especialmente relevante no contexto dos REEE, pois essas ferramentas convergem para a compreensão dos fluxos materiais e energéticos ao longo de todo o ciclo de vida dos produtos eletrônicos. O Quadro 2 exemplifica essa relação de integração:

Quadro 2: Integração conceitual entre ACV, EC e LR no contexto dos REEE

Abordagem	Contribuições específicas para REEE
Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)	Mede impactos das diferentes rotas de destinação, considerando extração, produção e fim de vida (Saavedra, 2022) Identifica gargalos ambientais e operacionais em processos de reciclagem (Wäger e Hischer, 2015). Compara cenários nacionais e transfronteiriços, permitindo avaliar riscos do transporte e exportação irregular Suporta a tomada de decisão baseada em evidências ambientais e materiais (Guinée <i>et al.</i>, 2011; Perez-Martinez <i>et al.</i>, 2025).
Economia Circular (EC)	Reduz extração de recursos naturais ao favorecer a retenção de materiais na cadeia e incentiva reuso, remanufatura e reciclagem, princípios aplicáveis aos REEE. (Gaustad <i>et al.</i>, 2018) Valoriza materiais recuperados e subprodutos, mantendo-os em ciclos produtivos (Guzzo <i>et al.</i>, 2022; Romanel, 2025)
Logística Reversa (LR)	Garante fluxo de entrada de REEE para as recicladoras, condicionando sua capacidade operacional (Singh, Dasgupta e Routroy, 2022; Belyamani <i>et al.</i>, 2025). Reduz descarte inadequado e exportações ilegais de resíduos (Jijun, Jingsi e Meilian, 2010; Dabo e Hosseinian-Far, 2023) Minimiza riscos ambientais associados ao transporte e manuseio indevido (Romanel, 2025).

Fonte: Autora (2026)

Nesse cenário, a ACV desponta como uma ferramenta essencial para comparar diferentes rotas de destinação, nacionais e transfronteiriças, permitindo identificar impactos ambientais ocultos, riscos associados ao transporte internacional e perdas de valor decorrentes do envio inadequado de resíduos. Ao fornecer uma base quantitativa para decisões estratégicas, a ACV contribui para mitigar práticas irregulares, apoiar políticas públicas e orientar a construção de sistemas de gestão de REEE mais alinhados aos princípios da economia circular.

Entretanto, a intersecção entre esses conceitos e sua aplicação prática ainda representa um grande desafio, principalmente quando observada no contexto de recicladoras. Alguns trabalhos relacionam a EC ou a LR a esse setor, mas se concentram na quantificação de estoques, modelagem de fluxos e otimização sistêmica, oferecendo contribuições de natureza predominantemente físico-material ou matemática, dissociadas do cotidiano decisório de empresas recicladoras (Ongondo, Williams e Whitlock, 2015; Hu e Yan, 2023).

De modo semelhante, estudos baseados em ACV comparativa ou em indicadores de circularidade aplicam essas ferramentas de forma avaliativa ou conceitual, sem integrá-las à gestão de processos, à estrutura organizacional ou

à tomada de decisão estratégica no nível empresarial (Moraga *et al.*, 2022; Islam e Iyer-Raniga, 2023; Nikolic *et al.*, 2024).

No caso das recicladoras de REEE, a ACV apoia decisões gerenciais ao integrar dimensões ambientais, econômicas e sociais na análise do desempenho empresarial. Contudo, sua aplicação ainda é limitada, especialmente em micro e pequenas empresas, devido a lacunas de capacitação técnica, custos de implementação e ausência de bases de dados nacionais (Rossi, Germani e Zamagni, 2016; Naimin *et al.*, 2023). Mesmo assim, a adaptação da ACV ao contexto brasileiro representa um potencial estratégico para transformar barreiras técnicas em oportunidades de inovação, fortalecendo a gestão ambiental e a integração das recicladoras às cadeias globais da economia circular.

A complexidade inerente aos EEE, aliada à diversidade de categorias de impacto da ACV, torna a realização desse tipo de avaliação particularmente desafiadora. Mesmo quando o método base é semelhante, cada autor pode adotar diferentes formas de categorização, refletindo a pluralidade de macrotemas ambientais analisados, como Emissões e Mudanças Climáticas, Consumo de Recursos, Ecotoxicidade, Qualidade do Solo/Ecossistemas e Saúde Humana. (Guinée *et al.*, 2011).

Especialmente considerando que, ainda que o método do trabalho seja o mesmo em vários estudos, cada autor avalia os índices a partir de diferentes perspectivas, conforme as categorias analisadas, ou seja, para resíduos específicos, dados específicos quanto ao país ou região em que a pesquisa é desenvolvida ou parâmetros ligados à composição específica do REEE (Lopes Silva *et al.*, 2019)

Ainda nesse sentido, é necessário evidenciar que, além de contribuir para a preservação dos recursos naturais, a adoção de uma abordagem circular para os ciclos de vida dos produtos também traz benefícios econômicos, como a redução de custos de matérias-primas e de gestão de resíduos, além da geração de novas oportunidades de negócios na área de reciclagem e reutilização (Meloni, 2019). A minimização desses impactos ocorre por meio de práticas como a reciclagem, a reutilização, a remanufatura e o design para a desmontagem, que permitem prolongar a vida útil dos produtos e reintroduzir

seus materiais na cadeia produtiva (Shahrasbi, Shokouhyar e Zeidyahyae, 2021).

Para analisar e validar o desempenho das ações de uma determinada empresa por meio da ACV, diversos indicadores de sustentabilidade são utilizados (Moraga *et al.*, 2022). Um indicador de sustentabilidade permite o monitoramento da circularidade de um determinado sistema, organização ou processo produtivo. Contudo, é necessário ressaltar que essa prática ainda não é vista como algo comum nas organizações. Nesse sentido, esses indicadores de sustentabilidade devem funcionar como ponte entre a EC e a realidade empresarial (Barboza *et al.*, 2022).

2.4. Marcos regulatórios e políticas públicas como base estruturante da gestão de REEE

O capítulo 2.3 analisou a aplicação da ACV no contexto dos resíduos eletroeletrônicos, destacando resultados e desafios observados em diferentes estudos. A partir dessa análise, este capítulo aborda as políticas públicas e os marcos regulatórios que sustentam a gestão de REEE, evidenciando a articulação entre compromissos internacionais, legislações nacionais e a prática empresarial.

A formulação e a implementação de políticas públicas constituem um dos pilares fundamentais para enfrentar os desafios relacionados à gestão de REEE. Essas políticas fornecem a estrutura regulatória que orienta a atuação de governos, empresas e sociedade civil, articulando compromissos multilaterais e definindo responsabilidades em escala nacional e internacional. No cenário global, é possível observar uma progressiva institucionalização da agenda ambiental em marcos normativos, que culminaram na integração entre desenvolvimento econômico, preservação ambiental e justiça social.

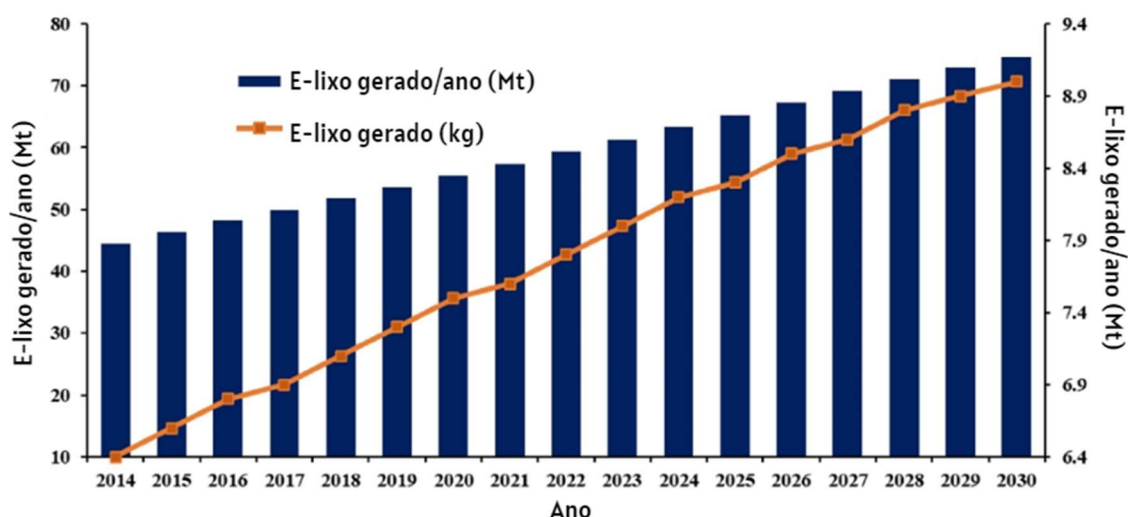
Como primeiro marco internacional relevante, destaca-se a Conferência de Estocolmo, em 1973, que inaugurou o debate sobre a necessidade de compatibilizar crescimento econômico e conservação ambiental, delineando os princípios do desenvolvimento sustentável.

Na década seguinte, a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, conhecida como Eco-92, realizada no Rio de

Janeiro, consolidou a noção de “responsabilidades comuns, porém diferenciadas”, reconhecendo as assimetrias entre países desenvolvidos e em desenvolvimento. Esse encontro resultou em tratados internacionais voltados à biodiversidade, à conservação e ao combate às mudanças climáticas.

Posteriormente, o Protocolo de Kyoto (1997) introduziu compromissos vinculantes de redução de emissões de gases de efeito estufa, além de mecanismos de desenvolvimento limpo, que estimularam investimentos em tecnologias de baixo carbono. Já o Acordo de Paris (2016) fortaleceu a cooperação internacional ao estabelecer as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs), que buscam mitigar impactos ambientais por meio de metas voluntárias de cada país, acompanhadas de fundos climáticos para apoio a nações vulneráveis. Esse cenário global de intensificação do consumo e consequente aumento da geração de resíduos é ilustrado na Figura 2, que apresenta as projeções de crescimento na produção mundial de REEE até 2030. Complementando essa análise, a Figura 3 demonstra a discrepância entre o volume de equipamentos eletroeletrônicos colocados no mercado e as baixas taxas de reciclagem formal, evidenciando um descompasso estrutural que agrava a crise ambiental.

Figura 2: Projeções na geração de REEE entre 2014 e 2030.

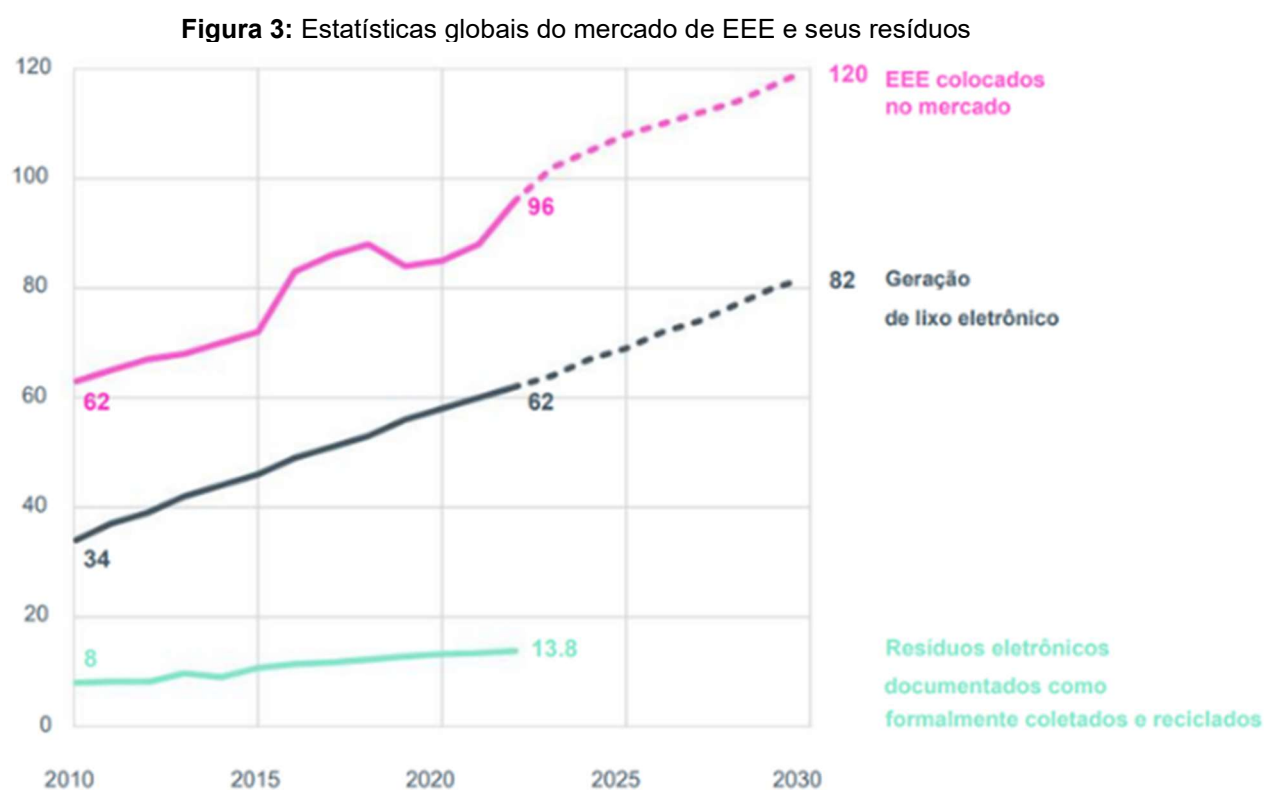


Fonte: Adaptado de Adrian et al. (2020)

A análise dessas projeções evidencia que a geração de resíduos eletroeletrônicos cresce em ritmo superior à capacidade de coleta e tratamento

estruturado. Essa tendência está diretamente relacionada à rápida obsolescência dos dispositivos, ao consumo incentivado por estratégias de mercado e à falta de políticas públicas uniformizadas em escala global. Ainda que acordos internacionais e legislações nacionais avancem no estabelecimento de metas, observa-se uma lacuna significativa entre a formulação normativa e sua efetiva implementação, especialmente em países em desenvolvimento.

Nesse sentido, os dados globais sobre o mercado de equipamentos eletroeletrônicos revelam uma realidade preocupante: a cada ano mais aparelhos chegam ao mercado, mas a fração destinada a sistemas de reciclagem formais continua proporcionalmente baixa, conforme demonstrado pela Figura 3:



Fonte: Adaptado de Baldé et al. (2024, p. 26)

No Brasil, a PNRS, instituída pela Lei nº 12.305/2010, representou um marco ao introduzir a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e a logística reversa como instrumentos centrais da política ambiental (Bechara e Galli, 2013; Política Nacional de resíduos sólidos, 2021).

Atualmente, a ACV tornou-se uma ferramenta essencial para organizações que buscam alinhar suas práticas aos princípios do desenvolvimento sustentável (Di Vaio *et al.*, 2022). Ela é aplicada em setores como construção civil, indústria alimentícia, automotiva, mineração, energia e gestão de resíduos, contribuindo para decisões mais informadas e conscientes sobre o desempenho ambiental de alternativas tecnológicas, rotas logísticas ou materiais. De forma geral, facilita a operacionalização de métodos na prática empresarial (Cerchione *et al.*, 2025).

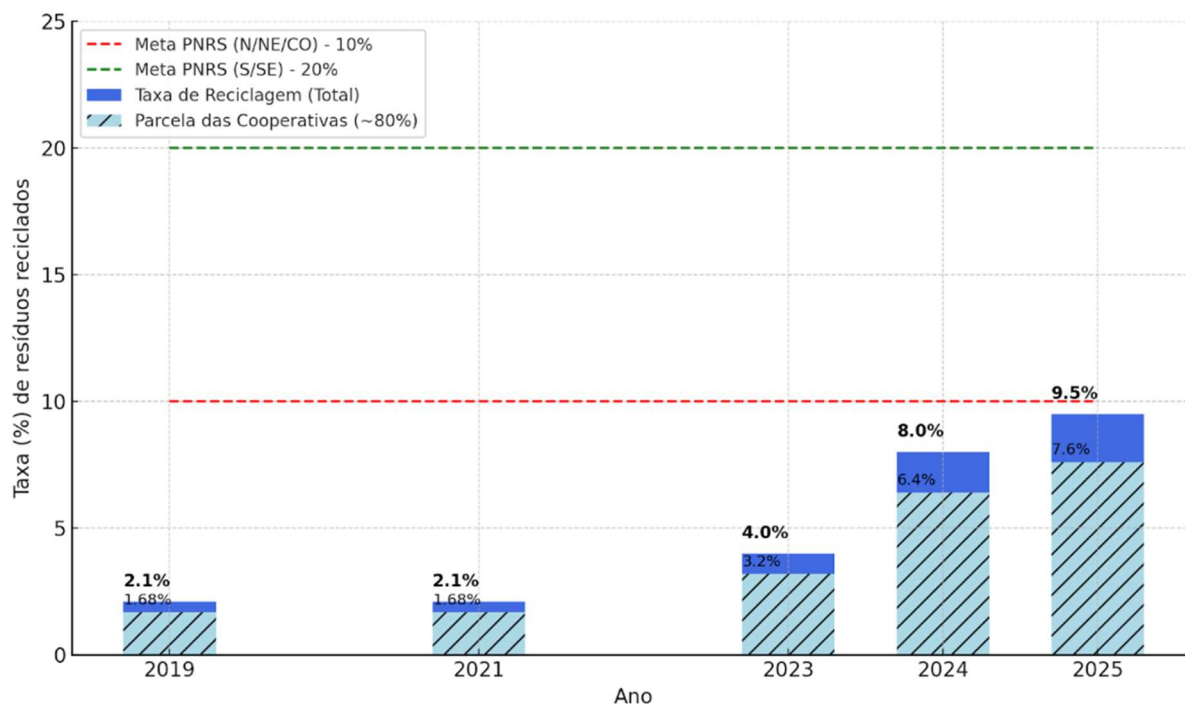
No entanto, observa-se uma lacuna relevante: pelo menos 80% das grandes empresas no mundo não incluem estudos de ACV em seus relatórios de sustentabilidade. Entre as que incluem, a maioria os aplica de forma superficial ou restringe a análise à pegada de carbono, negligenciando outras categorias de impacto igualmente importantes, o que aumenta o risco de *greenwashing* corporativo (Ruggeri *et al.*, 2025).

Essa limitação reforça que, apesar do avanço normativo, a aplicabilidade prática da ACV ainda carece de padronização e integração efetiva, como apontam estudos que destacam a ausência de dados robustos e metodologias consolidadas (Daub, 2007; Pongérard, San Augustin e Paredes, 2022). Especificamente para o setor de eletroeletrônicos, a regulamentação avançou com o Acordo Setorial de 2019, que estabeleceu metas para coleta e destinação de REEE, e foi consolidada pelo Decreto Federal nº 10.240/2020, que definiu critérios operacionais, abrangência geográfica e responsabilidades de fabricantes, distribuidores, comerciantes e consumidores (BRASIL, 2019; BRASIL, 2020).

Apesar dos avanços normativos, como a formalização da logística reversa e a criação de sistemas estruturados de coleta, os índices nacionais de reciclagem permanecem aquém das metas estabelecidas. Entre 2019 e 2025, a taxa de reciclagem no Brasil passou de 2,1% para 9,5%, segundo dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2024) e da Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA, 2024). Embora expressivo, esse crescimento ainda está abaixo das metas previstas no Plano Nacional de Resíduos Sólidos, que projetam índices de 10% nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste e de 20% nas regiões Sul e Sudeste até 2033 (BRASIL, 2010; BRASIL, 2022).

Essa tendência é apresentada na Figura 4, que mostra a evolução da taxa de reciclagem no Brasil no período recente, ainda distante das metas projetadas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).

Figura 4: Gráfico comparativo das metas de REEE em relação aos totais reciclados de 2019 até 2025



Fonte: Adaptado de SNIS (Brasil, 2022); PNRS (Brasil, 2010); PLANARES (Brasil, 2022); ABREMA (2025); ABRELPE (2024); ANCAT (2023); ABRAPS (2021).

Do total de resíduos eletrônicos reciclados em 2025, cerca de 7,6% resultaram diretamente da atuação das cooperativas de catadores, evidenciando seu papel central na cadeia de reciclagem. No entanto, essa atuação ainda se dá em grande medida sem reconhecimento institucional e com carência de apoio técnico e integração formal aos sistemas públicos de gestão (Pinto, 2020; Mattos e Calmon, 2023a).

Em conjunto com a legislação, é possível observar o fortalecimento de agendas empresariais vinculadas à sustentabilidade. O conceito de ESG (*Environmental, Social and Governance*), amplamente disseminado no mercado financeiro global, consolidou-se como critério de avaliação de riscos e oportunidades, pressionando empresas a adotarem práticas de governança, responsabilidade social e mitigação ambiental. No setor de REEE, essas práticas se materializam na adoção de sistemas de rastreabilidade, na valorização de

materiais recuperados e na integração de cooperativas em cadeias de reciclagem.

As políticas públicas também desempenham papel crucial ao fomentar instrumentos complementares, como planos municipais e estaduais de gestão de resíduos, linhas de financiamento verde e incentivos fiscais à reciclagem. Nesse contexto, conceitos como EC e a LR emergem como estratégias de inovação: a EC busca manter recursos em uso pelo maior tempo possível, priorizando a reutilização e a recuperação de materiais, enquanto a LR assegura a reintegração de produtos descartados no ciclo produtivo (Ongondo, Williams e Whitlock, 2015).

Ferramentas como a ACV, por sua vez, complementam esse cenário ao permitir uma análise sistêmica dos impactos ambientais desde a extração de matérias-primas até o descarte final dos produtos. Estudos recentes reforçam que a integração de ACV, EC e LR representa não apenas uma solução ambiental, mas também uma oportunidade econômica e política para alinhar a gestão de REEE às metas globais de sustentabilidade (European Commission. Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability., 2010).

2.5. Revisão Sistemática de Literatura

Para a análise do presente estudo de caso, foi conduzida uma Revisão Sistemática de Literatura (RSL) segundo o Protocolo PRISMA 2020 (Agrawal *et al.*, 2024), buscando responder à seguinte questão de pesquisa: *Como a ACV tem sido aplicada na gestão de REEE, no contexto da EC e da LR, e quais entraves técnicos e organizacionais são identificados na literatura para sua implementação prática em empresas recicladoras?*

Com essa pergunta de pesquisa, buscou-se atender aos seguintes objetivos específicos, que forneceram embasamento para os objetivos empíricos deste estudo:

- i. Mapear o que a literatura aponta sobre a estrutura operacional, tecnológica e organizacional das recicladoras de REEE.
- ii. Identificar o que a literatura aponta como entraves técnicos e gerenciais que influenciam a adoção da ACV e práticas de EC.

iii. Analisar o que a literatura aponta quanto ao uso atual (ou potencial) de ferramentas de ACV nas empresas investigadas.

As strings de busca foram elaboradas de modo a triangular os principais temas do estudo por meio das combinações: (*“reverse logistic” OR “reverse logistics”*) AND (*e-waste OR “waste electrical and electronic equipment” OR “waste electrical” OR “electronic equipment”*) AND *“circular economy”*. Foram considerados para o estudo apenas os artigos acadêmicos publicados nos últimos 15 anos.

Optou-se por não incluir explicitamente o termo “Life Cycle Assessment” ou “LCA” nas strings centrais de busca, apesar de a ACV constituir o eixo analítico do presente estudo. Essa decisão metodológica foi estratégica e fundamenta-se na natureza do objetivo da RSL, que não consiste em identificar exclusivamente estudos que aplicam formalmente a ACV, mas sim em compreender como a gestão de REEE tem sido analisada no contexto da economia circular e da logística reversa, bem como os entraves técnicos e organizacionais que condicionam a adoção prática da ACV em empresas recicladoras. A inclusão prévia do termo “ACV” nas strings poderia, portanto, introduzir um viés de exclusão, restringindo a amostra a estudos com abordagem metodológica formalizada e deixando de capturar contribuições relevantes sobre barreiras estruturais, organizacionais e operacionais: elementos centrais para os objetivos empíricos desta pesquisa.

Foram encontrados 740 artigos na Scopus e 242 na Web of Science. Desse total, foram encontrados 182 duplicados e 133 indisponíveis para download, restando 667 artigos para iniciar as etapas de triagem. A triagem ocorreu em duas etapas: a primeira, caracterizada pela análise dos títulos e resumos e a segunda, caracterizada pela análise do texto completo, como apresenta o Quadro 3.

Quadro 3: Relação dos critérios de inclusão e exclusão aplicados na análise da pesquisa

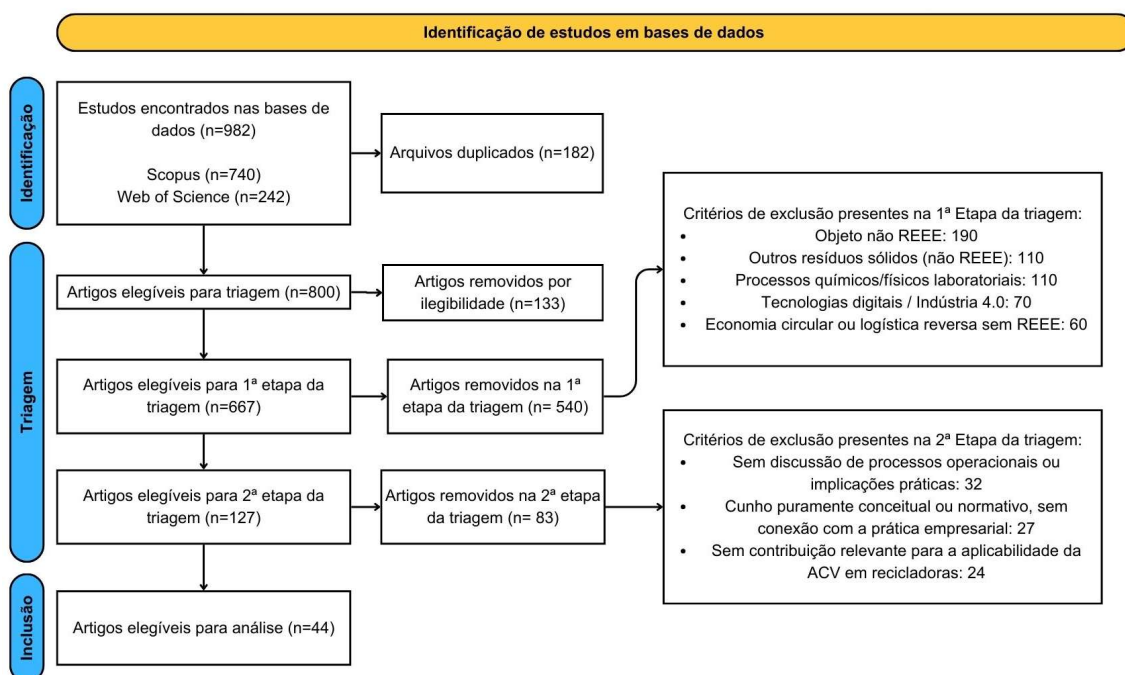
Etapas da triagem	Critérios de Inclusão	Critérios de Exclusão
	Tratam explicitamente da LR e/ou da EC aplicadas à gestão de REEE	Abordam apenas EC ou apenas LR, sem relação direta com a gestão de REEE
1ª	Têm foco no tratamento de REEE por processos mecânicos, tais como desmontagem, separação, triagem e recuperação física de materiais	Apresentam foco exclusivo no tratamento de REEE por processos químicos ou físicos laboratoriais, sem conexão com operações reais de reciclagem

2ª	O objeto central da pesquisa são REEE	O objeto principal da pesquisa não são REEE, ainda que equipamentos elétricos e eletrônicos (EEE) sejam mencionados de forma periférica
	Analisam a gestão, o tratamento ou a cadeia reversa de REEE, em nível operacional, organizacional ou sistêmico	Tratam de outros resíduos sólidos (plásticos, têxteis, embalagens, resíduos da construção civil) sem abordagem específica de REEE
	Consideram a gestão de REEE sob a lógica da EC e/ou da LR, ainda que sem aplicação formal de ACV	Abordam tecnologias digitais, indústria 4.0, modelos computacionais ou simulações como objeto central, sem relação direta com a gestão de REEE
	Discutem processos operacionais, tecnológicos ou organizacionais de recicladoras de REEE	Sem discussão de processos operacionais ou implicações práticas
	Apontam barreiras, limitações ou desafios à implementação de práticas de EC, LR ou ferramentas de avaliação ambiental	Cunho puramente conceituais ou normativos, sem conexão com a prática empresarial
	Abordam avaliação de desempenho ambiental, comparação de rotas de tratamento ou tomada de decisão sob a lógica do ciclo de vida, ainda que sem aplicação formal de ACV	Não apresentam contribuições relevantes para a compreensão da aplicabilidade da ACV em recicladoras

Fonte: Autora (2026)

Na primeira etapa da triagem foram excluídos 540 trabalhos, enquanto na segunda etapa foram excluídos outros 83 trabalhos, como apresenta o Diagrama Prisma, apresentado na Figura 5:

Figura 5: Protocolo Prisma



Fonte: Autora (2026)

Ao final, foram elencados 44 artigos acadêmicos, dispostos entre 2012 e 2026. Após a análise dos resultados, discussões e conclusões dos artigos, foram identificados elementos recorrentes relacionados a aspectos técnicos, organizacionais, econômicos e institucionais associados à gestão dos REEE, à EC, à LR e a aplicação (ou ausência) da ACV.

Assim, as categorias funcionam como unidades de análise, permitindo identificar presenças, ausências e lacunas na forma como a literatura aborda a realidade das empresas recicladoras.

Inicialmente, foi realizada a divisão desses artigos em 4 categorias gerais: i) Artigos empíricos; ii) Artigos institucionais, regulatórios e de políticas públicas; iii) Artigos organizacionais, gerenciais e econômicos; e iv) Artigos técnico-materiais e de processos.

Essa categorização inicial gerou um levantamento de extrema importância para o presente estudo: compreender os diferentes tipos de publicações que envolvem LR e EC no contexto das recicladoras de REEE e sua relação com a presença ou ausência de ACV, como apresenta o Quadro 4.

Quadro 4: Relação das informações centrais levantadas na categorização em relação aos autores dos trabalhos elencados na RSL.

Categorização	Informações principais levantadas na categorização	Fonte
Artigos empíricos	Este bloco reúne os trabalhos que mais se aproximam do objeto central da sua pesquisa. Os estudos analisam recicladoras reais, descrevendo: - Processos operacionais; - Fluxos logísticos; - Custos e contratos; - Exigências regulatórias; - Barreiras práticas e organizacionais.	Boyden, Soo e Doolan, 2016; Mendes Campolina <i>et al.</i>, 2017; Flygansvær, Dahlstrom e Nygaard, 2018; Gonda e Degrez, 2018; Messmann <i>et al.</i>, 2019; Rocha e Penteado, 2021; Ghiga <i>et al.</i>, 2023; Vargas, Campos e Luna, 2023; Frantz Schneider, Aanestad e Carvalho, 2024; Carvalho <i>et al.</i>, 2025
Artigos institucionais, regulatórios e de políticas públicas	Os artigos deste bloco apresentam evidência predominantemente institucional e sistêmica, analisando: - Políticas públicas; - Marcos regulatórios; - Acordos setoriais; - Metas nacionais e regionais; - Governança da EC.	De Souza <i>et al.</i>, 2016; Curran, 2018; Marconi <i>et al.</i>, 2018; Nowakowski e Mrówczyńska, 2018; Bressanelli <i>et al.</i>, 2021; Mattos e Calmon, 2023b; Płrvu <i>et al.</i>, 2023; Botelho Junior <i>et al.</i>, 2024; Correia <i>et al.</i>, 2024; Frantz Schneider, Aanestad e

		Carvalho, 2024; Da Silva e Franz, 2025; Ramteke, Varadwaj e Tiwari, 2025; Souza, Guarnieri e Vieira, 2025; Chowdhury <i>et al.</i> , 2026
Artigos organizacionais, gerenciais e econômicos	Os artigos enquadrados neste grupo convergem ao demonstrar que a circularidade dos EEE e a viabilidade de aplicação de instrumentos analíticos, como a ACV, dependem menos de soluções tecnológicas isoladas e mais de condições organizacionais e estruturais prévias, apontando para a importância de: - Governança da informação; - Coordenação entre múltiplos atores; - Maturidade organizacional; - Capacidade decisória e financeira.	Andersson, Eriksson e Torstensson, 2006; Moslehi, Sahebi e Teymouri, 2021; Pollard <i>et al.</i> , 2021; Cordisco, Melloni e Botti, 2022; Dong <i>et al.</i> , 2022; Bhattacharjee <i>et al.</i> , 2023; Guo, 2025; Oliveira <i>et al.</i> , 2025; Rittershaus, Aryan e Renner, 2025
Artigos técnico-materiais e de processos	Este grupo concentra-se majoritariamente na viabilidade da recuperação de materiais a partir de REEE, com ênfase em: - Caracterização detalhada dos resíduos; - Rotas tecnológicas; - Rendimento de separação; - Análise da reciclabilidade; - Aplicação metodológica da ACV como ferramenta avaliativa.	Gerbase e Oliveira, 2012b; Menad, Guignot e Van Houwelingen, 2013; Aldairi, Khan e Munive-Hernandez, 2017; Da Silva Müller Teixeira <i>et al.</i> , 2021; Bill <i>et al.</i> , 2022; Liu <i>et al.</i> , 2022; Anić Vučinić <i>et al.</i> , 2023a; Ghisellini, Passaro e Ulgiati, 2023; Kouloumpis <i>et al.</i> , 2023; Hämmer e Wambach, 2024; Nikolic <i>et al.</i> , 2024
Fonte: Autora (2026)		

Embora o Quadro 4 ofereça uma visão abrangente do perfil e da natureza das publicações analisadas, essa caracterização, por si só, não é suficiente para explicar de que forma tais estudos avançam, ou falham em avançar, na incorporação efetiva da ACV no contexto real das operações de reciclagem. Assim, tornou-se necessário aprofundar a análise, reinterpretando essas categorias à luz de suas contribuições e limitações para o objetivo central desta pesquisa.

Nesse sentido, o Quadro 5 deriva diretamente da categorização apresentada no Quadro 4 e reorganiza os mesmos grupos de estudos a partir de uma perspectiva crítica, evidenciando, para cada categoria, suas principais contribuições e as lacunas ainda não superadas pela literatura. Essa análise comparativa permite explicitar que, embora existam avanços conceituais, institucionais e técnicos relevantes, persiste uma limitação transversal relacionada à aplicação empírica e institucionalizada da ACV em recicladoras de REEE:

Quadro 5: relação entre as contribuições centrais e as limitações das categorizações realizadas

Categorização	Contribuição principal	Limitação
Artigos empíricos	Revelar a lacuna entre teoria, política e prática operacional.	Aplicação limitada e não institucionalizada da ACV.
Artigos institucionais, regulatórios e de políticas públicas	Contextualiza os limites estruturais e institucionais da circularidade dos REEE.	Ausência de tradução das diretrizes em práticas empresariais concretas.
Artigos organizacionais, gerenciais e econômicos	Explicitar entraves organizacionais e gerenciais que antecedem qualquer aplicação operacional da ACV.	Ausência de dados empíricos de operação e de ACV aplicada.
Artigos técnico-materiais e de processos	Fornecer a base técnica e material sem a qual a ACV não pode existir.	Desconexão entre desempenho técnico e viabilidade organizacional.

Fonte: Autora (2026)

A análise comparativa apresentada no Quadro 5 evidenciou que, apesar da diversidade de abordagens adotadas pela literatura, persiste uma limitação transversal relacionada à aplicação empírica e institucionalizada da ACV no contexto das recicladoras de REEE. Essa limitação manifesta-se de formas distintas entre as categorias analisadas, mas converge para um mesmo ponto crítico: a dificuldade de traduzir avanços conceituais, normativos, organizacionais e técnicos em práticas operacionais consolidadas no ambiente real das empresas.

Os artigos empíricos contribuíram diretamente para a definição de focos relacionados ao perfil da empresa, às práticas operacionais, aos fluxos internos e logísticos, às barreiras práticas e aos planos e próximos passos, ao evidenciar lacunas entre teoria, política e prática operacional. Os estudos institucionais, regulatórios e de políticas públicas fundamentaram focos associados à conformidade documental, aos contratos, às parcerias, às exigências regulatórias e às estruturas de governança da economia circular, ressaltando a distância entre diretrizes normativas e sua implementação nas empresas.

De forma complementar, os artigos organizacionais, gerenciais e econômicos orientaram a inclusão de focos voltados a pessoas, papéis e treinamento, maturidade organizacional, custos, receitas e viabilidade econômica, bem como às barreiras organizacionais que antecedem qualquer tentativa de aplicação operacional da ACV. Por sua vez, os artigos técnico-materiais e de processos sustentaram focos relacionados à geração e

caracterização dos resíduos, às práticas de separação e triagem, à infraestrutura e tecnologia e ao uso (ou não) da ACV, ao evidenciar que avanços técnicos isolados são insuficientes quando desconectados das condições organizacionais e de gestão.

A partir desse diagnóstico, e com base na análise de similaridades e recorrências observadas nos 44 artigos selecionados, foram definidos 12 focos analíticos centrais, apresentados no Quadro 6. O mapeamento detalhado entre cada artigo analisado e os respectivos focos analíticos aos quais se relaciona encontra-se sistematizado no Apêndice 1, assegurando transparência ao processo de construção das categorias e rastreabilidade entre a revisão sistemática da literatura e a estrutura analítica adotada.

Quadro 6: Relação das áreas analíticas observadas nos artigos aprovados após a triagem.

Nº	Área analítica	O que conta como evidência
1	Perfil da empresa	Porte da empresa; tipo de organização (recicladora, cooperativa, operador logístico); grau de formalidade; capacidade instalada; posição na cadeia (triagem primária vs. tratamento completo); escala operacional; modelo de governança; maturidade da gestão.
2	Geração e caracterização dos resíduos	Tipo e origem do REEE; composição material; variabilidade dos fluxos; presença de frações perigosas; qualidade do material recebido; sazonalidade de entrada; mistura ou contaminação entre fluxos.
3	Práticas de separação e triagem	Desmontagem manual ou mecânica; critérios de segregação; procedimentos de triagem; perdas de material; contaminação cruzada; existência de procedimentos operacionais padronizados.
4	Infraestrutura e tecnologia	Máquinas e equipamentos disponíveis; nível de automação; uso de tecnologias digitais; sistemas de rastreabilidade; limitações tecnológicas; necessidade de envio de frações para tratamento externo.
5	Fluxo interno e logística externa	Layout operacional; armazenamento; movimentação interna; organização do fluxo produtivo; logística reversa; transporte; integração com fornecedores, operadores logísticos e destinadores finais.
6	Pessoas, papéis e treinamento	Qualificação da mão de obra; definição de papéis; cultura organizacional; práticas de saúde e segurança; treinamento formal; conhecimento técnico; capacidade de operar, registrar e interpretar dados.
7	Conformidade e documentação	Licenças ambientais; certificações; auditorias; registros operacionais; documentação de destinação; rastreabilidade documental; atendimento a exigências regulatórias.
8	Custos, receitas e contratos	Estrutura de custos; receitas por tipo de fração; contratos de logística reversa; pressão por preço; viabilidade econômica; dependência de mercado; previsibilidade financeira.
9	Parcerias e economia circular	Simbiose industrial; acordos com fabricantes; cooperação com governos e cooperativas; redes de colaboração; circulação e reinserção de materiais na cadeia produtiva.
10	Barreiras e soluções	Barreiras técnicas, organizacionais, regulatórias e de mercado; soluções propostas ou testadas, como incentivos econômicos,

		digitalização, capacitação, melhoria da governança e padronização de processos.
11	Planos e próximos passos	Recomendações explícitas; roadmaps; agenda futura de pesquisa ou implementação; seções de <i>future work</i> ; diretrizes estratégicas; propostas de implementação gradual; definição de prioridades.
12	ACV (uso ou não)	Aplicação formal da ACV; menção à ACV como possibilidade; uso de indicadores substitutos; referência a bancos de dados; limitações de dados; uso (ou não) da ACV como ferramenta de decisão.

Fonte: Autora (2026)

A literatura evidencia que as empresas atuantes no tratamento de REEE apresentam elevada heterogeneidade estrutural e operacional, variando significativamente em função do porte, do volume processado, do nível de formalização e da infraestrutura tecnológica disponível. Micro e pequenas empresas assumem papel central nas etapas iniciais da cadeia, especialmente na coleta e na triagem manual, enquanto empresas de médio e grande porte tendem a concentrar investimentos em automação, mecanização e processos de valorização de materiais, evidenciando a complementaridade entre diferentes atores para o funcionamento da logística reversa e o avanço da economia circular (Bhattacharjee *et al.*, 2023; Mosora *et al.*, 2023).

O perfil organizacional das recicladoras influencia diretamente sua capacidade de gestão ambiental e operacional (Moslehi, Sahebi e Teymouri, 2021; Cordisco, Melloni e Botti, 2022). A coleta e a triagem inicial dos REEE, que envolvem desde a identificação das fontes geradoras até o transporte aos centros de reciclagem, são condicionadas por fatores culturais e pelo grau de conscientização dos consumidores, afetando a oferta, a qualidade e a regularidade dos fluxos de resíduos. O mapeamento da produção e da origem dos resíduos permite identificar pontos críticos de geração e direcionar estratégias de mitigação e priorização de tratamento (Da Silva Müller Teixeira *et al.*, 2021).

A obsolescência programada e a rápida substituição de produtos tecnológicos, como celulares e eletroeletrônicos portáteis, intensificam o volume e a sazonalidade dos resíduos gerados. Esses ciclos curtos de uso impõem desafios operacionais às recicladoras, que precisam adaptar turnos, equipes e processos conforme as flutuações na entrada de materiais (Pollard *et al.*, 2021; Rittershaus, Aryan e Renner, 2025). Além disso, a estrutura organizacional das

empresas reflete seu porte e maturidade ambiental: enquanto microempresas dependem de mão de obra manual e processos informais, as de médio e grande porte tendem a adotar tecnologias automatizadas e práticas gerenciais padronizadas (Bhattacharjee *et al.*, 2023).

A necessidade de expansão da logística reversa, aliada ao desalinhamento entre regulamentações e práticas efetivamente executadas, dificulta a gestão e o gerenciamento de resíduos eletrônicos, é evidenciada tanto para contextos de tratamentos específicos (Carvalho *et al.*, 2025) quanto para contextos de tratamentos gerais desses resíduos (Oliveira Neto *et al.*, 2025).

Essas limitações estruturais e regulatórias delineiam o cenário em que se inserem os fluxos de entrada e as práticas de tratamento dos resíduos, apresentados a seguir.

É possível observar que a compreensão sobre a geração e a caracterização dos resíduos é um ponto de partida essencial para avaliar a eficiência das recicladoras (Correia *et al.*, 2024). O fluxo de entrada dos REEE nas recicladoras inicia-se a partir das etapas de coleta e transporte, que envolvem tanto o retorno de produtos pós-venda quanto de materiais em fim de vida pós-consumo. Esses resíduos chegam aos centros de reciclagem de forma heterogênea, com diferentes graus de conservação e composição material, exigindo avaliação prévia antes do início do tratamento (Guo, 2025).

Após o recebimento, realiza-se uma triagem detalhada para identificar as condições físicas e o potencial de reaproveitamento dos equipamentos, bem como para verificar a presença de componentes perigosos, como baterias, capacitores e placas de circuito. Essa etapa é essencial para evitar contaminações cruzadas e garantir que os materiais sigam rotas de processamento compatíveis com suas propriedades químicas e físicas. A separação de componentes mistos ou com aditivos complexos gera limitações técnicas e custos elevados (Pollard *et al.*, 2021; Correia *et al.*, 2024).

Em operações de menor porte, essa triagem é frequentemente manual, desempenhando também o papel de desmontagem inicial dos equipamentos. O diagnóstico quantitativo presente nesse momento é essencial para planejar rotas de valorização e definir prioridades de tratamento, pois permite identificar fluxos mais representativos e de maior impacto, orientando estratégias de EC (Rittershaus, Aryan e Renner, 2025).

A partir dessa avaliação inicial, os resíduos são direcionados para o pré-processamento, que compreende as etapas de desmanche, fragmentação e separação de materiais. Essa fase visa otimizar a recuperação de componentes e reduzir o volume de descarte, por meio de técnicas mecânicas, magnéticas ou eletrostáticas que separam plásticos, metais e vidros, além da remoção segura de substâncias tóxicas. A eficiência desse processo depende diretamente do porte e da infraestrutura tecnológica das empresas (Gerbase e Oliveira, 2012b; Bhattacharjee *et al.*, 2023). Nesse momento, é necessário considerar que o local da triagem influencia diretamente a qualidade do material recuperado e os custos operacionais de transporte e manuseio, e que o uso de equipamentos aumenta a produtividade, melhora a segurança e reduz falhas na separação manual. A partir da consideração desses aspectos, é possível avaliar boas práticas de armazenamento temporário e se a empresa segue normas ambientais e ocupacionais (Pollard *et al.*, 2021) e se torna possível indicar o grau de mecanização do processo e a capacidade da empresa de competir em cadeias formais de reciclagem (Liu *et al.*, 2022).

No entanto, a avaliação de boas práticas e o grau de mecanização da empresa não são influenciados apenas pelos fatores expostos anteriormente: a digitalização aumenta a rastreabilidade, reduz perdas e potencializa a eficiência operacional, a estrutura física define a capacidade de tratamento e influencia a segurança e o desempenho da triagem (Pollard *et al.*, 2021), as tecnologias empregadas determinam quais materiais podem ser recuperados e em que escala, influenciando eficiência ambiental e econômica (Anić Vučinić *et al.*, 2023).

Nesse sentido, o domínio tecnológico constitui um fator estratégico para a eficiência das operações e para a ampliação da circularidade dos materiais. Além de permitir maior precisão na separação e no reaproveitamento dos componentes, a infraestrutura adequada garante rastreabilidade e conformidade com as exigências legais da PNRS (ABREMA, 2024) e da ISO 14040 (*Gestão Ambiental: Avaliação Do Ciclo De Vida: Princípios E Estrutura*, 2009a). Em contrapartida, a escassez de investimentos em inovação e equipamentos ainda limita a competitividade de muitas recicladoras brasileiras, restringindo sua capacidade de recuperação de materiais e de inserção em cadeias globais da economia circular (Carvalho *et al.*, 2025).

A eficiência operacional das recicladoras de REEE depende não apenas da infraestrutura tecnológica, mas também da organização de seus fluxos internos e externos. O fluxo interno compreende a movimentação dos materiais dentro da planta e deve garantir segurança, rastreabilidade e aproveitamento máximo dos recursos. Questões como o transporte interno e o layout das empresas, por exemplo, impactam diretamente custos e eficiência operacional (Pollard *et al.*, 2021). Já a logística externa, por sua vez, envolve as parcerias com fornecedores e clientes, o transporte dos resíduos e a devolução de produtos ou insumos à cadeia produtiva. Quando bem estruturados, esses fluxos reduzem custos de transporte, evitam retrabalhos e fortalecem o papel das empresas na logística reversa e na economia circular, além de permitirem a avaliação de como a empresa organiza seus canais e rotas permite compreender seu grau de integração em cadeias circulares e se ela atende à legislação e às melhores práticas de gestão (Correia *et al.*, 2024; Oliveira Neto *et al.*, 2025).

Esses processos operacionais dependem diretamente do capital humano, cuja qualificação técnica e comprometimento são fatores determinantes para o desempenho ambiental e produtivo das recicladoras. A definição clara de papéis, responsabilidades e rotinas de trabalho contribui para padronizar operações e reduzir riscos ocupacionais, refletindo a estrutura de responsabilidades e evitando a sobrecarga ou informalidade na gestão. sobretudo nas etapas de desmontagem e separação, que envolvem contato direto com substâncias potencialmente tóxicas. Empresas que investem em treinamento contínuo e em programas de capacitação tendem a alcançar níveis mais elevados de eficiência e conformidade, reforçando a integração entre os sistemas de gestão da qualidade, meio ambiente e segurança (Bhattacharjee *et al.*, 2023; Kouloumpis *et al.*, 2023).

Nesse contexto, a conformidade e a documentação dessas empresas permite mapear como as barreiras legais e institucionais impactam a logística reversa e a operação das recicladoras (Correia *et al.*, 2024), a presença de práticas inovadoras é vista como essencial para aumentar eficiência e reduzir impactos da reciclagem e auxiliam na garantia do monitoramento de desempenho e transparência quando as empresas recicladoras contam com auditorias e metas internas (Pollard *et al.*, 2021).

A presença de documentações e certificações das empresas, influencia suas atividades de diversas formas: os contratos formalizam fluxos e responsabilidades, garantindo previsibilidade (Vargas, Campos e Luna, 2023; Correia *et al.*, 2024), e reflete o nível de integração com parceiros estratégicos (Mendes Campolina *et al.*, 2017). A previsibilidade econômica é maior nas empresas que mantêm contratos formais com fabricantes e órgãos públicos, enquanto operações menores dependem de negociações pontuais e sofrem maior instabilidade (Mendes Campolina *et al.*, 2017; Carvalho *et al.*, 2025).

Essas questões também permitem estabelecer conexões entre aspectos normativos e outras dimensões relevantes, evidenciando a natureza multidisciplinar do tema, como a economia circular e o consumo responsável (Pirvu *et al.*, 2023). Nesse contexto, a gestão integrada de fluxos, pessoas e custos torna-se um diferencial competitivo essencial, permitindo às empresas alinhar eficiência operacional e sustentabilidade financeira (Oliveira Neto *et al.*, 2025).

Não apenas a integração dos fluxos, pessoas e custos deve ser considerada, mas também a integração observada entre recicladoras, fabricantes e órgãos públicos. Essas parcerias ampliam a eficiência da cadeia reversa e reduzem custos de transação (Vargas, Campos e Luna, 2023) e efetivam a rede de colaboração existente e grau de formalização dos fluxos (Correia *et al.*, 2024), que constitui o eixo operacional da circularidade, permitindo rastreabilidade, compartilhamento de dados e o desenvolvimento de novos modelos de negócio baseados em simbiose industrial (Mattos e Calmon, 2023b). No contexto brasileiro, tais articulações ainda enfrentam barreiras normativas e tecnológicas, mas representam oportunidades de fortalecimento competitivo e ambiental, alinhadas às diretrizes da PNRS e os acordos setoriais (De Souza *et al.*, 2016; Vargas, Campos e Luna, 2023; Oliveira Neto *et al.*, 2025).

A gestão dos REEE e os processos de tomada de decisões, diretamente relacionados à integração entre fluxos, pessoas e custos, influenciam as barreiras e caminhos para a implementação da EC e da RL no cenário atual, e se conectam em termos de questões políticas e legislativas (Bressanelli *et al.*, 2021).

A análise das barreiras e soluções no tratamento de REEE, devido a gama de temáticas que se relaciona, carece de uma análise sistêmica, e considerando

cada aspecto que interfere em cada barreira e solução pontuada. A ameaça de novos entrantes é restringida pelos altos custos de implantação e pela complexidade tecnológica dos processos. O poder de negociação dos fornecedores reflete a dependência das recicladoras por resíduos de qualidade e volume regular; já o poder de negociação dos clientes está relacionado à valorização dos materiais recuperados e à demanda por certificações ambientais. Os produtos substitutos, como a exportação de resíduos ou tecnologias de baixo custo, reduzem a competitividade das operações locais. Por fim, a rivalidade entre concorrentes é acentuada pela informalidade e pela fragmentação da cadeia, agravadas pela falta de padronização e incentivos fiscais. O Quadro 7 apresenta a forma como as cinco forças competitivas de Porter podem ser comparadas ao cenário apresentado, e principalmente, as barreiras predominantes que a análise da literatura em relação a essa lente teórica evidencia:

Quadro 7: Apresentação do embasamento teórico para análise das 5 forças de Porter em recicladoras de REEE

Força de Porter	Tipo de barreira predominante	Síntese analítica do entrave
Rivalidade entre concorrentes	Organizacional / Estrutural	A dinâmica competitiva do setor é marcada por baixa maturidade organizacional e operacional, com predominância de modelos lineares consolidados. A competição ocorre mais por conformidade regulatória e redução de custos do que por eficiência técnica, inovação ou adoção de práticas circulares e analíticas avançadas.
Poder de barganha dos fornecedores	Organizacional	A dependência de operadores logísticos, recicladores terceirizados e infraestrutura especializada limita a autonomia estratégica das empresas, restringindo sua capacidade de coordenação da cadeia reversa e de internalização de práticas mais complexas, como simulações e instrumentos analíticos.
Poder de barganha dos clientes	Institucional / Comportamental	O baixo engajamento do consumidor, aliado à preferência por produtos novos e à resistência à reparação e reutilização, compromete a previsibilidade de fluxos, a escala operacional e a viabilidade econômica de modelos circulares, reforçando estruturas lineares.
Ameaça de novos entrantes	Institucional / Econômica	Barreiras regulatórias complexas, custos de conformidade elevados, necessidade de articulação com múltiplos atores e dependência de acordos institucionais aumentam significativamente os

		obstáculos à entrada de novos operadores formais e tecnicamente estruturados.
Ameaça de substitutos	Econômica / Estrutural	Modelos lineares tradicionais permanecem como alternativas mais simples, difundidas e economicamente competitivas, atuando como substitutos dominantes frente a soluções circulares que demandam maior coordenação, investimento e mudança organizacional.
Fonte: Autora (2026)		

A superação dessas barreiras depende da ampliação de incentivos públicos, da difusão de certificações ambientais e da integração entre EC, LR e ferramentas de ACV, capazes de posicionar as recicladoras em níveis mais elevados de competitividade sustentável.

No contexto brasileiro, alguns trabalhos já evidenciaram barreiras críticas na recuperação de materiais de REEE, destacando fatores como falta de tecnologia, conhecimento técnico limitado, baixa eficiência na logística reversa, informalidade e problemas de governança (Oliveira Neto *et al.*, 2025). Isso é corroborado mesmo com a aplicação de entrevistas com stakeholders da cadeia de REEE para organizar os desafios encontrados por esse mercado (como gargalos da logística reversa, informalidade, gaps de design de produto e regulamentação frágil) em cinco categorias: logística, regulamentação, consumidor, mercado e design (Correia *et al.*, 2024).

Torna-se possível, portanto, estruturar uma análise entre empresas por meio do modelo de Porter, ancorada não apenas em evidências empíricas, mas também em diretrizes metodológicas consolidadas pela literatura. A aplicação das Cinco Forças de Porter ao setor de REEE transcende uma análise meramente mercadológica: cada força reflete tensões que se articulam com dimensões políticas e ambientais: as barreiras de entrada são moldadas por legislações como a PNRS e o Decreto nº 10.240/2020 (Brasil, 2020); os fornecedores, representados por cooperativas e tecnologias, revelam a interdependência entre inovação e inclusão social; os compradores, em sua busca por rastreabilidade e conformidade, reforçam o papel do ESG; os substitutos, vinculados ao descarte informal e às rotas ilegais, evidenciam fragilidades na implementação das políticas; e a rivalidade entre concorrentes expõe a disparidade entre empresas de diferentes portes e níveis de tecnologia.

Dessa forma, ao relacionar o modelo de Porter (Schiemer Vargas *et al.*, 2013) com a gestão sustentável de REEE, o estudo amplia a análise sobre como pressões institucionais, regulatórias e mercadológicas se entrelaçam no setor. Essa abordagem contribui para uma visão crítica da competitividade, integrando economia, política e sustentabilidade em um mesmo quadro analítico.

Em termos prospectivos, os planos e próximos passos do setor apontam para a digitalização dos processos, o uso de indicadores ambientais e o fortalecimento de sistemas de rastreabilidade e automação, em consonância com as políticas de economia circular e responsabilidade compartilhada. As empresas tendem a ampliar a integração entre logística reversa e ACV, adotando tecnologias de monitoramento e gestão ambiental mais sofisticadas (Curran, 2018). O investimento em inovação e capacitação técnica desponta como fator decisivo para elevar a eficiência operacional e o reaproveitamento de materiais de alto valor agregado. Assim, o setor caminha da gestão reativa de resíduos para uma abordagem preventiva e estratégica, fundamentada em dados e alinhada à sustentabilidade de longo prazo.

O papel decisor da ACV, reconhecida internacionalmente pelas normas ISO 14040 e 14044 (*Gestão Ambiental: Avaliação Do Ciclo De Vida: Princípios E Estrutura*, 2009b; *Gestão Ambiental: Avaliação Do Ciclo De Vida: Requisitos E Orientações*, 2009) consolida-se como instrumento essencial para mensurar e interpretar impactos ambientais de produtos, processos e serviços (Curran, 2018). Nesse contexto, o Apêndice 2 sistematiza a relevância dos 44 artigos aprovados essa RSL, explicitando de que forma cada estudo contribui, direta ou indiretamente, para a compreensão das dimensões analíticas adotadas nesta pesquisa. Embora a ACV não tenha sido incluída como termo explícito na string de busca, sua presença implícita, aplicação parcial ou implicação conceitual emerge de forma recorrente nos estudos analisados, sobretudo naqueles que discutem desempenho ambiental, eficiência operacional, rastreabilidade e tomada de decisão na gestão de resíduos eletroeletrônicos.

Embora a Avaliação do Ciclo de Vida seja amplamente reconhecida na literatura como um instrumento essencial de apoio à tomada de decisão ambiental, sua incorporação prática no contexto das recicladoras de REEE permanece limitada. A análise integrada dos 44 artigos selecionados na revisão sistemática evidencia que essa lacuna não decorre de uma fragilidade conceitual

ou metodológica da ACV em si, mas da combinação de desafios operacionais, organizacionais e institucionais que moldam a forma como as empresas estruturam seus processos, gerenciam informações e tomam decisões ambientais. Esses desafios emergem de maneira recorrente na literatura, manifestando-se ao longo de diferentes etapas da cadeia de reciclagem e condicionando, de forma direta, a viabilidade da aplicação sistemática da ACV no ambiente real das empresas (Pollard *et al.*, 2021; Rittershaus, Aryan e Renner, 2025).

Com base na análise de similaridades, recorrências e interdependências observadas nos estudos analisados, os principais desafios identificados na literatura foram organizados em três dimensões analíticas: operacional, organizacional e tecnológica, conforme sintetizado respectivamente nos Quadros 8, 9 e 10. Essa sistematização permite evidenciar que as limitações à aplicação da ACV não se concentram em um único nível de análise, mas resultam da sobreposição de fatores técnicos, estruturais e contextuais que atravessam as operações das recicladoras de REEE.

Quadro 8: Desafios operacionais à aplicação da ACV no contexto da reciclagem de REEE

Desafio operacional recorrente	Focos analíticos associados	Implicação direta para a ACV
Elevada heterogeneidade dos fluxos de entrada de REEE, com variação na origem, composição material, estado de conservação e presença de frações perigosas.	(2) Geração e caracterização dos resíduos	Dificuldade na definição de inventários representativos e aumento da incerteza nos dados de entrada da ACV.
Predominância de processos manuais de triagem e desmontagem, especialmente em empresas de pequeno porte, com forte dependência de experiência individual dos operadores.	(3) Práticas de separação e triagem; (6) Pessoas, papéis e treinamento	Variabilidade operacional elevada, dificultando a padronização de fluxos e a mensuração consistente de entradas e saídas.
Fragmentação dos fluxos internos e logísticos, com baixa coordenação entre coleta, transporte, armazenamento e tratamento dos resíduos.	(5) Fluxo interno e logística externa	Limitação na definição de fronteiras do sistema e dificuldade de integrar etapas do ciclo de vida na ACV.
Presença de informalidade em etapas iniciais da cadeia, especialmente na coleta e triagem primária.	(5) Fluxo interno e logística externa; (10) Barreiras e soluções	Comprometimento da rastreabilidade dos materiais e inviabilização de inventários completos de ciclo de vida.

Fonte: Autora (2026)

A predominância de desafios operacionais evidencia que a aplicação da ACV depende, em primeiro lugar, da estabilidade e da previsibilidade dos

processos produtivos. A heterogeneidade dos fluxos, a informalidade operacional e a baixa padronização comprometem a geração de dados consistentes, condição básica para a construção de inventários de ciclo de vida. No entanto, a literatura indica que, mesmo em contextos onde esses desafios são parcialmente mitigados, a ACV permanece pouco incorporada à rotina das empresas, sinalizando que as limitações extrapolam o nível estritamente operacional.

Quadro 9: Desafios organizacionais à aplicação da ACV no contexto da reciclagem de REEE

Desafio organizacional recorrente	Focos analíticos associados	Implicação direta para a ACV
Baixa maturidade organizacional e ausência de estruturas formais de gestão ambiental e de dados.	(1) Perfil da empresa; (7) Conformidade e documentação	Dificuldade de institucionalizar a ACV como prática contínua de apoio à decisão.
Deficiências na qualificação técnica da mão de obra e ausência de programas estruturados de capacitação.	(6) Pessoas, papéis e treinamento	Limitação na coleta, interpretação e uso estratégico dos dados ambientais.
Restrições financeiras e elevada pressão por viabilidade econômica de curto prazo.	(8) Custos, receitas e contratos	Priorização de decisões operacionais imediatas em detrimento do investimento em ferramentas analíticas como a ACV.
Falta de alinhamento entre estratégia organizacional, exigências regulatórias e práticas de economia circular.	(9) Parcerias e economia circular; (11) Planos e próximos passos	Aplicação fragmentada da ACV, sem integração aos sistemas de gestão e à tomada de decisão estratégica.

Fonte: Autora (2026)

Já os desafios organizacionais aprofundam essa limitação ao revelar que a ausência de estruturas formais de gestão, a fragilidade da capacitação técnica e as restrições financeiras reduzem a capacidade das recicladoras de transformar dados operacionais em informação estratégica. Nesse contexto, a ACV deixa de ser percebida como instrumento de apoio à decisão e passa a ser tratada como uma exigência externa ou uma ferramenta de uso pontual, reforçando a dificuldade de sua institucionalização nas práticas empresariais.

Quadro 10: Desafios tecnológicos à aplicação da ACV no contexto da reciclagem de REEE

Desafio tecnológico recorrente	Focos analíticos associados	Implicação direta para a ACV
Infraestrutura tecnológica limitada, com baixo nível de automação e mecanização nas etapas de triagem e processamento.	(4) Infraestrutura e tecnologia	Restrição à geração de dados confiáveis e repetíveis para alimentar inventários de ACV.
Ausência ou fragilidade de sistemas digitais de rastreabilidade dos fluxos materiais e documentais.	(4) Infraestrutura e tecnologia; (7) Conformidade e documentação	Dificuldade de vincular entradas, processos e saídas ao longo do ciclo de vida analisado.
Fragmentação e baixa interoperabilidade das bases de dados operacionais, ambientais e logísticas.	(4) Infraestrutura e tecnologia; (12) ACV (uso ou não)	Elevada complexidade na integração dos dados necessários à modelagem da ACV.
Usabilidade limitada das ferramentas de ACV e complexidade dos modelos analíticos disponíveis.	(12) ACV (uso ou não)	Redução da adoção da ACV como ferramenta operacional, restringindo seu uso a análises conceituais ou pontuais.

Fonte: Autora (2026)

Por fim, a dimensão tecnológica Quadro 10 atua como elemento transversal, amplificando tanto os desafios operacionais quanto os organizacionais. A ausência de sistemas integrados de rastreabilidade, a fragmentação das bases de dados e a baixa usabilidade das ferramentas de ACV dificultam a consolidação das informações necessárias à análise ambiental. Assim, mesmo quando existem esforços operacionais e organizacionais, a limitação tecnológica impede a tradução desses esforços em análises de ciclo de vida robustas e confiáveis.

Em conjunto, os resultados da revisão sistemática indicam que as limitações à aplicação da ACV no contexto da reciclagem de REEE não podem ser atribuídas a um único fator isolado. Trata-se de um fenômeno sistêmico, resultante da interação entre desafios operacionais, organizacionais e tecnológicos, que se reforçam mutuamente e moldam a forma como as recicladoras estruturam seus processos, gerenciam dados e tomam decisões ambientais. É a partir desse diagnóstico integrado que se justifica a construção do instrumento empírico adotado neste estudo, orientado a captar essas múltiplas dimensões no contexto real das empresas analisadas.

3. Método de pesquisa

Este capítulo tem como função apresentar e justificar os métodos científicos empregados no desenvolvimento da pesquisa. Dessa forma, esse capítulo apresenta o tipo de pesquisa, as abordagens empregadas e os procedimentos implementados. Contudo, antes, é necessário classificar, de modo geral, a configuração da pesquisa quanto à sua natureza, abordagem, objetivos e procedimentos.

Quanto à natureza, uma pesquisa pode ser básica (quando não apresenta aplicação prática) ou aplicada (quando as verdades e interesses são destinados a solução de um problema específico) (Gil, 2002). No presente estudo, a pesquisa é de natureza aplicada, pois seus resultados têm potencial de aplicação prática, contribuindo para a definição de parâmetros e diretrizes voltados à gestão sustentável de REEE.

Quanto aos seus objetivos, uma pesquisa pode ser classificada como normativa, explicativa, descritiva ou exploratória, como apresenta o *Quadro 11*:

Quadro 11: Classificação das pesquisas científicas quanto aos seus objetivos.

Tipo de pesquisa	Características
Exploratória	Proporciona familiaridade com o problema, tornando-o mais explícito ou a construir hipóteses.
Descritiva	Objetiva a descrição de um fenômeno ou população, com foco na observação, registro e análise dos aspectos descritos, sem, necessariamente, buscar explicações para eles.
Explicativa	Busca identificar os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos, compreendendo as causas e efeitos, indo além da simples descrição.
Normativa	Procura definir padrões ou normas de comportamento, estabelecendo critérios para a análise e a avaliação de fenômenos, com base em estudos e pesquisas já realizados.

Fonte: Adaptado de Sousa e Miguel (2012)

Considerando que a pesquisa permitirá aprofundar o entendimento sobre um fenômeno pouco estudado, neste caso, a atuação de três empresas específicas no contexto da sustentabilidade e da logística reversa de resíduos eletrônicos, o presente estudo é classificado como exploratório.

Portanto, o presente estudo é classificado como aplicado, exploratório e qualitativo, não tendo como objetivo a realização de uma ACV, mas sim a análise de suas condições de aplicação no contexto das recicladoras.

3.1. Classificação da Pesquisa

Uma das principais características da pesquisa do estudo de caso é o seu enfoque nos aspectos qualitativos, dando ênfase à interpretação e compreensão dos fenômenos estudados, considerando, ainda, o contexto real do fenômeno analisado (Prodanov, 2012). Ao contrário das abordagens quantitativas, que se baseiam em dados numéricos e estatísticas, a pesquisa qualitativa busca uma análise mais profunda e contextualizada. Além disso, a pesquisa de estudo de caso possibilita a consideração de múltiplos fatores que podem influenciar o fenômeno estudado, como o contexto social, cultural e histórico. Dessa forma, essa metodologia é especialmente útil para investigar fenômenos complexos e multidimensionais, contribuindo para uma compreensão mais rica e holística do objeto de estudo (Miguel, 2007).

Os estudos de caso podem ser classificados em diferentes tipos, dependendo dos objetivos da pesquisa. Na fase de exploração, eles são usados para desenvolver ideias e perguntas iniciais, ajudando a direcionar a investigação. O método de construção de teoria, ou explicativo, é particularmente eficaz para identificar variáveis-chave, suas conexões e explicar o motivo dessas ligações. Já o teste de teoria utiliza estudos de caso, muitas vezes em combinação com inquéritos, para testar questões complexas, podendo até refutar uma teoria ou revelar suas limitações. Finalmente, o método de extensão ou refinamento de teoria usa os casos para ajustar e estruturar teorias existentes com base nas novas observações, explorando os limites de sua aplicação (Miguel, 2007). Dessa forma, o presente estudo de caso é caracterizado como exploratório, pois busca aprofundar a investigação em contextos reais específicos. A presente pesquisa, portanto, adota o método de estudo de caso múltiplo, de natureza exploratória, com abordagem qualitativa (Yin, 2014).

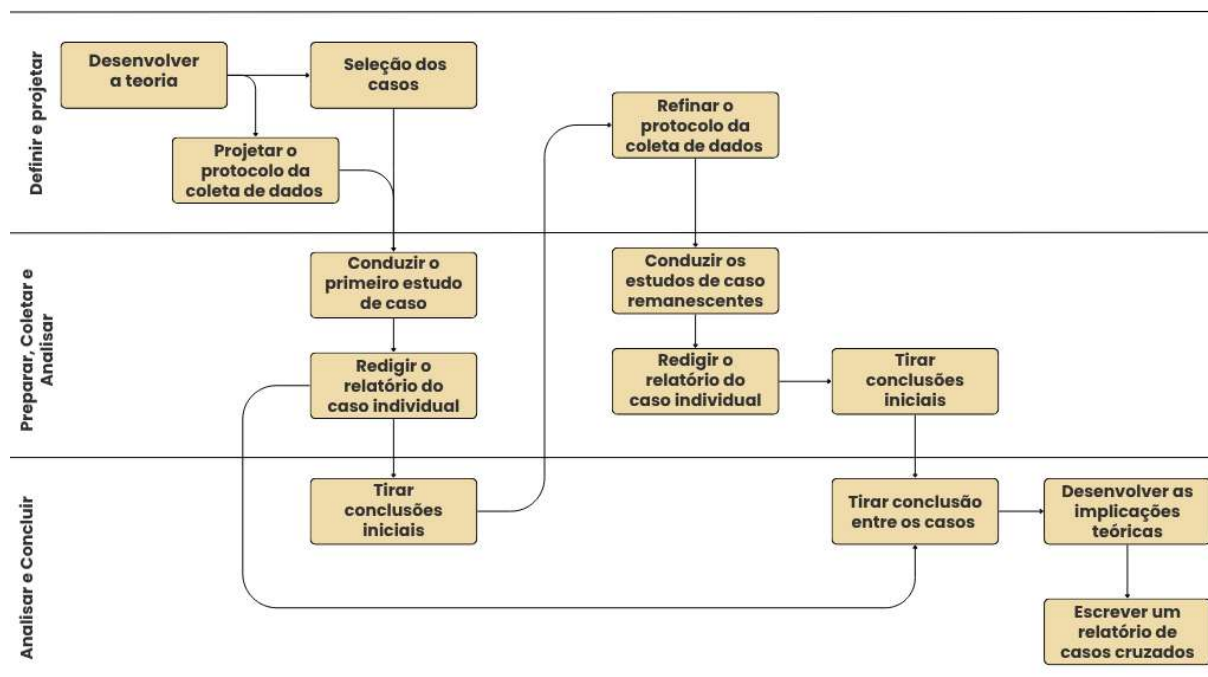
3.2. Condução do Estudo Múltiplo de Casos

De forma operacional, o desenvolvimento do estudo de casos múltiplos seguiu as etapas metodológicas clássicas propostas por Yin (2014). Inicialmente, foi definido o desenho do estudo, delimitando-se a unidade de análise, o escopo empírico e o caráter exploratório da investigação. Na sequência, foi realizada a seleção intencional dos casos, orientada pelo princípio

da replicação teórica, buscando empresas com perfis organizacionais distintos, capazes de revelar padrões convergentes e contrastantes quanto às condições de adoção da ACV. A coleta de dados foi conduzida a partir de um protocolo comum, aplicado de forma sistemática em todos os casos, de modo a assegurar consistência e comparabilidade entre as evidências empíricas. Os dados foram coletados entre dezembro de 2023 e junho de 2025, por meio da realização de entrevistas semiestruturadas, observações diretas durante visitas técnicas e análise documental. Ao todo, foram realizadas 09 entrevistas distribuídas entre as três empresas participantes do estudo, permitindo a obtenção de diferentes perspectivas sobre os processos de gestão, logística reversa, tratamento e comercialização de resíduos eletroeletrônicos.

Os participantes entrevistados ocupavam funções estratégicas, gerenciais e operacionais diretamente relacionadas às atividades de reciclagem e gestão de REEE. Entre os entrevistados encontravam-se proprietários, gestores, responsáveis técnicos, supervisores operacionais e colaboradores envolvidos nos processos de triagem, armazenamento, processamento e comercialização dos resíduos.

Por fim, a análise dos dados foi realizada em dois níveis: inicialmente, por meio de uma análise intra-caso, voltada à compreensão aprofundada das características e dinâmicas específicas de cada empresa; e, posteriormente, por meio de uma análise cruzada dos casos, permitindo a identificação de padrões, contrastes e recorrências relevantes para o atendimento aos objetivos da pesquisa, como apresentado na Figura 6:

Figura 6: Condução do Estudo Múltiplo de casos desenvolvido

Fonte: Adaptado de Yin (2014).

O desenvolvimento da teoria orientou tanto a seleção dos casos quanto a elaboração do protocolo de coleta de dados. Como o fenômeno central investigado envolve práticas de LR e a gestão de REEE, definiu-se que o estudo abrangeria os fluxos de resíduos de pré-consumo (ou pós-venda) e pós-consumo (ou fim de vida útil), bem como as etapas de triagem, armazenamento, destinação final e reintegração de materiais na cadeia produtiva. Nesse contexto, estabeleceu-se que a unidade de análise corresponderia às operações de LR de empresas recicladoras cujo principal resíduo tratado fosse o REEE. Assim, a recicladora poderia processar outros tipos de resíduos, independentemente de sua origem (pós-uso ou pós-fábrica), desde que sua atividade prioritária estivesse direcionada ao tratamento de REEE.

Os casos selecionados foram, portanto, definidos de forma intencional, condicionados à presença de processos de separação de resíduos em recicladoras de REEE, com ou sem máquinas. Considerando que a separação e a triagem dos resíduos eletrônicos constituem a etapa inicial do processamento e uma condição mínima para promover a circularidade (Serpe et al., 2025), e que a ausência de processos completos de separação representa uma barreira crítica no setor formal de reciclagem de REEE (Patouillard et al., 2019; Ferronato

et al., 2020), definiu-se que a seleção dos casos ocorreria de forma intencional, com base na relevância teórica e no contraste de porte empresarial.

Também de forma intencional, foi definido que não seriam aceitas recicladoras que não dispunham de equipamentos e/ou estruturas básicas de segregação, como caçambas, baias ou bags para separar corretamente esses resíduos, pois, sem tais condições todo o processo subsequente de tratamento seria inviabilizado. Com base nisso, as quatro perguntas aplicadas no processo de elegibilidade das recicladoras selecionadas para participarem do estudo estão apresentadas no *Quadro 12*:

Quadro 12: Justificativa e relevância das questões de elegibilidade das empresas elencadas a participarem do estudo

Pergunta	Justificativa
P1.Q1. Qual o tipo de resíduo tratado pela empresa?	Justificativa: Identificar o tipo de resíduo tratado é o primeiro passo para compreender o escopo de atuação da empresa, já que cada fluxo (plásticos, metais, placas de circuito, eletrodomésticos, baterias, etc.) exige rotas específicas de separação, tratamento e valorização (Da Silva Müller Teixeira <i>et al.</i>, 2021). Relevância: Permite classificar as empresas de acordo com seu foco de atuação e comparar práticas entre diferentes fluxos de resíduos, assegurando consistência na análise da logística reversa e gestão de REEE (Pollard <i>et al.</i>, 2021; Guzzo <i>et al.</i>, 2022; Correia <i>et al.</i>, 2024; Rittershaus, Aryan e Renner, 2025).
P1.Q2. A empresa possui algum processo de separação de resíduos sólidos (mesmo que de forma manual)?	Justificativa: A triagem inicial é condição mínima para viabilizar a circularidade e garantir rotas adequadas de reciclagem e reuso (Pollard <i>et al.</i>, 2021; Correia <i>et al.</i>, 2024; Malik <i>et al.</i>, 2024). Relevância: Permite identificar se a empresa cumpre o requisito básico para participar da pesquisa, já que processos ineficientes comprometem a confiabilidade da gestão de resíduos
P1.Q3. Existe algum espaço físico dedicado ao armazenamento temporário ou à triagem de resíduos? Como ele está organizado?	Justificativa: Áreas adequadas de armazenamento evitam riscos ambientais e de saúde, garantindo confiabilidade no processo de gestão (Cordisco, Melloni e Botti, 2022). Relevância: Mostra o nível de infraestrutura disponível para gerenciar resíduos e evidencia se a empresa segue padrões de segurança e circularidade (Pollard <i>et al.</i>, 2021; Prajapati, Narayan Vaidya e Kumar, 2022; Mosora <i>et al.</i>, 2023).
P1.Q4. A empresa já utiliza máquinas, equipamentos ou tecnologias específicas para auxiliar na separação dos resíduos? Se sim, quais?	Justificativa: O uso de tecnologias de separação melhora a eficiência, aumenta a recuperação de materiais valiosos e reduz riscos operacionais (Cordisco, Melloni e Botti, 2022). Relevância: Indica o grau de modernização e inovação da empresa, além de mostrar se ela está alinhada com tendências de economia circular (Ramprasad <i>et al.</i>, 2022; Guo, 2025; Rittershaus, Aryan e Renner, 2025).

Fonte: Autora (2026)

3.3. Método de análise dos resultados

Inicialmente, as entrevistas foram transcritas e submetidas a leituras sucessivas para familiarização com o conteúdo. Em seguida, realizou-se a codificação manual dos dados, identificando unidades de significado relacionadas aos objetivos da pesquisa. Os códigos obtidos foram agrupados em categorias analíticas previamente definidas a partir dos resultados da RSL, especialmente dos focos analíticos apresentados no Quadro 6. Esse procedimento permitiu organizar de forma sistemática as evidências empíricas e estabelecer relações entre os achados observados e o referencial teórico adotado. Após a organização e interpretação dos dados empíricos segundo esses focos analíticos, os resultados obtidos foram comparados de forma sistemática com os achados teóricos sintetizados nos Quadros 7 a 10, que consolidam os principais desafios operacionais, organizacionais e tecnológicos identificados na literatura. Essa etapa de comparação teve como objetivo verificar em que medida os padrões observados nas empresas estudadas convergem, divergem ou aprofundam os resultados previamente identificados na RSL. Além da comparação com a literatura, foi adotada a triangulação de fontes de evidência, combinando informações provenientes das entrevistas, observações diretas realizadas durante as visitas técnicas, documentos fornecidos pelas empresas e resultados obtidos na RSL. Esse procedimento permitiu confrontar diferentes perspectivas sobre os mesmos fenômenos investigados, aumentando a consistência das interpretações realizadas e reduzindo possíveis vieses decorrentes da utilização de uma única fonte de dados.

Esse procedimento analítico permitiu não apenas confrontar teoria e prática, mas também identificar especificidades contextuais das empresas analisadas, evidenciando como os desafios descritos na literatura se manifestam, se combinam ou assumem diferentes intensidades no contexto empírico investigado. Dessa forma, a análise contribuiu para fortalecer a validade interna do estudo e para aprofundar a compreensão dos fatores que condicionam a aplicação da ACV no contexto da reciclagem de REEE. Esse procedimento analítico permitiu não apenas confrontar teoria e prática, mas também identificar especificidades contextuais das empresas analisadas, evidenciando como os desafios descritos na literatura se manifestam, se combinam ou assumem

diferentes intensidades no contexto empírico investigado. A validade interna da pesquisa foi fortalecida por meio da triangulação entre diferentes fontes de evidência e da comparação sistemática dos resultados empíricos com os achados da literatura, conforme recomendado para estudos de casos múltiplos. Dessa forma, a análise contribuiu para aprofundar a compreensão dos fatores que condicionam a aplicação da ACV no contexto da reciclagem de REEE.

4. Resultados

4.1. Perfil das empresas

A Empresa A é uma microempresa familiar com 13 anos de atuação e baixo capital, inserida em um setor altamente fragmentado e dominado por pequenos e médios operadores regionais, com processos majoritariamente manuais.

A Empresa B, em contraste, integra um grupo multinacional de gestão ambiental presente em 40 países. A empresa é reconhecida por seu crescimento expressivo e valorização de ações em 2021, atuando com foco em sustentabilidade, inovação e expansão internacional, oferecendo soluções integradas em gestão ambiental e resposta a emergências.

Já a Empresa C é de porte intermediário e surgiu em 2020, fundada por um professor de física que iniciou as atividades com sucata de ferro durante a pandemia. Ao perceber o potencial dos resíduos eletroeletrônicos, ampliou o negócio, estruturando uma operação com 22 funcionários distribuídos entre os setores de carga e descarga, triagem, desmontagem, estoque e separação de materiais para venda ou reuso. O Quadro 13 apresenta uma síntese comparando essas três empresas:

Quadro 13: Comparação do perfil das empresas A, B e C.

Aspectos	Empresa A	Empresa B	Empresa C
Natureza	Micro familiar	Associada a uma multinacional	Empresa em crescimento e consolidação
Estrutura	Estrutura reduzida e recursos limitados	Maior estrutura tecnológica e institucional	Investindo em tecnologia
Atuação	Local, voltada à triagem inicial de resíduos	Forte foco em conformidade ambiental e rastreabilidade	Foco específico em REEE
Estratégia	Triagem inicial de resíduos	Conformidade e rastreabilidade	Expansão de processos de logística reversa

Fonte: Autora (2026)

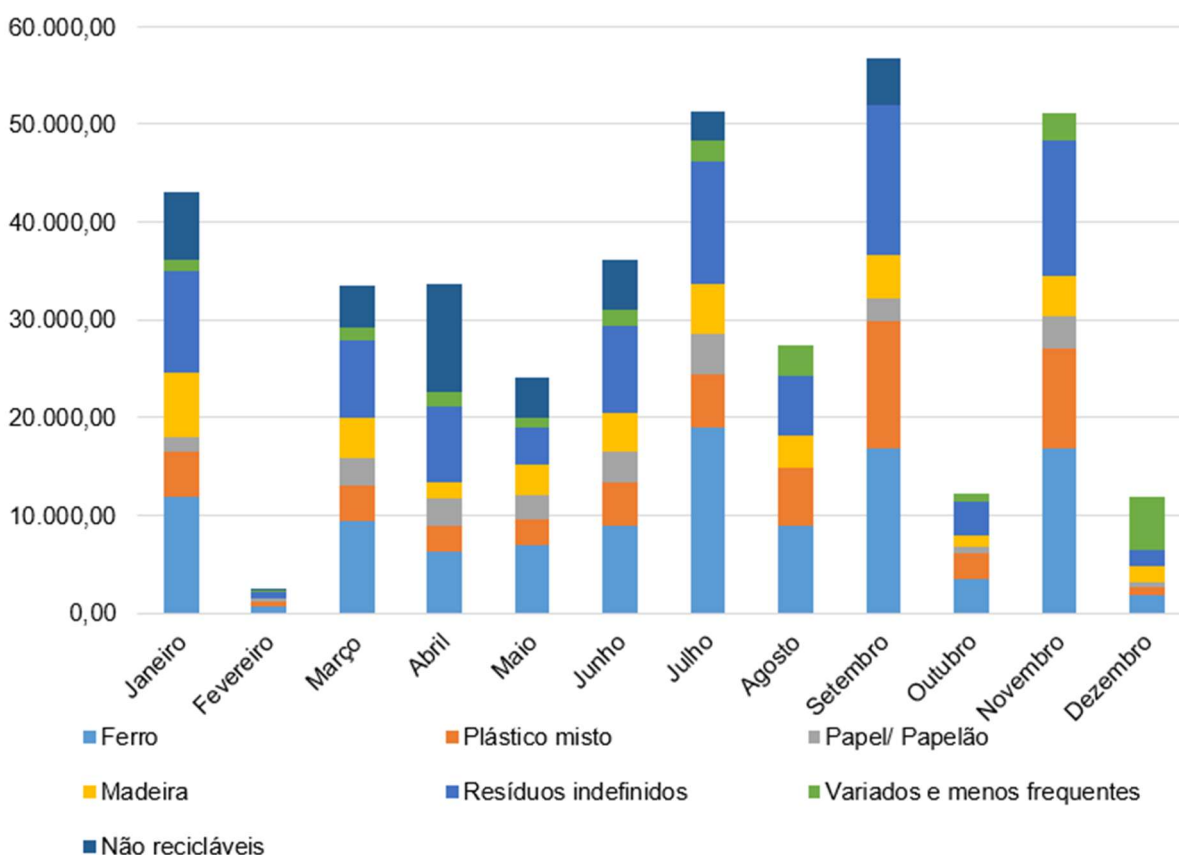
4.2. Geração e caracterização de resíduos

No que se refere à geração e caracterização dos resíduos, a Empresa A atua principalmente com equipamentos de informática, cabos, fios e sucatas metálicas, adquiridos de pessoas físicas e jurídicas. A caracterização é feita pela classificação dos materiais em grupos de valor agregado: os resíduos de alto valor, como cobre puro e processadores; os intermediários, como fios grossos e

placas de notebook; os de baixo valor, como monitores tubo e sucatas mistas; e os de muito baixo valor, como fios de rede e plásticos leves. Observa-se que a maior parte dos resíduos recebidos se concentra nos grupos de baixo e muito baixo valor agregado, o que reforça a necessidade de processar grandes volumes para garantir a viabilidade econômica da atividade.

Na empresa B, foi possível observar o tratamento de uma grande variedade de resíduos, relacionada às diferentes fontes de fornecimento, que podem ser de operações pós fábrica ou pós consumo. A empresa trata, principalmente, equipamentos elétricos e eletrônicos de médio e pequeno porte, e consegue reinserir 99% dos componentes presentes nos REEE tratados após todas as etapas de trituração e separação, com quantidades significativas de madeira, plástico misto e papelão em toneladas, como apresenta a Figura 7 e detalhada na Tabela 1.

Figura 7: Tipos de resíduos obtidos por mês através do tratamento dos REEE pela empresa B em 2023



Fonte: Autora (2026)

Enquanto a Figura 7 apresenta a visão geral dos resíduos tratados mensalmente, a Tabela 1 aprofunda essa análise ao identificar aqueles de ocorrência menos frequente, mas que possuem impacto relevante na operação e na produtividade. Essa diferenciação possibilita uma compreensão mais precisa das flutuações na composição dos materiais e de suas implicações para o desempenho da empresa.

Tabela 1: Quantificação dos resíduos variáveis obtidos com o tratamento dos REEE em 2023 na empresa B

Resíduos definidos como menos frequentes	Mês	Quantidade (kg)	Relação ao total de resíduos obtidos no mês
Bobina de transformador	Fevereiro	169,74	6,61%
	Abril	1.642,99	4,89%
	Junho	1.687,77	4,66%
	Julho	2.169,86	4,22%
Ferro com metal	Dezembro	5.467,00	42,98%
Plástico ABS Colorido	Fevereiro	93,36	3,63%
	Maior	1.148,72	4,75%
Bateria de ion lítio – Tipo LCD	Agosto	1.612,50	20,58%
Alumínio misto	Janeiro	1.211,86	2,81%
	Março	1.332,44	3,97%
	Agosto	1.585,50	5,49%
	Outubro	781,00	5,63%
	Novembro	2.853,43	5,09%

Fonte: Autora (2026)

Na empresa B, portanto, ao longo de 2023, foi possível observar a variabilidade nos índices de reciclabilidade e produtividade. Alguns meses, como agosto, outubro e dezembro, alcançaram 100% de reciclabilidade, demonstrando uma gestão extremamente eficaz dos resíduos. Contudo, meses como abril e janeiro enfrentaram desafios que impactaram negativamente os índices de reciclabilidade. Analisar detalhadamente cada mês pode ajudar a identificar padrões e implementar melhorias contínuas na gestão de resíduos, promovendo uma maior eficiência e sustentabilidade. A empresa tratou cerca de 399.531,83 kg de REEE, sendo que houve uma variação considerável no número de carregamentos e no peso de resíduos tratados mês a mês. Nos meses de julho, novembro e agosto registraram-se valores mais elevados, enquanto fevereiro e dezembro apresentaram índices relativamente baixos. Apesar das

variações, observa-se uma tendência geral de crescimento, sugerindo um compromisso contínuo com a gestão responsável dos resíduos eletrônicos.

A empresa C, por sua vez, recebe resíduos provenientes de diferentes fontes, como lotes adquiridos, pós-consumo de pessoas físicas e jurídicas e contratos formais de logística reversa com a indústria, incluindo a linha branca. No momento da entrada, cada carga passa por pesagem e registro fotográfico, assegurando maior controle sobre o fluxo. A caracterização inicial permite identificar os materiais de maior valor agregado, como placas eletrônicas, que são posteriormente destinadas à exportação, enquanto plásticos e fios/induzidos seguem para empresas nacionais. O volume de resíduos apresenta forte sazonalidade, com aumento significativo no final e início de cada ano e queda perceptível nos meses intermediários.

O Quadro 14 sintetiza os principais pontos observados entre as empresas A, B e C quanto a geração e caracterização dos resíduos:

Quadro 14: Comparativo entre a geração e caracterização de resíduos pelas empresas A, B e C.

Aspectos Avaliados	Empresa A	Empresa B	Empresa C
Fontes de resíduos	Pessoas físicas e jurídicas (pequenos volumes)	Pós-fábrica e pós-consumo (altos volumes)	Lotes comprados, pós-consumo, contratos de logística reversa
Tipos predominantes de resíduos	Equipamentos de informática, cabos, fios, sucatas metálicas	Equipamentos elétricos e eletrônicos de médio e pequeno porte	Placas eletrônicas, plásticos, fios/induzidos; resíduos diversos conforme contratos
Classificação / caracterização	Classificação por valor agregado: alto, médio, baixo e muito baixo	Detalhamento mensal por tipo de resíduo; grande diversidade	Identificação dos materiais na entrada (com pesagem + foto)
Resíduos de maior valor	Cobre puro, processadores	Componentes eletrônicos recuperáveis (99% reinserção)	Placas eletrônicas (destinadas à exportação)
Resíduos de baixo valor	Fios de rede, plásticos leves; maioria do volume recebido	Madeira, plástico misto, papelão em grandes toneladas	Plásticos e fios enviados a empresas nacionais
Variabilidade dos resíduos	Baixa diversidade → predominância de materiais de baixo valor	Alta variabilidade mensal (bobinas, ABS, lítio, alumínio, ferro)	Forte sazonalidade: picos no início e fim do ano
Volume dos resíduos	Viabilidade depende de grandes volumes devido ao baixo valor agregado	~399.531 kg em 2023; flutuações mensais significativas	Volume varia com contratos e sazonalidade regional
Eficiência / reciclabilidade	Baixa previsibilidade (predomínio de	Até 100% de reciclabilidade em	Depende do mix de entrada; foco em

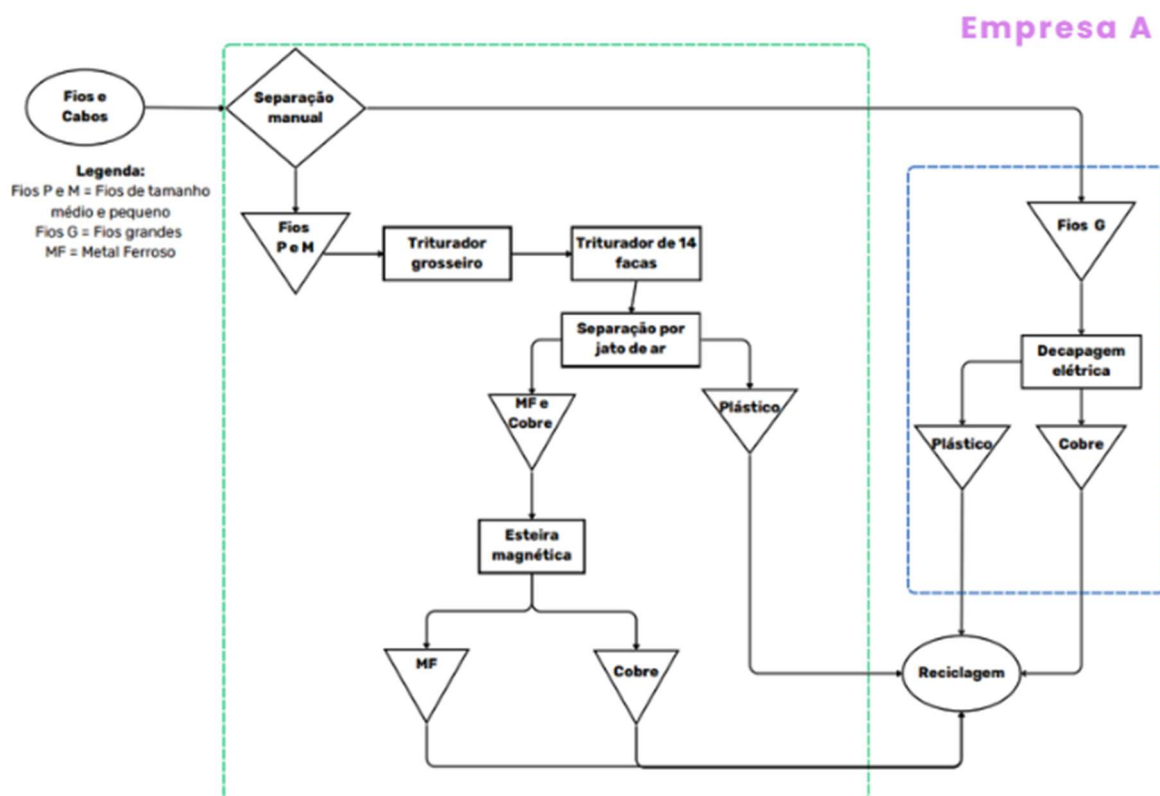
	materiais pouco valiosos)	meses de melhor desempenho	triagem e rastreabilidade
Controles de entrada	Classificação manual por grupos de valor	Rastreamento por relatórios e registros operacionais	Pesagem + registro fotográfico; rastreabilidade via sistema interno

Fonte: Autora (2026)

4.3. Práticas de separação e triagem

As práticas de triagem e separação de resíduos pela empresa A ocorrem de forma manual, e apenas os cabos e fios são triturados e separados com apoio de equipamentos. O processo de separação do plástico para o cobre presente nos fios grossos, como na área azul da Figura 8, consiste na separação da parte plástica para a extração do cobre do centro do fio, obtendo um cobre com maior nível de pureza, enquanto os fios finos e médios passam por diversas etapas até que os resíduos estejam devidamente separados e possam ser efetivamente destinados.

Figura 8: Operações de separação de REEE e tratamento de cabos e fios na empresa A.



Fonte: Autora (2026)

O processo de trituração e granulação de fios e cabos médios e finos, por sua vez, é iniciado com os resíduos sendo colocados em uma esteira, que leva os fios e cabos até um triturador ou granulado grosseiro que fragmenta os fios em pedaços, conforme ilustrado na área verde da Figura 8. Em seguida, os pedaços menores são colocados no Triturador de 14 facas, sendo 4 fixas e 10 móveis, responsáveis por moer os fragmentos gerados, tornando-os em frações mínimas, como apresenta a Imagem 1:

Imagem 1: Foto dos fios e cabos moídos antes da separação



Fonte: Autora (2026)

Após a moagem fina, o material triturado passa por uma etapa de separação a seco que utiliza fluxos de ar controlados (separador pneumático) para separar as frações mais leves, como plásticos, das frações mais pesadas, como cobre. Este processo permite uma triagem eficiente por diferença de peso específico, dispensando o uso de água ou produtos químicos. Para finalizar, após a separação a seco, o resíduo restante passa por uma esteira metálica que vai separar o cobre do metal ferroso. Em seguida, as frações de resíduo separadas são encaminhadas para reciclagem ou comercialização.

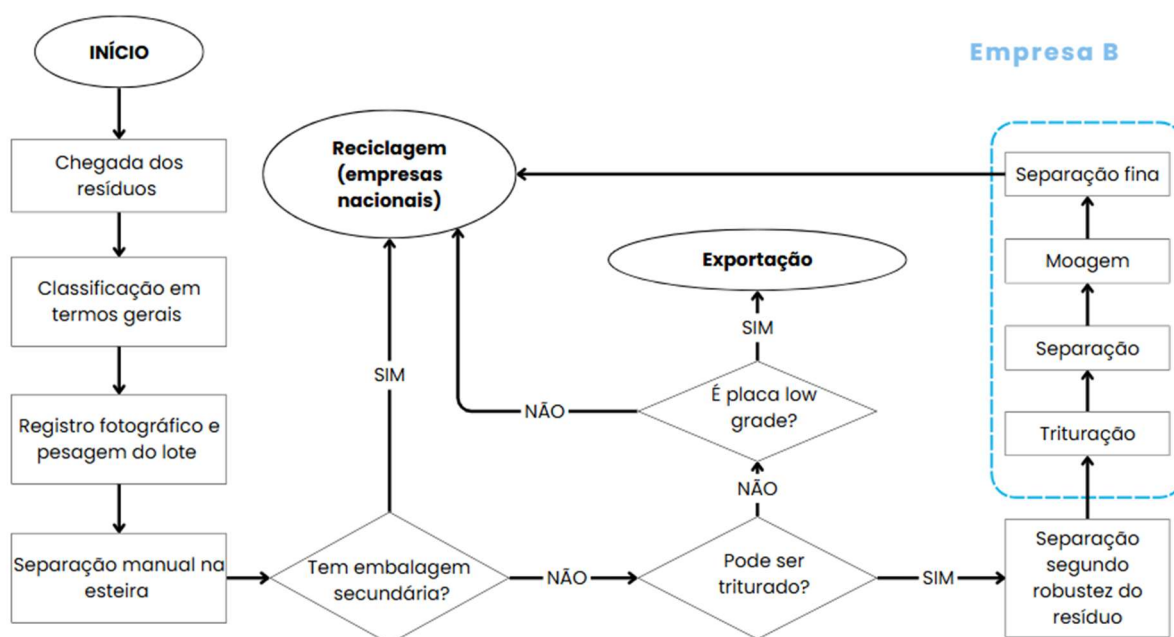
Na empresa B, apenas a primeira etapa de separação é manual, como apresentado, entre as embalagens (que são destinadas a reciclagem) e os resíduos, que são colocados na esteira, onde é realizada a separação dos resíduos:

- Cartuchos, baterias, pilhas e resíduos que não podem ser triturados;

- Embalagens secundárias;
- Cabos e fios;
- Equipamentos muito robustos;
- Equipamentos pouco robustos.

Considerando que cartuchos, baterias, pilhas e resíduos que não podem ser triturados e que embalagens secundárias não precisam de tratamento para serem destinados à reciclagem, todos são enviados direto para reciclagem. Dessa forma, ao final da esteira, portanto, restarão cabos e fios, equipamentos muito robustos e equipamentos pouco robustos, como apresenta a Figura 9:

Figura 9: Processo de separação e triagem inicial realizados pela empresa B.



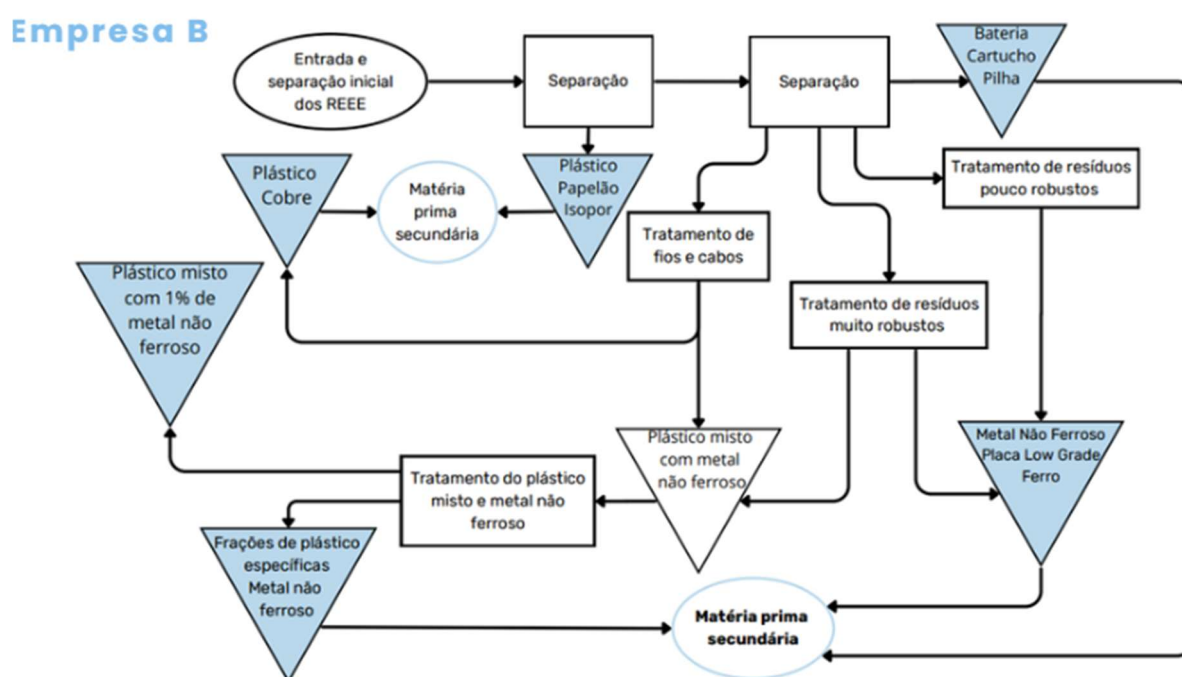
Fonte: Autora (2026)

Os resíduos que vão para a separação segundo a robustez do resíduo seguem três linhas de processamentos, de modo geral, todos envolvem as etapas de trituração, separação, moagem e separação fina para serem destinados para empresas nacionais onde serão reinseridos para uso.

Todo resíduo de cabos e fios vão para as linhas de processamento específicas, e são operados de forma semelhante ao que ocorre na empresa A,

como no fluxo delimitado pela linha tracejada verde da Figura 8. Os demais REEE são categorizados como muito robustos ou pouco robustos, e seguem linhas de tratamento semelhantes, se diferenciando principalmente, pela quantidade de processamento (trituração e granulação). As matérias primas geradas em cada uma dessas duas linhas de processamento são semelhantes, como apresenta o fluxograma exposto na Figura 10:

Figura 10: Fluxograma representativo das matérias primas obtidas após o tratamento dos REEE pela empresa B.



Fonte: Autora (2026)

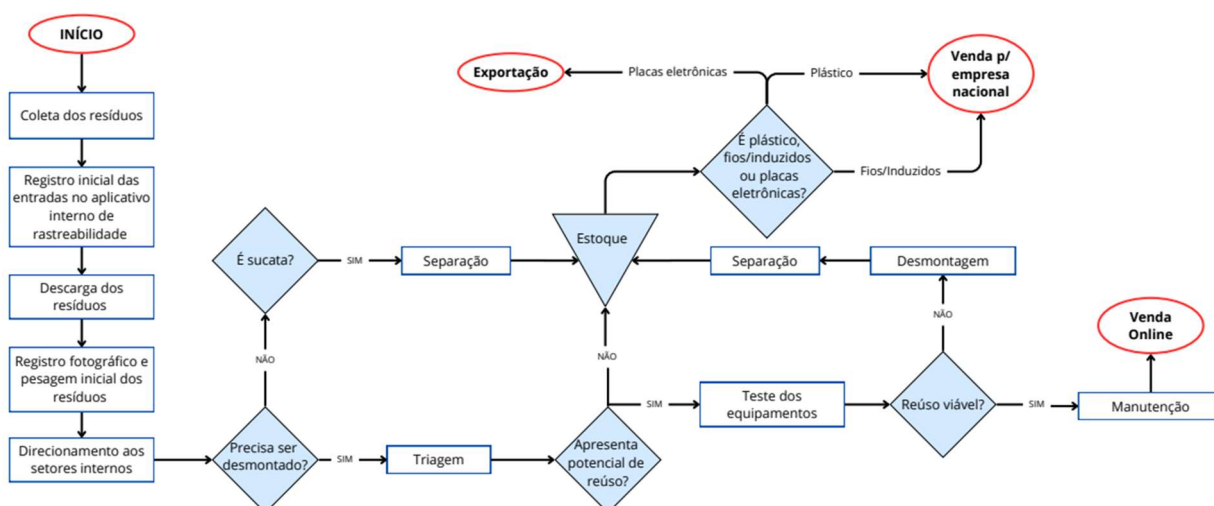
Como apresentou a Figura 10, por meio das diversas linhas de processamento de REEE a empresa B obtém diversas matérias primas secundárias limpas a partir de seus processos, e a única fração de resíduos impuros que a empresa ainda não destina corretamente é composta de plástico misto com metal não ferroso, mantido em um depósito próximo ao centro de tratamento de REEE até que encontrem uma solução para reutilização desse composto.

A empresa C, diferentemente das outras, tem seu processo iniciado por meio da coleta de resíduos, que podem ser comprados por lotes (o que não é um costume das demais), resíduos de pós consumo direto (de pessoas físicas

ou jurídicas) ou obtidos por meio dos contratos de logística reversa com indústria, como acontece com a linha branca de uma empresa que envia os resíduos para a empresa C realizar todo o processo de logística reversa.

Após esse momento, os fluxos internos têm início, como apresenta Figura 11, e as entradas são registradas no aplicativo interno de rastreabilidade, ferramenta que permite cadastrar o cliente e o material recebido no ato da entrega. Na sequência, ocorre a descarga dos resíduos, acompanhada de registro fotográfico e pesagem inicial, o que garante maior controle interno e transparência no fluxo. Após essa etapa, os resíduos são direcionados aos setores internos, onde seguem diferentes caminhos conforme suas características.

Figura 11: Fluxograma representativo das etapas de separação e triagem da empresa C.



Fonte: Autora (2026)

Os resíduos são então classificados conforme a necessidade de desmontagem. Os que precisam ser desmontados vão para a triagem, onde serão analisados segundo seu potencial de reuso: os que têm esse potencial constatado, passarão por manutenções e em seguida, serão colocados à venda. Os que não apresentam potencial de reuso, serão desmontados, separados e então vendidos a empresas que irão completar o ciclo da logística reversa, reutilizando os materiais obtidos pós desmontagem e separação.

Nessa etapa, os plásticos e fios/induzidos são encaminhados para empresas nacionais, enquanto as placas eletrônicas, por possuírem maior valor

agregado, são exportadas principalmente para o Japão. Por outro lado, os resíduos que não necessitam de desmontagem podem ser direcionados diretamente para a etapa de separação, sendo armazenados em estoque temporário até o momento da expedição ou enviados de imediato aos seus destinos finais. Esses materiais, uma vez classificados, podem seguir para a venda a empresas nacionais ou para exportação, de acordo com seu valor econômico. Além disso, quando há exigência de rastreabilidade documental por parte dos clientes, os resíduos são enviados a destinadores industriais homologados, com a devida emissão de Manifesto de Transporte de Resíduos (MTR) e notas fiscais, assegurando a conformidade com a legislação ambiental vigente.

4.4. Infraestrutura e tecnologia

A empresa A conta com dois equipamentos no tratamento de cabos e fios: o primeiro é utilizado apenas para fios e cabos grossos, com uma operação única: o fio passa apenas pelo decapador e dessa forma, a proteção do cobre já sai totalmente separada, obtendo um material com alto grau de pureza.

Já o segundo equipamento é um triturador e granulador de resíduos metálicos sólidos com alimentação automática, destinado à redução de tamanho de cabos, fios e sucatas leves para posterior separação e reciclagem de metais não ferrosos. Com potência instalada de 49,1 kW, o V-S30 é dotado de tremonha de alimentação ampla, câmara de corte com rotor de facas, esteiras transportadoras para alimentação e descarga, além de painel de comando elétrico modelo, equipado com inversores, indicadores de vibração, sucção, separadora e controles de esteiras e ar, garantindo maior automação e precisão operacional.

A empresa A adquiriu esse equipamento no início de 2025, correspondente à linha delimitada pela região verde do fluxograma, o que amplia sua capacidade de processamento, sobretudo para materiais de baixa tensão. Contudo, a organização relatou que não possui um controle fixo da produtividade por hora ou por dia, uma vez que o rendimento varia significativamente conforme o tipo de material tratado. Por exemplo, cabos de rede, por serem mais leves, apresentam menor rendimento volumétrico, enquanto cabos de força, como o denominado “duas capas e cobre”, que possuem duas camadas de plástico

isolante e cobre de maior pureza, são mais densos e garantem melhor recuperação de material metálico. Além disso, dependendo das características do resíduo, como a presença de borrachas mais pesadas, é comum que o material precise ser submetido a uma nova moagem, garantindo a separação adequada entre o cobre e o plástico residual. Logo, é necessário pontuar que toda a logística interna da empresa ainda está em processo de adaptação e girando em torno do volume de fios e cabos para processamento, da disponibilidade de uma única operadora para operar o equipamento.

A empresa B, por sua vez, conta com diversos equipamentos e alto grau de tecnologia em seus processos. Para sistematizar os recursos utilizados e evidenciar o nível de automação e especialização das operações, o Quadro 15 apresenta uma síntese dos principais equipamentos empregados, bem como suas respectivas funções no processamento e na recuperação de materiais.

Quadro 15: Equipamentos de tratamento de REEE presentes na empresa B

Equipamento	Funcionalidade
Trituradores de diferentes intensidades	Estes equipamentos são utilizados para a trituração dos REEE. A empresa possui mais de um triturador e organiza seu uso considerando a robustez e a dureza dos equipamentos.
Moinho martelo	Usado para a fragmentação de materiais por impacto. Contém martelos que giram em alta velocidade, quebrando o material em partículas finas.
Moinho faca	Utilizado para a trituração de materiais plásticos e borrachas, cortando-os em pequenos pedaços.
Separadores magnéticos	A empresa conta com três tipos de separadores magnéticos, utilizados para remover metais ferrosos de diferentes fluxos de materiais durante o processo de reciclagem: i) Separador que ele remove automaticamente metais ferrosos enquanto o material se desloca na correia transportadora; ii) Separador com ímãs que captura partículas metálicas muito pequenas e de difícil separação; iii) Separador com operação baseada na atração magnética, atuante na separação de metais ferrosos em materiais mais homogêneos ou em etapas finais de limpeza.
Separador com vibração	Funciona gerando correntes de Foucault que causam a repulsão de metais não ferrosos, separando-os de materiais como plásticos e vidros.
Separador por leitura ótica	Utiliza sensores óticos para identificar e separar diferentes materiais com base em suas propriedades óticas (cor, transparência, etc.).
Separador por jato de ar	Este equipamento usa um jato de ar comprimido para separar materiais leves de materiais pesados.

Fonte: Autora (2026)

A diversidade e especialização dos equipamentos demonstram o elevado nível de automação e padronização operacional da Empresa B, contribuindo para ganhos em eficiência, rastreabilidade e qualidade dos materiais

recuperados. Esse perfil tecnológico evidencia um modelo industrial consolidado, com forte integração de processos e maior capacidade de escala quando comparado à Empresa A.

Em comparação, a Empresa C apresenta uma configuração operacional distinta, com foco em estruturação interna de fluxos e procedimentos para assegurar rastreabilidade e conformidade no processamento de resíduos eletroeletrônicos, contudo, esses procedimentos não seguem as normas ISO. Sua infraestrutura é composta por setores internos organizados em carga e descarga, triagem, desmontagem e áreas de estoque, que estruturam os fluxos operacionais de forma segmentada. O processo conta ainda com equipamentos de pesagem e registro fotográfico dos resíduos no momento da entrada, assegurando maior transparência e controle do fluxo. Contudo, ela não possui equipamentos ou tecnologias que atuam na separação dos REEE, como ocorre nas demais empresas.

4.5. Fluxo interno e logística externa

A logística externa das três empresas ocorre de forma muito distinta: enquanto a empresa A tem sua coleta desenvolvida de forma direta às pessoas físicas e jurídicas da região, desenvolvendo orçamentos rápidos, incluindo a possibilidade de o cliente comparecer diretamente à empresa a qualquer momento, a empresa B recebe resíduos apenas de pessoas jurídicas e prefeituras, com agendamento prévio do envio dos REEE. Por sua vez, a empresa C recebe os resíduos de pessoas jurídicas e também compra lotes de REEE buscando recuperar a maior quantidade possível de equipamentos para colocar à venda novamente, junto a seus parceiros de Minas Gerais.

As operações de logística externa são influenciadas pela localização de cada empresa, como apresentado no Quadro 16.

Quadro 16: Comparativo das ações ligadas ao Fluxo Externo das empresas A, B e C

Critério	Empresa A	Empresa B	Empresa C
Abrangência logística	Logística restrita e regional	Logística integrada e nacional	Atuação nacional com flexibilidade regional
Origem dos resíduos / Fonte de coleta	Coleta direta de pessoas físicas e jurídicas locais	Ecopontos municipais, devoluções de garantia, fabricantes e sistemas estruturados	Contratos nacionais de logística reversa e parcerias externas

Parcerias externas	Não apresenta rede formal de parceiros	Parcerias com ecopontos e fabricantes	Parcerias interestaduais, especialmente para comercialização
Localização e contexto geográfico	São Paulo (SP), ambiente urbano	São José dos Campos (SP), polo tecnológico-industrial	Bauru (SP), maior flexibilidade no interior
Pontos relevantes	Estrutura simples e dependente do ambiente urbano para volume	Estrutura robusta, integrada a sistemas formais e institucionais	Forte integração com logística reversa e venda de recuperados para outros estados

Fonte: Autora (2026).

As diferenças observadas nos tópicos anteriores, especialmente quanto à geração e caracterização dos resíduos de cada empresa, influenciam diretamente os fluxos logísticos externos de cada organização, expostos no Quadro 16. A Empresa A, com resíduos de menor valor e menor complexidade tecnológica, opera uma logística essencialmente regional e flexível, baseada na coleta direta de consumidores e pequenas empresas. A Empresa B, ao contrário, possui uma logística integrada e estruturada, conectada a fabricantes, ecopontos e prefeituras, refletindo seu maior porte e sua capacidade técnica. A Empresa C apresenta uma atuação híbrida, combinando compras de lotes, contratos de logística reversa e parcerias interestaduais, destacando-se pela utilização de sistemas digitais de pesagem e registro.

De forma semelhante, os fluxos internos também refletem a maturidade operacional e a natureza dos resíduos tratados. A Empresa A mantém processos essencialmente manuais e pouco frequentes, compatíveis com o recebimento irregular e com o foco em materiais simples. A Empresa B, por outro lado, opera com múltiplas linhas de tratamento, automação e documentação robusta, o que lhe permite alcançar índices de reciclabilidade de até 100% em diferentes períodos. A Empresa C se posiciona de maneira intermediária, com setores internos bem definidos e uso de ferramentas digitais, mas ainda limitada por barreiras técnicas e pela ausência de certificação ISO 14001.

O Quadro 17 sintetiza as diferenças entre os fluxos internos dessas empresas, considerando questões da natureza do processo desenvolvido por elas, as principais etapas internas que cada empresa desenvolve em suas operações, os tipos de resíduos e tratamentos que ela opera, as formas como registram as entradas dos resíduos e a documentação técnica utilizada pelas empresas:

Quadro 17: Comparativo das ações ligadas ao Fluxo Interno das empresas A, B e C.

Critério	Empresa A	Empresa B	Empresa C
Natureza do processo	Processo fortemente manual	Processos diversificados e automatizados	Fluxo segmentado por setores operacionais
Etapas internas principais	Triagem e desmontagem realizadas dentro do galpão	Diferentes linhas de tratamento para resíduos leves e robustos	Setores de carga/descarga, triagem, desmontagem, recuperação e estoque
Tipo de resíduos e tratamento	Trata cabos e fios conforme acúmulo	Processa resíduos de variados níveis, de leves a robustos	Recuperação de equipamentos e armazenamento para atendimento a contratos
Frequência do tratamento	Uma a duas vezes por semana, conforme acúmulo	Fluxo contínuo, baseado na operação automatizada	Conforme demanda e chegada dos materiais
Registro das entradas	Relatórios abertos desenvolvidos sob demanda	Registro de todos os lotes com descrição e pesagem	Registro via aplicativo interno
Documentação técnica	Relatórios para interessados	Documentação completa de pesagem e caracterização	Aciona parceiros externos quando fornecedores exigem documentação técnica

Fonte: Autora (2026)

4.6. Pessoas, papéis e treinamento

Para que as empresas operem em diferentes escalas, as ações relacionadas a gestão de recursos humanos têm alto poder de impacto. Na Empresa B, por exemplo, a gestão de pessoas é estruturada de forma mais sistemática, refletindo sua condição de multinacional com processos padronizados. A empresa define funções específicas para cada etapa do processo, desde a recepção e catalogação dos resíduos até a triagem, separação e emissão de certificados, assegurando clareza nos papéis desempenhados e contribuindo para maior eficiência operacional. Esse cuidado é menos evidente na Empresa A, onde as atividades são conduzidas pelo casal gestor e por poucos colaboradores, de forma manual e pouco formalizada, e na Empresa C, que conta com cerca de 22 funcionários que aprendem suas funções majoritariamente na prática, sem um programa formal de treinamento. Essa diferença demonstra que, enquanto empresas de maior porte como a B investem na formalização de papéis e responsabilidades, organizações menores ainda dependem do aprendizado empírico e da flexibilidade de seus trabalhadores. O Quadro 18 sintetiza essas diferenças:

Quadro 18: Comparativo das ações ligadas a Pessoas, Papéis e Treinamento das empresas A, B e C

Critério	Empresa A	Empresa B	Empresa C
Estrutura organizacional	Familiar, de pequeno porte	Robusta, multinacional e de grande porte	Estrutura com setores definidos
Formalização dos papéis	Pouco formalizados e acumulados	Bem definidos (técnicos, supervisores, gestores)	Papéis divididos entre setores internos
Tipo de treinamento	Informal, baseado na prática do dia a dia	Contínuo e estruturado	Treinamentos internos por setor
Registro de capacitação	Não há registro sistematizado	Programas formais e compliance	Não estruturado; registro conforme necessidade
Parcerias para capacitação	Não possui	Interno e institucionalizado	Parcerias externas quando solicitado pelo cliente/contrato
Destaque principal	Aprendizado pela prática, modelo artesanal	Forte política de capacitação e segurança	Flexibilidade e adaptação conforme demanda contratual

Fonte: Autora (2026)

4.7. Conformidade e documentação

Na Empresa A, os resíduos que chegam ao centro de triagem geralmente já estão listados no momento da elaboração do orçamento, e a caracterização é finalizada com registros fotográficos. Entretanto, podem ocorrer divergências ou informações incompletas quando o material é entregue diretamente por pessoas físicas, em pequenas quantidades e sem detalhamento adequado. Para a maior parte dos resíduos, no entanto, as fotografias servem de base para a emissão do certificado de destinação, documento que assegura conformidade ambiental e transparência junto aos clientes. A empresa mantém apenas as certificações consideradas estritamente necessárias para a continuidade de suas atividades.

Na Empresa B, os resíduos são catalogados por lotes e não por tipo de produto. Cada lote é pesado e fotografado, permitindo controle preciso do que foi recebido e do que foi gerado a partir do processamento. Para cada lote processado é emitido um atestado que comprova a destinação ambientalmente adequada dos resíduos, em conformidade com a legislação vigente. Por se tratar de uma multinacional, a empresa busca ampliar ao máximo o conjunto de certificações mantidas, reforçando perante clientes e concorrentes sua capacidade técnica e seu posicionamento estratégico no mercado.

Por fim, a Empresa C destacou o uso de destinadores industriais homologados, com a emissão do Manifesto de Transporte de Resíduos (MTR) e

das notas fiscais correspondentes. Esses registros garantem conformidade legal, ainda que a ausência da certificação ISO 14001 represente uma limitação, já tendo impedido a conquista de contratos mais amplos. O Quadro 19 sintetiza a diferença entre a presença ou a ausência de certificações e documentações formais nas empresas:

Quadro 19: Comparativo das práticas relacionadas a Documentação e Conformidade das empresas A, B e C

Critério	Empresa A	Empresa B	Empresa C
Emissão de documentos	Emite nota fiscal para formalizar transações	Documentação completa: notas fiscais, laudos e relatórios técnicos	Registros digitais internos
Registro operacional	Registros básicos (entrada e saída de materiais)	Registros formais e padronizados conforme exigências corporativas e governamentais	Registros conforme fluxo interno e demandas contratuais
Atendimento a requisitos legais e de mercado	Atende requisitos básicos de formalização	Alta conformidade legal, contratual e técnica	Atende conforme contrato; busca suporte externo quando necessário
Certificações e Normas	Não possui certificações ambientais	Alinhada a normas internacionais	Não possui certificações ambientais
Parcerias externas para documentação	Não registrado	Não necessita (estrutura própria)	Utiliza empresas licenciadas quando exigidos laudos e certificados
Nível de formalização	Baixo	Alto	Médio, com flexibilidade e terceirização quando necessário

Fonte: Autora (2026).

4.8. Custos, receitas e contratos

A viabilidade econômica da Empresa A depende da definição dos valores pagos pelos resíduos adquiridos, que variam conforme a tipologia e o potencial de recuperação de metais de maior valor agregado, como cobre e alumínio. A predominância de materiais classificados em categorias de baixo valor unitário obriga a empresa a operar com elevados volumes para manter sua sustentabilidade financeira.

Na Empresa B, embora não tenham sido disponibilizados dados específicos de custos e receitas durante a pesquisa, observou-se que sua estabilidade financeira está fortemente baseada em contratos institucionais e governamentais. Essa lógica contratual garante previsibilidade de receitas e

robustez às operações, mas a dependência de regulamentações ambientais introduz riscos significativos, sobretudo para a manutenção de contratos internacionais.

A receita da Empresa C, por sua vez, está fortemente associada à comercialização da massa de resíduos com emissão de nota fiscal, especialmente nos contratos de logística reversa firmados com a indústria. Esse modelo garante formalidade e rastreabilidade, mas limita as margens de lucro em comparação com a comercialização direta de matérias-primas de maior valor agregado, como as placas eletrônicas, que em alguns casos são destinadas à exportação.

As ações semelhantes e diferentes entre as empresas A, B e C relacionadas aos custos e receitas das empresas estão sintetizadas no Quadro 20.

Quadro 20: Comparativo das ações ligadas aos Custos e Receitas das empresas A, B e C

Critério	Empresa A	Empresa B	Empresa C
Dependência econômica	Depende do valor pago pelos resíduos adquiridos	Baseada em contratos institucionais e governamentais	Atuação ligada a contratos de logística reversa com a indústria
Tipo de material predominante	Resíduos de baixo valor unitário (fios, cabos, sucatas leves)	Varia conforme demandas contratuais formais	Materiais de maior valor agregado
Modelo de receita	Necessidade de alto volume para viabilizar operações	Receitas previsíveis e contínuas	Margens reduzidas devido à exportação direta
Estabilidade financeira	Baixa, sujeita às variações de preço e volume	Alta, devido à previsibilidade e formalidade dos contratos	Moderada, dependendo de contratos industriais e exportação
Ponto crítico	Vulnerável a oscilações de mercado	Segurança financeira e compliance	Pressão sobre margens na comercialização internacional

Fonte: Autora (2026)

4.9. Parcerias e economia circular

Na Empresa A, as parcerias são estabelecidas de forma mais localizada e voltadas para a venda dos materiais desmontados a outras recicladoras e indústrias regionais. Embora a empresa não atue em contratos de grande porte nem em exportações, sua operação contribui para a economia circular ao reinserir cabos, fios e sucatas metálicas em cadeias produtivas nacionais. Essa atuação, ainda que em menor escala, fortalece a logística reversa regional e

garante a destinação ambientalmente adequada de resíduos que, de outra forma, poderiam ser descartados de forma irregular.

A empresa B, de modo específico, atua na gestão de REEE em escala latino-americana, contando com cerca de 20 anos de experiência no mercado. Ela coleta, processa e destina os resíduos eletrônicos conforme a PNRS 12.305/10, e possui um Sistema de Gestão Integrado (SGI) baseado nas normas ISO 14.001 e ISO 45.000 que otimiza o processo de certificação das empresas que optam por gerir seus resíduos eletrônicos com ela.

A empresa C, por sua vez, tem entre suas atividades principais a compra e classificação de placas eletrônicas, principal fonte de faturamento (até R\$ 8 mil/kg em placas de alto teor), a gestão de logística reversa com empresas parceiras ligadas a obrigação legal de redestinação de resíduos, incluindo contratos com indústrias, o reuso e revenda de equipamentos recondicionados em parceria com sócio especializado e o desenvolvimento de um aplicativo próprio para rastreabilidade e cadastro de resíduos, conforme sintetizado no Quadro 21:

Quadro 21: Comparativo das ações ligadas às Parcerias e Economia Circular das empresas A, B e C

Critério	Empresa A	Empresa B	Empresa C
Integração com EC	Inserção limitada; atuação isolada	Inserção plena e estruturada	Inserção parcial, flexível e contratual
Estrutura de parcerias	Não possui parcerias formais estruturadas	Forte rede institucional e governamental	Parcerias conforme demanda e contrato
Modelo de negócio	Baseado em compra e venda direta, foco em sobrevivência	Modelo com fluxo de retorno circular definido	Modelo flexível, capaz de participar da EC conforme requisitos contratuais
Fechamento de ciclos	Não fecha ciclos com outros atores; baixa integração sistêmica	Garante reaproveitamento e retorno em larga escala	Fecha ciclos de forma limitada; depende de terceiros
Limitações	Baixa articulação setorial	—	Falta de certificações pode restringir acesso a cadeias circulares mais exigentes

Fonte: Autora (2026)

4.10. Barreiras e Soluções

A dinâmica competitiva que molda as barreiras e as possibilidades de expansão de uma recicladora não depende apenas da intenção de crescimento de seus gestores, da disposição de seus colaboradores ou da estabilidade de suas parcerias comerciais, mas de fatores estruturais que extrapolam a esfera

interna das empresas, incluindo requisitos regulatórios, tecnológicos e financeiros que definem, de fato, quem consegue competir nesse setor. Como sintetizado no Quadro 7, elementos como capital inicial, diversidade de equipamentos, certificações ambientais, rastreabilidade, acordos de logística reversa, capacidade de tratamento interno e maturidade de gestão ambiental configuram barreiras que podem favorecer ou restringir a atuação das recicladoras analisadas.

A Figura 12 sintetiza essa relação, apresentando de forma integrada como as empresas A, B e C se posicionam diante de cada uma das cinco forças, permitindo visualizar diferenças estruturais importantes no grau de vulnerabilidade ou robustez competitiva de cada empresa. A seguir, as análises detalhadas das cinco forças são apresentadas nos tópicos 4.10.1 a 4.10.5.

Figura 12: Síntese da análise das empresas A, B e C segundo as 5 forças competitivas de Porter



Fonte: Autora (2026)

4.10.1. Ameaça de novos entrantes

Desde o contato inicial com as empresas e a análise dos primeiros documentos enviados, a diferença entre o capital e o porte de cada uma delas ficou evidente: enquanto a empresa A, caracterizada por ser uma empresa de caráter familiar, capaz de tratar apenas uma linha de REEE, dependendo diretamente de parceiros para o tratamento dos demais resíduos obtidos pela empresa, ela sofre com a ameaça de novos entrantes com alta intensidade, seja pela presença de novas recicladoras formais quanto pela presença de catadores e recicladores informais.

Já a empresa B, por operar com infraestrutura robusta, como apresenta o Quadro 15, conta com diversos equipamentos de tratamento de resíduos eletrônicos e não trata apenas resíduos de grande porte como fogões e geladeiras, contudo, os responsáveis pela empresa afirmaram que já tem planos em andamento a fim de tratar esses resíduos maiores. Além disso, como a empresa trata 99% dos REEE que se responsabiliza e busca expor seus dados para seus fornecedores e clientes, evidenciando sua baixa dependência de terceirização e domínio técnico especializado, ela se encontra mais protegida em relação a entrada de novos entrantes.

Por fim, a empresa C, de porte intermediário e ainda em expansão, se encontra em um nível intermediário de proteção contra a ameaça de novos entrantes: se por um lado, ela não tem nenhum tipo de equipamento de tratamento de REEE, por outro, está ampliando sua atuação com o uso de um aplicativo próprio de rastreabilidade, o que é algo inovador e com alto potencial de diferenciação no mercado.

Outro ponto que reafirma as diferenças do posicionamento das empresas A, B e C é a presença de licenças e certificações internacionais, algo exclusivo da empresa B, que já conta com o uso de diversos indicadores presentes em suas operações, rastreabilidade da reciclagem e de um quantificador de ganhos ambientais como economia de água e energia, redução no desmatamento e redução no espaço do solo utilizado para descarte dos resíduos em lixões.

Por fim, é necessário evidenciar o impacto gerado pela a mudança da marca das empresas A, B e C: enquanto a empresa A sofreu com essa mudança no período pós-Covid, abrindo seu leque quanto a resíduos tratados, e reduzindo

seu foco em computadores e equipamentos específicos de telecomunicações, aceitando agora, todo tipo de resíduo eletrônico, a empresa B vivenciou essa mudança de forma estrutura, ao ser adquirida por uma empresa de porte maior, o que fortaleceu sua imagem, enquanto a empresa C, foi criada durante a pandemia, e ainda se encontra em processo de estruturação. Diferente da empresa A, que nasceu de um ramo familiar tradicional, e da empresa B, que já opera com robusta infraestrutura e acordos nacionais de logística reversa, a empresa C surgiu inicialmente no comércio de sucata metálica e migrou para os resíduos eletrônicos à medida que identificou maior margem de retorno. Essa origem recente e o fato de estar localizada em um mercado regional tornam a empresa mais exposta a novos entrantes, especialmente porque há concorrência de compradores vindos de São Paulo que disputam diretamente os mesmos lotes de placas e outros componentes.

4.10.2. Ameaça de produtos ou serviços substitutos

Ainda que todas as três empresas destinem corretamente os REEE e forneçam documentações que comprovem, de alguma forma, essa destinação (seja com um maior nível de detalhamento, quando observado na empresa B, ou com menor nível de detalhamento nas demais empresas), apenas a empresa B atende a legislação e conta com rastreabilidade e conformidade devidamente normatizados.

Mesmo com os diferenciais da empresa B, as três empresas se encontram em situação delicada: quanto às novas tecnologias alternativas em solo brasileiro todas estão conscientes que o tratamento mais utilizado é o físico, gerido diferente em cada uma das operações, contudo, todas as empresas afirmaram depender de enviar ao menos um componente de equipamentos eletrônicos para tratamento alternativo no exterior, incluindo placas de circuito impresso (PCI), baterias e outros resíduos de alta complexidade, o que reduz seu potencial competitivo nesse sentido.

Além disso, todas exportam placas e vendem parte de seus resíduos separadamente para outras empresas, em diferentes graus de intensidade. Essa necessidade de destinação internacional evidencia uma limitação tecnológica nacional, funcionando como um substituto indireto ao tratamento local, já que

parte do valor potencialmente capturado pelas recicladoras é transferido a recicladores estrangeiros.

Ainda em relação ao fluxo externo das empresas no momento pós separação e/ou pós tratamento, enquanto a empresa A vende boa parte do que é coletado para tratamento em outras empresas, se limitando a tratar completamente apenas cabos e fios, a empresa B trata a maior parte do que é coletado, destinando apenas o que não consegue tratar de forma alguma para tratamento externo e a empresa C não trata nenhum tipo de REEE, apenas separa de forma geral, recupera itens que consegue, e vende o restante para outras recicladoras.

Outro ponto de convergência entre a situação atual das três empresas é sobre os impactos ligados a grande concorrência informal e a campanhas de logística reversa internalizada, porém, esses impactos são menores na empresa B, que tem contratos com grandes empresas, e é a responsável por gerir seus resíduos pós fábrica, o que não acontece nas demais empresas. No Brasil, essa prática é prevista no Acordo Setorial para Eletroeletrônicos e na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que podem estimular grandes fabricantes a montarem sua própria rede de coleta, em vez de contratar recicladoras independentes. Portanto, embora todas enfrentam desafios semelhantes, a empresa A depende mais fortemente de soluções externas e do mercado informal, enquanto a empresa B, ao internalizar etapas por meio de contratos formais, reduz a propensão de substituição e se posiciona de forma mais resiliente no setor.

Se destacando das demais, a empresa C, diferencia-se por ter desenvolvido um aplicativo interno de rastreabilidade, que, embora ainda esteja em processo de amadurecimento e seja utilizado principalmente para registro de entradas, representa um passo importante para reduzir a pressão de produtos substitutos. Ao estruturar melhor a gestão dos resíduos e oferecer dados de rastreabilidade aos clientes, a empresa tende a fortalecer sua posição competitiva, aproximando-se do patamar de players mais consolidados. Entretanto, enquanto o sistema não for plenamente integrado e explorado para relatórios e indicadores ambientais, a empresa permanece em situação intermediária, mais resiliente que a empresa A, mas ainda mais vulnerável que a B.

4.10.3. Poder de barganha dos fornecedores

No setor de REEE os fornecedores são todos os geradores de resíduos: pessoas físicas, empresas, cooperativas e fabricantes e os intermediários, como sucateiros, coletores e catadores que vendem cargas diversas de REEE. Nesse sentido, a empresa A segue a precificação média dos produtos, acompanhando o mercado considerando os equipamentos unitariamente, enquanto a empresa B, recebe os produtos em cargas, não diferenciando a precificação dos produtos segundo o tipo de produto, mas considerando o peso da carga, de contatos formais com grandes empresas de EEE e prefeituras, e atuando como fornecedor de matérias primas secundárias para diversas empresas, como exemplifica a Figura 7, logo, a empresa B conta com maior flexibilidade e possibilidades de atuar no mercado, devido ao alto fluxo de resíduos recebidos diariamente e a variedade de equipamentos que a empresa tem.

Outro ponto relevante que diferencia o posicionamento da empresa B quanto ao seu contato com seus fornecedores é relacionado aos fluxos internos das empresas: a empresa A não realiza a separação detalhada dos resíduos, como no caso dos plásticos, são enviados todos juntos ao mesmo comprador que irá destinar os plásticos de uma só vez, observa-se que, ao reduzir a qualidade do material, o poder de negociação da empresa é reduzido, diferentemente da empresa B, em que todos os tipos de plásticos são devidamente separados durante seus processamentos, pois, diferentemente das outras empresas, ela conta com equipamentos novos que incluem separador por leitura ótica, por exemplo, os plásticos são separados por meio de leitura óptica e então são vendidos corretamente, obtendo maior pureza.

Contudo, durante a visita técnica, pode-se observar a preocupação da empresa A em separar os fios grossos dos médios e finos exatamente para se obter uma separação mais “limpa e pura” dos resíduos, ao menos durante parte dos processos. Portanto, o poder de barganha dos fornecedores representa um fator de risco mais intenso para a empresa A, que depende de relações pontuais e menos estruturadas, enquanto a empresa B, ao gerenciar altos volumes e contratos diretos com geradores formais, reduz essa exposição e garante maior estabilidade operacional.

No caso da empresa C, a dinâmica com fornecedores também é marcada por desafios: a empresa compra lotes de sucata metálica e eletrônica, recebe resíduos de pós-consumo (pessoas físicas e jurídicas) e ainda opera contratos de logística reversa, o que lhe garante diversidade de entradas. Entretanto, como não possui escala comparável à empresa B, continua vulnerável à concorrência regional, especialmente de compradores de São Paulo que disputam os mesmos lotes de placas e outros componentes. Essa concorrência pressiona os preços e aumenta o poder de barganha dos fornecedores intermediários, como sucateiros e catadores.

Apesar de utilizar um aplicativo interno de rastreabilidade para registrar entradas e clientes, esse recurso exclusivo da empresa C ainda não se traduz em maior poder de negociação frente aos fornecedores, pois está em fase de amadurecimento. A empresa também exporta placas e vende separadamente plásticos, fios e induzidos para indústrias nacionais, mas sua dependência de contratos variáveis e a ausência de certificações ambientais, como a ISO 14001, reduzem sua capacidade de firmar parcerias mais estáveis com grandes geradores formais. Dessa forma, pode-se considerar que a empresa C se encontra em uma posição intermediária: menos vulnerável que a A, pela diversidade de canais de entrada, mas mais exposta que a B, devido à menor escala, sazonalidade no recebimento e forte presença de intermediários na região.

4.10.4. Poder de barganha dos clientes

Ainda que a empresa A trate apenas cabos e fios, ela recebe todo tipo de REEE, e por vezes, mesmo assumindo algum prejuízo, recebe equipamentos de escritório como mesas e cadeiras. Como mencionado anteriormente, ela não tem contratos robustos e sofre com a saturação do mercado observada no período pós-Covid. Contudo, a empresa B se diferencia das demais empresas do ramo por atender apenas clientes corporativos que valorizam a compliance ambiental, oferecendo uma alta variedade de materiais recuperados com rastreabilidade e documentos ambientais, ela consegue claramente reduzir a pressão do poder de barganha dos clientes, diferentemente da empresa A, que se encontra mais exposta a pressões de preço e volume impostas pelos clientes.

No caso da empresa C, observa-se um cenário intermediário: por um lado, ela ainda não possui contratos tão robustos quanto a empresa B, o que a torna vulnerável a pressões de clientes que buscam menores preços ou prazos mais flexíveis; por outro, a empresa já apresenta diferenciais importantes, como a exportação de placas eletrônicas, a venda de plásticos, fios e induzidos a clientes nacionais, e o canal de reuso operado pela parceira Info. Além disso, o uso do aplicativo interno de rastreabilidade, ainda em desenvolvimento, fortalece a transparência das operações e pode representar um atrativo para clientes que valorizam conformidade ambiental. No entanto, a ausência de certificações como a ISO 14001 limita a negociação com grandes clientes industriais, mantendo o poder de barganha dos clientes em um patamar moderado a alto, especialmente diante da concorrência regional e da falta de barreiras regulatórias mais sólidas.

Dessa forma, é possível concluir que a empresa A enfrenta elevado poder de barganha dos clientes devido à forte sensibilidade a preço, baixíssimos custos de troca, informalidade dominante no mercado e ausência de diferenciais técnicos que justifiquem fidelização, enquanto a Empresa B, por atender exclusivamente clientes corporativos com exigências de compliance, documentação e rastreabilidade, apresenta baixo poder de barganha dos clientes, já que estes possuem custos elevados de troca e valorizam atributos que somente empresas mais estruturadas conseguem oferecer e a empresa C ocupa posição intermediária: embora apresente algumas vantagens competitivas como rastreabilidade via aplicativo e diversificação de fluxos, ainda é afetada pela informalidade regional, ausência de certificações e forte sensibilidade a preço entre parte de seus clientes, resultando em poder de barganha de moderado a alto.

4.10.5. Rivalidade entre concorrentes

O crescimento na quantidade de recicladoras e operadores informais que disputam os resíduos fornecidos e os clientes para a venda dos materiais separados e/ou reciclados evidencia que a empresa A, atuante em um segmento com baixa diferenciação e limitada capacidade de tratamento efetivo de REEE, tem uma maior quantidade de concorrentes diretos formais e informais, enquanto

a empresa B, com infraestrutura robusta, contratos formais de LR e diversos diferenciais, tem uma quantidade menor de concorrentes diretos.

A empresa C insere-se nesse contexto enfrentando alta rivalidade regional. Por atuar em um mercado menor e ainda em fase de estruturação, compete diretamente com recicladoras locais e com operadores informais que oferecem preços agressivos para captar placas e outros componentes de maior valor agregado. Além disso, a presença de compradores de São Paulo que atuam na mesma região amplia a disputa pelos resíduos, reduzindo margens e aumentando a pressão competitiva. Apesar de contar com diferenciais como o aplicativo de rastreabilidade, a exportação de placas e o canal de reuso, esses fatores ainda não são suficientes para neutralizar totalmente a rivalidade. Assim, a empresa C se encontra mais protegida que a A, por já ter diferenciais tecnológicos e comerciais, mas mais exposta que a B, devido à menor escala, ausência de certificações e alta concorrência no mercado regional.

4.11. Planos e próximos passos

É importante destacar que as barreiras e pressões competitivas discutidas até aqui não apenas revelam o cenário atual das recicladoras, mas também influenciam diretamente o modo como cada empresa projeta seu futuro. As respostas estratégicas, os investimentos planejados e a forma como cada uma delas enxerga suas possibilidades de crescimento refletem tanto suas limitações estruturais quanto suas ambições competitivas. Assim, compreender os próximos passos das empresas A, B e C permite identificar como cada uma pretende se posicionar frente às demandas tecnológicas, ambientais e de mercado que caracterizam o setor de REEE. O Quadro 22: Comparativo das empresas quanto aos planos e próximos passos das empresas A, B e C. sintetiza esses movimentos, evidenciando as diferenças de foco, maturidade e direcionamento estratégico entre as três recicladoras.

Quadro 22: Comparativo das empresas quanto aos planos e próximos passos das empresas A, B e C.

Critério	Empresa A	Empresa B	Empresa C
Objetivos principais	Expandir capacidade de tratamento além de cabos e fios	Desenvolver soluções para resíduos de plástico misto com fração metálica	Expandir atuação com foco em exportação de placas de alto valor

Prioridades estratégicas	Aumentar eficiência e capacidade de separação	Incorporar ferramentas como ACV para melhoria contínua	Crescer via tecnologia própria e novos mercados internacionais
Investimentos futuros	Aquisição de novos equipamentos de separação e processamento	Projetos de inovação e sustentabilidade (incluindo ACV)	Ampliação de estrutura para exportação e parcerias estratégicas
Posicionamento desejado	Evolução operacional, mantendo foco regional	Liderança técnica e sustentável com foco em processos avançados	Diferenciação por tecnologia, exportação e integração internacional
Abertura a parcerias	Não explicitada	Aberta à colaboração técnica e institucional	Deseja ampliar parcerias comerciais externas

Fonte: Autora (2026)

4.12. Uso (ou não) de Ferramentas de ACV

Apesar dessas barreiras e limitações ao uso estratégico da ACV para o desenvolvimento industrial e empresarial, sua capacidade de fornecer uma base científica para decisões mais sustentáveis e eficientes reforça a necessidade de superar lacunas em sua aplicabilidade. Ao trazer exemplos concretos de outros setores, fica evidente que as barreiras observadas nas empresas A, B e C não estão isoladas, mas fazem parte de um cenário mais amplo de dificuldades de integração da ACV na prática empresarial.

A ameaça de novos entrantes é fortalecida pela baixa exigência de capital e pela presença da informalidade, que dificulta a consolidação de empresas mais tecnicamente capacitadas e com rastreabilidade comprovada. A ameaça de produtos substitutos, evidenciada pela necessidade de envio de resíduos para tratamento internacional e pela logística reversa internalizada, mostra como gargalos tecnológicos nacionais ainda drenam valor para cadeias estrangeiras.

O poder de barganha dos fornecedores, associado à fragmentação e à dependência de intermediários informais, e o poder de barganha dos clientes, reforçado pela baixa diferenciação de produtos reciclados, expõem a vulnerabilidade das recicladoras com menor estrutura e compliance. Por fim, a rivalidade entre concorrentes, acirrada pela multiplicidade de atores informais e formais, comprova que os custos baixos de entrada e saída perpetuam o ciclo de competição por preços, travando investimentos em inovação.

Esse cenário evidencia que a aplicação da ACV e de práticas de EC só pode ser consolidada quando houver políticas públicas mais eficazes, estímulo à inovação tecnológica nacional, incentivo ao design para desmontagem e fortalecimento de contratos formais e rastreabilidade. Mesmo com a evolução das aplicações de ACV, do aumento nas possibilidades de ferramentas disponíveis para realizar essa avaliação e dos diversos métodos que permitem integrar a ACV a outras abordagens, poucas empresas têm se manifestado no âmbito de realizar uma ACV, como mapeado no presente estudo: a Empresa A nunca realizou uma ACV ou análise semelhante, enquanto a empresa B tem indicadores ambientais de sustentabilidade, contudo, os gestores possuem apenas as fontes utilizadas para desenvolver seus indicadores ambientais, não contando com formação ou detalhes de suas ferramentas. No caso da empresa C, embora já utilize um aplicativo interno de rastreabilidade e exporte placas eletrônicas, seus gestores também não demonstraram familiaridade com a aplicação formal da ACV, limitando-se a práticas operacionais de rastreabilidade e a indicadores ainda pouco estruturados. Essa condição coloca a empresa em posição intermediária: mais avançada que a empresa A pela utilização de ferramentas digitais e pela diversificação de canais (exportação, reuso, venda nacional), mas menos consolidada que a B, por não contar com certificações ambientais, metodologias sistematizadas e contratos robustos.

Ao analisar esse conjunto de pressões competitivas sob a ótica das Cinco Forças de Porter, observa-se que elas dialogam diretamente com as perguntas de pesquisa desta investigação. Se o objetivo foi compreender os entraves técnicos e organizacionais para a aplicação da ACV em empresas de reciclagem de REEE, as evidências aqui apresentadas demonstram que tais entraves estão intrinsecamente relacionados às condições de mercado e às pressões externas. Além disso, ao avaliar a percepção da ACV entre as empresas estudadas, constata-se que as diferenças de porte, estrutura e inserção competitiva condicionam não apenas a forma como a ACV é compreendida, mas também a viabilidade de sua aplicação prática. Assim, este estudo confirma que a sustentabilidade e a competitividade, longe de serem esferas separadas, encontram-se sobrepostas no setor, o que reforça a pertinência dos objetivos propostos.

Mesmo com a crescente difusão das diretrizes da ACV e das práticas de EC sejam cada vez mais difundidas em questões normativas e metodológicas, sua aplicação ainda conta com barreiras estruturais, como apresentado anteriormente. O Quadro 23 apresenta as limitações mapeadas de cada empresa quanto ao uso (ou a ausência) da execução de ACV e da aplicação de indicadores de sustentabilidade:

Quadro 23: Comparação crítica entre as empresas A, B e C quanto à aplicação e a percepção da realização de uma ACV

Questões analisadas	Empresa A	Empresa B	Empresa C
Percepção da ACV antes da realização do estudo	Operação majoritariamente manual, não manifesta percepção da necessidade de aplicar ACV, dada a limitação de porte e fluxo.	Já participou de ACVs externas, mas não aplicou internamente em razão da complexidade e confidencialidade.	Reconhece a importância da rastreabilidade, utiliza aplicativo interno em desenvolvimento, mas não demonstrou familiaridade com a aplicação formal da ACV.
Interesse em realizar ACV futuramente	Não apresenta interesse no momento, devido ao porte e ao fluxo reduzidos.	Demonstra interesse e urgência, em função da pressão de mercado.	Aponta possibilidade futura de uso da ACV como diferencial competitivo, mas sem planejamento estruturado.
Indicadores ambientais usados	Possui certificados mínimos, entrega Selo Verde no certificado de destinação, sem expansão do escopo.	Utiliza indicadores de sustentabilidade em escopo limitado, mas já transmite segurança aos clientes.	Conta com registros digitais no aplicativo interno, mas ainda não possui indicadores ambientais estruturados ou certificações como ISO 14001.
Estrutura técnica para coleta de dados	Sem sistemas automatizados; registros manuais e parciais.	Possui ERP parcial para rastreio e gestão de dados, mas planeja desenvolver ACV apenas para processos internos.	Utiliza aplicativo próprio para registro de entradas e clientes, em fase de amadurecimento, sem integração plena a relatórios ou indicadores ambientais.
Vantagem percebida da ACV	Não identifica diferencial	Reconhece vantagem	Percebe potencial de diferenciação em mercado

	competitivo na aplicação.	mercadológica e de marketing.	regional e junto a clientes que valorizam rastreabilidade, mas ainda não consolidado.
Pressões externas	Sem exigências formais de clientes.	Clientes corporativos exigem rastreabilidade e relatórios de impacto.	Enfrenta pressão de clientes regionais por preços mais baixos e de concorrentes de SP, mas ainda não de grandes clientes industriais.
Maturidade em gestão ambiental	Foco em licenças básicas; gestão incipiente.	Gestão ambiental em evolução, com selo, indicadores e objetivos claros.	Gestão em estágio inicial: diversidade de entradas e exportação de placas, mas sem certificações e com forte dependência de contratos variáveis.

Fonte: Autora (2026)

As implicações da falta da realização da ACV como uma prática das empresas para apresentarem-se para a sociedade de forma diferente e para melhorarem seus procedimentos internos evidenciam gargalos diversos como a padronização de uma unidade funcional e da limitação das fronteiras do sistema, evidenciado quando a empresa A apontou não separar devidamente os resíduos plásticos, o que dificulta a rastreabilidade, especialmente no caso da empresa A, por não contar com sistemas de acompanhamento do transporte dos resíduos corretamente, e da empresa B, por apresentarem interesse em desenvolver a ACV apenas a partir da entrada dos REEE dentro do seu centro de tratamento dos resíduos, o que também implica na dificuldade de se comprovar vantagens ambientais ao não permitir a realização de uma ACV completa (que considere também o trajeto da coleta do resíduo até o centro de reciclagem e do centro de reciclagem até o resíduo ser efetivamente reintegrado na cadeia de suprimentos).

Esses elementos reforçam a presença de entraves técnicos (ausência de padronização, falta de sistemas de rastreabilidade e dados incompletos), organizacionais (escassez de recursos humanos qualificados e restrições estratégicas de sigilo) e estruturais (carência de políticas de incentivo) impactam

e limitam a aplicação prática da ACV no setor, evidenciando a necessidade de maior integração entre políticas públicas, capacitação profissional e instrumentos tecnológicos. Ao mesmo tempo, a análise demonstra que cada empresa, em função do seu porte e nível de estrutura, apresenta condicionantes próprios para lidar com a ACV, o que torna necessária a comparação entre os casos, conforme apresentado no

Quadro 24.

Quadro 24: Relação dos fatores que influenciam a realização de uma ACV com o posicionamento das empresas A, B e C.

Fator	Empresa A	Empresa B	Empresa C
Origem do desenvolvedor	Empresas pequenas como a A não têm acesso a licenças de softwares comerciais caros, desenvolvidos por grandes consultorias ou centros de pesquisa. Isso cria barreiras técnicas e de custo.	Já teve contato com projetos e conhece fornecedores de software, mas não aplica de forma estruturada.	Apesar de conhecer ferramentas digitais por meio de parcerias acadêmicas, a empresa ainda não adota softwares de ACV, priorizando o desenvolvimento de soluções próprias de rastreabilidade.
Adequação para aplicação	Sem alinhamento entre ferramenta e objetivo (ex.: rastrear frações específicas de cobre/plástico), a ACV não faz sentido para a Empresa A.	Reconhece a importância de comprovar suas operações e agregar valor, mas ainda não implementa internamente.	Percebe a ACV como útil para consolidar a rastreabilidade e atender demandas de clientes corporativos, mas considera a aplicação onerosa frente ao seu porte e aos custos de certificação.
Nível de conhecimento do usuário	A equipe da empresa atua em grande parte com procedimentos manuais, e a falta de interesse em ACV reforça a falta de conhecimento em ferramentas.	A empresa já participou de alguma forma na realização da ACV, porém, a empresa não tem profissionais efetivamente envolvidos em ACV.	Os gestores conhecem a ACV de forma conceitual, mas não possuem treinamento técnico; o foco está em indicadores de rastreabilidade e relatórios simplificados.
Fontes de dados integradas	Nenhuma das empresas informou possuir um banco de dados aplicável a ACV: ambas dependiam de bases de dados ou de referências de pesquisas acadêmicas.		
Recursos de otimização	Com as separações são manuais, tem-se limitação cenários e otimizações, principalmente considerando que o software não resolve se a base é toda manual.	Não utiliza simulações computacionais em seus processos, apesar de utilizar diversos equipamentos na trituração e separação dos resíduos.	Possui algum potencial de integração tecnológica por meio do aplicativo, mas não emprega otimizações ou simulações em seus processos operacionais.
Configurações gerais	Para a Empresa A, seriam utilizadas configurações gerais subutilizadas.	Configurações mais avançadas permitem ajustes finos e um maior nível de detalhamento em seus resultados.	Configurações gerais poderiam ser exploradas futuramente no aplicativo próprio.
Estágios do ciclo de vida abrangidos	A análise seria limitada, em grande parte, à etapa da destinação do resíduo.	Tem potencial de rastrear ciclo completo, mas aplica parcialmente.	O foco está no fluxo de entrada e saída de resíduos, pois não contempla o ciclo de vida completo.
Formatos de apresentação de resultados	A empresa fornece apenas o Certificado de Destinação aos seus clientes. Utilizando um relatório com	A empresa oferece um Certificado de Destinação com indicadores de sustentabilidade superficiais, sem	Fornece relatórios internos com base no aplicativo e certificados ambientais

	uma ACV simplificada, a empresa já contaria com um grande diferencial.	detalhar a ACV. Com a ACV seu relatório seria valorizado.	básicos, mas ainda não apresenta relatórios de ACV estruturados.
Suporte ao usuário	Não possui suporte técnico nem parcerias com consultorias.	Já se envolveu em ACV, mas sem acompanhamento contínuo.	Busca parcerias externas para consultoria em sustentabilidade, mas ainda de forma pontual, sem suporte especializado contínuo.
Funcionalidades adicionais e conformidade	Não aplica normas ISO ACV; cumpre apenas o licenciamento mínimo.	Conhece normas básicas, mas não aplica de forma aprofundada.	Não possui certificações como a ISO 14001, o que limita a adoção de ACV; conformidade restrita às exigências legais básicas.
Capacidades de modelagem	A ausência de análise de incerteza ou sensibilidade limita decisões estratégicas.	Tem estrutura parcial para iniciar modelagens, contudo, depende de parcerias.	Não possui modelagens estruturadas; a ausência de ferramentas de análise quantitativa limita a exploração de cenários.

Fonte: Autora (2026)

A análise do

Quadro 24 evidencia que, embora existam ferramentas consolidadas para a aplicação da ACV em diferentes setores produtivos, as empresas A, B e C ainda enfrentam barreiras que vão desde a ausência de infraestrutura tecnológica até restrições estratégicas de mercado. Enquanto a Empresa A permanece limitada por processos manuais e pela baixa percepção de valor competitivo na adoção da ACV, a Empresa B revela maior proximidade com práticas de sustentabilidade, embora restrita pelo sigilo e pela falta de profissionais especializados. Já a Empresa C demonstra avanços no uso de ferramentas digitais e iniciativas de rastreabilidade, mas ainda carece de sistematização, certificações e recursos técnicos para consolidar uma aplicação efetiva da ACV.

Esses resultados permitem responder diretamente às perguntas de pesquisa formuladas: os entraves técnicos, organizacionais e estruturais à aplicação da ACV não estão apenas na falta de conhecimento ou de recursos, mas também na forma como as pressões externas, regulatórias, mercadológicas e sociais, condicionam a adoção dessa metodologia. Do mesmo modo, ao analisar a percepção da ACV nas três empresas, confirma-se que o porte, o nível de maturidade ambiental e a inserção competitiva definem a viabilidade prática da ferramenta.

Dessa forma, observa-se que os objetivos do estudo foram alcançados ao identificar não apenas os fatores limitantes da aplicação da ACV, mas também os potenciais de integração com práticas de EC, LR e inovação tecnológica. Esse cruzamento reforça que a sustentabilidade e a competitividade não constituem esferas dissociadas, mas dimensões complementares que se entrelaçam no setor de REEE.

Ao situar os resultados no contexto da literatura e dos marcos regulatórios discutidos, evidencia-se a necessidade de políticas públicas mais incisivas, estímulo à capacitação profissional e incentivo à inovação digital para superar as barreiras mapeadas. Esse movimento se apresenta como condição indispensável para transformar a ACV em ferramenta estratégica e consolidar a gestão sustentável de REEE no Brasil.

5. Discussão

O Capítulo 5 dedica-se à discussão dos resultados obtidos a partir do estudo de casos múltiplos, articulando as evidências empíricas com os achados da RSL. A discussão é estruturada em duas etapas complementares: a primeira, na qual os resultados são analisados à luz dos objetivos específicos da pesquisa, permitindo interpretar como a estrutura, os entraves e o uso atual ou potencial da ACV se manifestam no contexto das recicladoras investigadas, e a segunda etapa, na qual os resultados são reorganizados a partir das dimensões analíticas operacional, organizacional e tecnológica, com o intuito de aprofundar os mecanismos explicativos que condicionam a adoção da ACV e das práticas de EC. Essa abordagem busca evitar uma leitura fragmentada dos achados, privilegiando uma interpretação integrada e sistêmica dos fatores que influenciam a gestão de resíduos eletroeletrônicos.

5.1. Discussão orientada pelos objetivos específicos

5.1.1. Estrutura operacional, organizacional e tecnológica das recicladoras analisadas

Os resultados do estudo evidenciam que as recicladoras paulistas de REEE analisadas no estudo de casos múltiplos apresentam elevada heterogeneidade estrutural, operacional e organizacional, como evidenciado no Quadro 13. Essa diversidade se manifesta de forma clara no porte das empresas, no escopo das atividades desempenhadas ao longo da cadeia de LR, no nível de formalização dos processos e na infraestrutura tecnológica disponível, reforçando que o setor não pode ser compreendido como um conjunto homogêneo de organizações.

Do ponto de vista operacional, observa-se que as empresas diferem significativamente quanto às etapas do tratamento de REEE efetivamente realizadas internamente. Conforme evidenciado no Quadro 14, enquanto algumas atuam predominantemente nas fases iniciais da cadeia, com foco na coleta, no recebimento e na triagem manual dos resíduos, outras apresentam maior capacidade instalada para processos mais avançados de desmontagem, separação mecanizada e preparação de frações para valorização material. Essa variação operacional está diretamente associada ao volume processado, à disponibilidade de espaço físico e ao

grau de especialização da mão de obra, elementos que condicionam a complexidade das rotinas produtivas e a previsibilidade dos fluxos internos.

No que se refere à dimensão tecnológica, os resultados indicam níveis distintos de incorporação de máquinas, equipamentos e sistemas de apoio às atividades de separação e tratamento dos resíduos. Essa diferença torna-se explícita quando analisados os equipamentos de tratamento empregados pelas empresas (Quadro 15). Em empresas de menor porte, predomina o uso de tecnologias simples ou processos essencialmente manuais, com apoio limitado de equipamentos mecanizados ou sistemas digitais de controle. Em contrapartida, empresas de médio e maior porte tendem a concentrar investimentos em automação parcial, equipamentos específicos para separação de frações e soluções tecnológicas voltadas ao controle operacional e documental. Essa diferença tecnológica não apenas influencia a eficiência dos processos, mas também afeta diretamente a capacidade de geração, registro e consolidação de dados ao longo da cadeia.

Sob a perspectiva organizacional, os casos analisados revelam distintas configurações de governança interna, com variações na definição de papéis, na formalização de rotinas e na integração entre áreas operacionais, administrativas e ambientais. Esses aspectos estão diretamente relacionados com os critérios de elegibilidade adotados para a seleção das empresas participantes do estudo (Quadro 12), refletindo diferentes níveis de maturidade organizacional. Em algumas empresas, a gestão das atividades relacionadas aos REEE encontra-se fortemente centralizada, com decisões concentradas em poucos atores e baixo grau de padronização documental. Em outras, observa-se maior clareza na divisão de responsabilidades, presença de procedimentos formais e esforços para alinhar práticas operacionais a exigências regulatórias e contratuais, ainda que de forma incipiente.

A análise integrada dessas três dimensões evidencia que a estrutura das recicladoras influencia diretamente sua capacidade de organizar processos, incorporar tecnologias e sustentar práticas de gestão ambiental mais sistemáticas. Essa leitura integrada está alinhada aos focos analíticos definidos a partir da revisão sistemática da literatura (Quadro 6), que orientaram tanto o mapeamento estrutural quanto a análise comparativa dos casos. A heterogeneidade observada reforça a importância de compreender as empresas a partir de suas condições reais de operação, evitando generalizações que desconsiderem diferenças de escala,

maturidade organizacional e posicionamento na cadeia de logística reversa. Esse mapeamento estrutural constitui ponto de partida essencial para a compreensão dos desafios associados à adoção de instrumentos analíticos mais complexos, como a ACV, e para a interpretação dos entraves discutidos nos itens subsequentes.

5.1.2. Entraves técnicos e gerenciais à adoção da Avaliação do Ciclo de Vida e de práticas de economia circular

A análise dos casos evidencia que os entraves à adoção da ACV e de práticas de EC nas recicladoras investigadas não se limitam a fatores pontuais, mas resultam de um conjunto de fatores técnicos e gerenciais que se manifestam de forma interdependente. Esses entraves confirmam a perspectiva apresentada na literatura, segundo a qual a incorporação de instrumentos analíticos mais sofisticados depende de condições estruturais, organizacionais e informacionais que nem sempre estão presentes no contexto empresarial real.

No plano técnico-operacional, destacam-se as dificuldades associadas à heterogeneidade dos resíduos recebidos, à variabilidade dos fluxos de entrada e à predominância de processos manuais nas etapas iniciais de triagem e desmontagem. Esses entraves operacionais encontram-se sistematizados no Quadro 8, que evidencia limitações ligadas a padronização dos procedimentos e que dificultam a geração de dados consistentes sobre volumes, composições e destinos dos materiais, elementos fundamentais para análises ambientais mais estruturadas. Mesmo quando existem esforços de controle operacional, a fragmentação das informações ao longo da cadeia compromete a visão integrada exigida tanto pela economia circular quanto pela ACV.

Do ponto de vista gerencial, os resultados indicam que a ausência de estruturas formais de gestão ambiental e de rotinas sistemáticas de registro e análise de dados constitui um entrave central à adoção da ACV. Os desafios organizacionais observados nos casos analisados dialogam diretamente com aqueles sintetizados no Quadro 9, especialmente no que se refere à centralização das decisões, à indefinição de papéis e à baixa integração entre áreas operacionais e administrativas. Nessas condições, as decisões relacionadas ao tratamento dos resíduos e à destinação das frações tendem a ser orientadas por critérios econômicos imediatos ou por exigências

contratuais, sem o suporte de instrumentos analíticos capazes de avaliar impactos ambientais de forma abrangente.

Além disso, limitações associadas à infraestrutura tecnológica e aos sistemas de informação reforçam esses entraves, ampliando a distância entre a operação cotidiana e a adoção de ferramentas analíticas mais complexas. Conforme sintetizado no Quadro 10, os desafios tecnológicos incluem a ausência de sistemas integrados de rastreabilidade, a fragmentação das bases de dados e a baixa usabilidade das ferramentas disponíveis, fatores que tornam a aplicação da ACV onerosa e pouco aderente à realidade das empresas, sobretudo daquelas de menor porte.

A comparação entre os entraves identificados empiricamente e os achados da literatura evidencia forte convergência entre teoria e prática. Os padrões observados nas empresas analisadas corroboram os desafios operacionais, organizacionais e tecnológicos identificados na revisão sistemática da literatura, sintetizados nos Quadro 4 e Quadro 5, que apontam a recorrência dessas limitações em diferentes contextos nacionais e organizacionais.

Adicionalmente, os entraves gerenciais identificados podem ser compreendidos à luz das pressões estruturais que caracterizam o setor de reciclagem de REEE. Nesse sentido, o embasamento teórico apresentado no Quadro 7, fundamentado no modelo das Cinco Forças de Porter, contribui para explicar como fatores externos, como dependência de contratos de logística reversa, pressão por preços, concorrência informal e barreiras à entrada, influenciam diretamente a capacidade das empresas de investir em práticas de gestão ambiental mais estruturadas, incluindo a ACV.

Por fim, a análise comparativa das ações ligadas aos fluxos internos e externos, às pessoas, à documentação, aos custos e às parcerias, Quadro ao Quadro 21 evidenciam que os entraves à adoção da ACV emergem da combinação entre limitações operacionais, fragilidades organizacionais e restrições tecnológicas, e não de um único fator isolado. Esses resultados reforçam as limitações apontadas na literatura quanto à aplicação empírica da ACV em recicladoras de REEE (Quadro 5), reforçando a necessidade de abordagens graduais e contextualizadas, discutidas nos itens subsequentes.

5.1.3. Uso atual e potencial da ACV nas empresas investigadas

A análise do uso atual da Avaliação do Ciclo de Vida nas empresas investigadas foi orientada pelo foco analítico específico relacionado à ACV, conforme definido no Quadro 6, que distingue entre a aplicação formal da ferramenta, sua menção conceitual ou a inexistência de uso estruturado. Os resultados evidenciam que, embora nenhuma das empresas aplique a ACV de forma plena e institucionalizada, há diferentes níveis de aproximação com a lógica do ciclo de vida.

De modo geral, a ausência de aplicação formal da ACV não implica a inexistência de práticas ambientais ou de critérios decisórios relacionados aos impactos ambientais. A análise comparativa das empresas quanto aos seus planos, próximos passos e percepções sobre a ACV (Quadro 22 ao

Quadro 24) indicam que as decisões relacionadas ao tratamento e à destinação dos resíduos são orientadas por preocupações com eficiência operacional, riscos ambientais e conformidade regulatória, embora essas decisões não sejam sustentadas por análises de ciclo de vida estruturadas.

O uso da ACV, quando presente, ocorre predominantemente de forma indireta ou potencial, frequentemente associado a exigências externas, como contratos de logística reversa, demandas de clientes ou processos de licenciamento ambiental. Esse padrão reforça os desafios tecnológicos sintetizados no Quadro 10, especialmente no que se refere à fragmentação das bases de dados, à ausência de sistemas integrados de rastreabilidade e à baixa usabilidade das ferramentas analíticas disponíveis. Nessas condições, a ACV passa a ser percebida como um instrumento complexo e distante da realidade operacional das empresas.

Ao mesmo tempo, os resultados empíricos indicam a existência de bases informacionais parciais que poderiam sustentar, de forma incremental, a adoção da ACV. A análise das ações relacionadas à geração e caracterização dos resíduos, aos fluxos internos e externos e à documentação (Quadros 14, 16, 17 e 19) evidencia que parte das informações necessárias para a construção de inventários de ciclo de vida já é produzida no cotidiano das empresas, ainda que de forma dispersa e não sistematizada. O principal desafio reside, portanto, na integração dessas informações e na sua tradução em indicadores ambientais consistentes.

Essa leitura reforça a compreensão de que o potencial de uso da ACV nas recicladoras analisadas está condicionado não apenas à disponibilidade de dados, mas à capacidade organizacional e tecnológica de integrá-los aos processos decisórios. Assim, a ACV emerge menos como uma ferramenta ausente e mais como um instrumento latente, cuja adoção depende do avanço gradual nas dimensões operacional, organizacional e tecnológica, conforme discutido nos itens anteriores.

5.1.4. Implicações dos resultados para a formulação de diretrizes práticas baseadas na ACV

As implicações dos resultados obtidos para a formulação de diretrizes práticas baseadas na Avaliação do Ciclo de Vida decorrem da análise integrada das evidências empíricas e teóricas apresentadas ao longo deste capítulo. A interação entre os desafios operacionais, organizacionais e tecnológicos sintetizados nos Quadros 8, 9 e 10 evidencia que a adoção da ACV não pode ser tratada como uma decisão isolada ou puramente técnica, mas como parte de um processo mais amplo de fortalecimento da gestão ambiental nas recicladoras de REEE.

A elevada heterogeneidade estrutural observada entre as empresas analisadas, evidenciada nos Quadros 13 a 21, reforça a necessidade de diretrizes que reconheçam diferenças de porte, escopo operacional e maturidade organizacional. Diretrizes excessivamente normativas e uniformes tendem a desconsiderar essas especificidades, limitando sua aplicabilidade prática, especialmente no contexto de micro e pequenas empresas que atuam nas etapas iniciais da cadeia de logística reversa.

Nesse sentido, a integração conceitual entre ACV, EC e LR, conforme apresentada no Quadro 2, fornece um referencial analítico adequado para a proposição de diretrizes que articulem eficiência operacional, rastreabilidade e desempenho ambiental. Os resultados indicam que a ACV deve ser incorporada de forma incremental, alinhada aos focos analíticos definidos no Quadro 6, de modo a apoiar decisões progressivas relacionadas à priorização de fluxos, à valorização de materiais e à conformidade ambiental.

Além disso, a análise dos fatores que influenciam a realização de uma ACV, sintetizados no Quadro 24, evidencia que a efetividade das diretrizes depende da articulação entre capacidades internas das empresas e condicionantes externos, como exigências regulatórias, contratos de logística reversa e pressões competitivas.

Dessa forma, as diretrizes a serem propostas no capítulo seguinte fundamentam-se na compreensão de que a ACV deve ser tratada como instrumento integrador, capaz de articular dimensões operacionais, organizacionais e tecnológicas em contextos empresariais reais.

5.2. Discussão orientada por dimensão analítica

5.2.1. Dimensão operacional

A análise dos casos sob a perspectiva da dimensão operacional evidencia que a aplicação da ACV em recicladoras de REEE é fortemente condicionada pela instabilidade e pela heterogeneidade dos processos produtivos. Essa heterogeneidade operacional, observada de forma recorrente nas empresas analisadas, encontra-se sintetizada nos desafios operacionais sistematizados no Quadro 8, os quais evidenciam limitações associadas à variabilidade dos fluxos de entrada, à diversidade da composição material dos resíduos e à predominância de processos manuais nas etapas iniciais de triagem e desmontagem.

De maneira transversal aos casos analisados, observa-se que os fluxos de entrada de resíduos apresentam elevada variabilidade quanto à origem, ao estado de conservação e à presença de componentes perigosos. Essas características dialogam diretamente com as evidências empíricas apresentadas nos Quadros 14 e 16, que demonstram diferenças significativas entre as empresas no que se refere à geração, caracterização e organização dos fluxos de REEE. Essa variabilidade dificulta a padronização das rotinas operacionais e compromete a previsibilidade das etapas de tratamento.

No âmbito da separação e da triagem, a predominância de procedimentos manuais e dependentes da experiência individual dos operadores constitui um fator crítico. Conforme evidenciado no Quadro 17, a ausência de critérios padronizados de segregação e a limitação de infraestrutura dedicada à triagem aprofundam o risco de contaminação cruzada e perdas de material, impactando diretamente a qualidade das frações destinadas à valorização do material. Essas fragilidades operacionais limitam a geração de dados confiáveis sobre entradas, saídas e rendimentos dos processos.

Do ponto de vista explicativo, a dimensão operacional configura-se como o primeiro gargalo à adoção da ACV, uma vez que a ferramenta pressupõe a existência de processos relativamente estáveis e de registros consistentes de fluxos materiais.

A análise integrada dos desafios operacionais apresentados no Quadro 8 e das evidências empíricas sistematizadas nos Quadros 16, 17 e 18 indica que, em contextos marcados por informalidade e variabilidade, a ACV tende a ser percebida como pouco aderente à realidade produtiva das recicladoras.

Esses achados corroboram a literatura analisada na revisão sistemática, que aponta a instabilidade operacional como um entrave recorrente à aplicação empírica da ACV em sistemas de reciclagem. Tal convergência reforça as limitações identificadas na literatura quanto à operacionalização da ACV em contextos reais, conforme discutido no Quadro 5, reforçando que a superação desse gargalo depende de mudanças que extrapolam o nível estritamente operacional. Nesse sentido, a análise da dimensão operacional conduz naturalmente à discussão sobre os condicionantes organizacionais que sustentam, ou inviabilizam, a institucionalização de práticas analíticas mais avançadas.

5.2.2. Dimensão organizacional

A análise da dimensão organizacional evidencia que a adoção da Avaliação do Ciclo de Vida nas recicladoras investigadas é fortemente condicionada ao nível maturidade das estruturas internas de gestão, pela definição de papéis e pela capacidade de integrar informações operacionais às rotinas decisórias. Os entraves associados a essa dimensão encontram-se sistematizados no Quadro 9, que evidencia fragilidades recorrentes relacionadas à centralização das decisões, à informalidade dos processos e à ausência de rotinas estruturadas de gestão ambiental.

De maneira transversal aos casos analisados, observa-se que a organização interna das empresas influencia diretamente a forma como dados operacionais são registrados, analisados e utilizados. Essa relação torna-se evidente quando considerados os critérios de elegibilidade das empresas participantes do estudo (Quadro 12), os quais refletem diferentes níveis de formalização organizacional e capacidade de coordenação interna. Em contextos em que não há clareza na distribuição de responsabilidades ou integração entre áreas operacionais e administrativas, os dados gerados ao longo do processo produtivo tendem a permanecer fragmentados e subutilizados.

Do ponto de vista explicativo, a dimensão organizacional atua como elemento intermediário entre os processos operacionais e a infraestrutura tecnológica. Mesmo quando há esforços para organizar fluxos produtivos ou investir em equipamentos, a ausência de governança interna e de rotinas sistemáticas de análise limita a institucionalização da ACV, conforme evidenciado nos desafios organizacionais apresentados no Quadro 9. Nessas condições, a ACV é frequentemente percebida como uma exigência externa ou uma atividade pontual, dissociada do núcleo da gestão empresarial.

Esses achados podem ser compreendidos à luz das pressões estruturais que caracterizam o setor de reciclagem de REEE. O referencial analítico baseado no modelo das Cinco Forças de Porter, apresentado no Quadro 7, contribui para explicar como fatores externos, como dependência de contratos de logística reversa, pressão por redução de custos, concorrência informal e barreiras à entrada, influenciam as escolhas organizacionais das empresas e restringem sua capacidade de investir em práticas de gestão ambiental mais estruturadas.

Além disso, a análise comparativa das práticas relacionadas à documentação, aos custos, às receitas e às parcerias (Quadros 19 e 20) evidencia que a fragilidade organizacional se reflete na dificuldade de estabelecer relações estáveis com atores da cadeia, bem como de internalizar exigências regulatórias e contratuais como instrumentos de gestão estratégica. Esse conjunto de fatores reforça a compreensão de que a dimensão organizacional não apenas condiciona a adoção da ACV, mas também amplifica ou reduz os efeitos das limitações operacionais e tecnológicas discutidas nas demais dimensões.

5.2.3. Dimensão tecnológica

A análise aprofundada da dimensão tecnológica evidencia que a operacionalização da ACV no contexto das recicladoras de REEE depende menos da ausência absoluta de dados do que da forma como as informações disponíveis são estruturadas, integradas e utilizadas ao longo da cadeia produtiva. Essa constatação decorre diretamente dos entraves tecnológicos sistematizados no Quadro 10, que evidenciam limitações associadas à fragmentação das bases de dados, à ausência de sistemas integrados de rastreabilidade e à baixa usabilidade das ferramentas analíticas disponíveis.

Os resultados discutidos anteriormente indicam que, embora existam registros operacionais, documentais e produtivos nas empresas analisadas, esses dados permanecem fragmentados, pouco interoperáveis e, muitas vezes, dissociados dos processos decisórios estratégicos. Essa fragmentação torna-se evidente quando analisadas as práticas relacionadas aos fluxos internos e externos e à documentação operacional, conforme apresentado nos Quadros 16, 17 e 19, nos quais se observa a dificuldade de consolidar informações ao longo das diferentes etapas da logística reversa.

Nesse contexto, a dimensão tecnológica assume papel central como elemento articulador entre os esforços operacionais e a capacidade organizacional de transformar dados em informação ambiental qualificada. A articulação entre limitações tecnológicas (Quadro 10), fragilidades operacionais (Quadro 8) e entraves organizacionais (Quadro 9) evidencia que a ausência de sistemas adequados potencializa os desafios já existentes nos processos produtivos e nas estruturas de gestão, comprometendo a construção de inventários consistentes de ciclo de vida e a confiabilidade das análises ambientais.

Os achados empíricos reforçam que a complexidade percebida das ferramentas de ACV e a baixa usabilidade dos modelos analíticos constituem barreiras relevantes à sua adoção. Essa percepção é coerente com os fatores que influenciam a realização de uma ACV sintetizados no Quadro 24, especialmente no que se refere à necessidade de infraestrutura informacional compatível com a realidade operacional das empresas. Em ambientes caracterizados por alta variabilidade de fluxos, diversidade de materiais e necessidade de respostas operacionais rápidas, soluções tecnológicas excessivamente robustas ou descoladas do cotidiano produtivo tendem a ser rejeitadas, subutilizadas ou pouco incorporadas à rotina empresarial. Assim, a dimensão tecnológica não deve ser compreendida apenas como infraestrutura física ou digital, mas como a capacidade de adaptação das ferramentas analíticas às rotinas reais de trabalho.

Ao mesmo tempo, os resultados também indicam que a digitalização gradual de processos, associada ao fortalecimento da rastreabilidade e à padronização mínima dos registros operacionais, pode ampliar significativamente o potencial de uso da ACV. Essa leitura dialoga diretamente com o foco analítico relacionado ao uso ou não da ACV, conforme definido no Quadro 6, ao evidenciar que parte das informações

necessárias à realização de análises de ciclo de vida já é produzida, ainda que de forma dispersa. Tecnologias voltadas à coleta estruturada de dados, ao acompanhamento dos fluxos materiais e à integração entre etapas da logística reversa configuram oportunidades estratégicas para aproximar a ACV da prática empresarial, desde que implementadas de forma incremental e alinhadas às capacidades organizacionais existentes.

Dessa forma, a dimensão tecnológica emerge como eixo estruturante para a viabilização da ACV em contextos reais de reciclagem de REEE, atuando de forma transversal às dimensões operacional e organizacional. A convergência entre os achados empíricos e as lacunas identificadas na revisão sistemática da literatura, sintetizadas no Quadro 5, reforça que a adoção efetiva da ACV requer soluções tecnológicas intermediárias, capazes de conectar dados operacionais dispersos, apoiar decisões cotidianas e evoluir progressivamente para análises ambientais mais abrangentes. Essa compreensão fundamenta a proposição de diretrizes práticas no capítulo seguinte, orientadas a promover a integração entre tecnologia, gestão e desempenho ambiental no setor.

6. Conclusão

O presente estudo teve como objetivo geral analisar os entraves e as possibilidades de aplicação da ACV no contexto da gestão de REEE, a partir da integração entre economia circular, logística reversa e gestão de operações, considerando a realidade de recicladoras paulistas. Para tanto, a pesquisa adotou uma abordagem qualitativa, de caráter exploratório, estruturada por meio de revisão sistemática da literatura e estudo de casos múltiplos.

Os resultados obtidos permitem afirmar que a aplicação da ACV no contexto empresarial analisado permanece incipiente, não por ausência de reconhecimento de sua relevância, mas em função de entraves estruturais que se manifestam de forma interdependente nas dimensões operacional, organizacional e tecnológica. A elevada heterogeneidade das empresas investigadas, associada à variabilidade dos fluxos de resíduos, à predominância de processos manuais, à fragmentação das informações e à limitada maturidade organizacional, condiciona diretamente a viabilidade de adoção de instrumentos analíticos mais complexos, como a ACV.

A análise orientada pelos objetivos específicos evidenciou que, embora práticas associadas à logística reversa e à economia circular estejam presentes nas empresas analisadas, estas ocorrem de maneira fragmentada e pouco sistematizada. A ACV, quando considerada, assume caráter pontual, indireto ou potencial, frequentemente associada a exigências externas, como contratos, certificações ou demandas regulatórias, sem integração plena aos processos decisórios internos. Ainda assim, os resultados indicam a existência de bases informacionais e práticas operacionais que poderiam sustentar, de forma incremental, a adoção futura da ACV, desde que acompanhadas por avanços na organização dos processos e na integração dos sistemas de informação.

A discussão por dimensão analítica permitiu aprofundar os mecanismos explicativos que condicionam esse cenário. Do ponto de vista operacional, a instabilidade dos fluxos e a informalidade dos processos limitam a geração de dados consistentes. Na dimensão organizacional, a ausência de estruturas formais de governança e de rotinas sistemáticas de análise impede a institucionalização da ACV como ferramenta contínua de apoio à decisão. Já na dimensão tecnológica, a fragmentação das bases de dados e a baixa usabilidade das ferramentas disponíveis

reforçam a percepção de complexidade da ACV, ampliando a distância entre teoria e prática.

6.1. Contribuições para a área

O presente estudo oferece diversas contribuições para o setor de gestão de resíduos eletroeletrônicos, especialmente no contexto de recicladoras brasileiras de diferentes portes. Entre as principais contribuições, destacam-se:

- Análise crítica dos métodos de reciclagem de REEE, evidenciando a predominância de processos mecânicos e manuais nas etapas iniciais da cadeia, bem como das suas limitações técnicas, operacionais e ambientais no contexto brasileiro.
- Identificação dos principais entraves operacionais, organizacionais e tecnológicos que condicionam a adoção da Avaliação do Ciclo de Vida em recicladoras de REEE, destacando fatores como heterogeneidade dos fluxos, informalidade dos processos, fragmentação das informações e limitações de infraestrutura.
- Integração dos referenciais de ACV, economia circular e logística reversa à gestão de operações, contribuindo para a compreensão de que a adoção da ACV depende de condições estruturais e organizacionais prévias, e não apenas da disponibilidade de métodos ou softwares.
- Análise do papel das políticas públicas e dos marcos regulatórios, evidenciando que, embora essenciais para estruturar a logística reversa, esses instrumentos, de forma isolada, são insuficientes para garantir a efetiva institucionalização de práticas ambientais avançadas no setor.
- Aplicação do modelo das Cinco Forças de Porter ao setor de reciclagem de REEE, demonstrando como pressões competitivas, dependência de fornecedores, barreiras à entrada e rivalidade influenciam diretamente as decisões estratégicas e a sustentabilidade das operações.
- Contribuição metodológica por meio do desenvolvimento e uso de um fluxograma analítico, que se mostrou eficaz para mapear fluxos, identificar gargalos de maturidade, comparar diferentes contextos empresariais e apoiar a visualização de oportunidades de melhoria e inovação.
- Geração de subsídios práticos para gestores e formuladores de políticas, ao indicar caminhos graduais, contextualizados e compatíveis para a adoção

da lógica de ciclo de vida, respeitando as limitações reais enfrentadas por empresas de diferentes portes.

6.2. Limitações do estudo

Apesar das contribuições apresentadas, este estudo apresenta limitações que devem ser consideradas na interpretação de seus resultados. A principal limitação refere-se ao caráter qualitativo e exploratório da pesquisa, bem como ao número restrito de empresas analisadas, o que impede a generalização estatística dos achados para todo o setor de reciclagem de REEE.

A seleção intencional dos casos, embora coerente com os objetivos da pesquisa e adequada à estratégia metodológica adotada, contemplou realidades específicas do contexto paulista, não contemplando a diversidade de arranjos organizacionais, níveis de informalidade e estruturas logísticas existentes em outras regiões do país. Dessa forma, os resultados devem ser interpretados como representativos de contextos semelhantes aos analisados, e não como um retrato exaustivo do setor.

Outra limitação está associada ao foco da pesquisa na análise das condições para a aplicação da ACV, e não na realização de ACVs quantitativas completas. Assim, o estudo não permite comparar desempenhos ambientais entre empresas ou quantificar impactos evitados, limitando-se à identificação de entraves, oportunidades e potenciais de adoção futura da ferramenta.

Adicionalmente, a pesquisa baseou-se em dados qualitativos obtidos por meio de entrevistas, observações diretas e análise documental. Embora tenha sido adotada a triangulação de fontes e estratégias de validação, como devolutivas parciais aos participantes, não elimina completamente a possibilidade de vieses interpretativos ou limitações decorrentes da percepção dos atores envolvidos.

6.3. Recomendações práticas

As recomendações práticas apresentadas neste estudo derivam diretamente da análise empírica realizada e devem ser compreendidas à luz da heterogeneidade estrutural observada entre as recicladoras de REEE. Considerando as diferenças de porte, maturidade organizacional e capacidade tecnológica, não se propõem soluções uniformes, mas orientações graduais e contextualizadas, capazes de apoiar a

evolução das práticas de gestão ambiental e a futura incorporação da lógica de ciclo de vida.

Para empresas de pequeno porte, como observado no caso da empresa A, recomenda-se que o foco inicial esteja na organização básica dos processos operacionais e na padronização mínima dos registros relacionados à entrada, triagem e saída de resíduos. A adoção imediata de ferramentas completas de ACV tende a ser inviável nesse contexto, considerando as limitações de recursos financeiros, humanos e informacionais. Entretanto, a sistematização de dados operacionais elementares, associada à melhoria da rastreabilidade dos fluxos, constitui um passo fundamental para a construção de bases mínimas que possam, futuramente, sustentar análises ambientais mais estruturadas. Nesses casos, o apoio externo especializado e o uso de instrumentos simplificados podem auxiliar na geração inicial de informações ambientais sem impor custos excessivos ou complexidade operacional.

Para empresas de porte intermediário, como no caso da empresa C, recomenda-se o fortalecimento dos indicadores ambientais e operacionais já existentes, bem como a integração progressiva dessas informações aos processos decisórios. A digitalização gradual dos registros, aliada à padronização dos procedimentos de triagem, processamento e destinação, pode aumentar a confiabilidade dos dados e reduzir a fragmentação informacional observada. Nesse estágio, a busca por certificações ambientais, o estabelecimento de parcerias ao longo da cadeia de logística reversa e o alinhamento com práticas de economia circular podem contribuir para o aumento da maturidade organizacional e para a viabilização futura da aplicação da ACV.

No caso de empresas de grande porte, como observado no caso da empresa B, recomenda-se a incorporação mais estruturada da ACV como instrumento de apoio à tomada de decisão, à gestão de contratos e à comunicação de desempenho ambiental. Nesses contextos, a escolha de ferramentas de ACV deve estar alinhada a métodos reconhecidos e a normas internacionais, com atenção à consistência dos dados utilizados, à adaptação das bases à realidade local e à integração entre áreas técnicas, operacionais e gerenciais. A ACV pode, nesse estágio, contribuir de forma mais direta para a avaliação de cenários, a priorização de investimentos e o fortalecimento da competitividade empresarial.

De forma transversal, recomenda-se que empresas, formuladores de políticas públicas e demais atores da cadeia de REEE reconheçam que a efetiva adoção da ACV depende menos da ferramenta escolhida do que do fortalecimento das condições organizacionais e informacionais que sustentam sua aplicação. Investimentos em capacitação técnica, integração de dados, governança da logística reversa e articulação entre os diferentes elos da cadeia mostram-se essenciais para ampliar a efetividade das práticas de economia circular e promover avanços consistentes na gestão sustentável de resíduos eletroeletrônicos.

6.4. Recomendações de pesquisas futuras

Com base nos resultados obtidos e nas limitações identificadas, recomenda-se o desenvolvimento de pesquisas futuras que aprofundem a compreensão sobre a aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida no contexto da gestão de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos, considerando diferentes níveis de maturidade organizacional, arranjos institucionais e capacidades tecnológicas.

Estudos futuros podem avançar na aplicação empírica da ACV em recicladoras previamente caracterizadas, com o objetivo de realizar avaliações quantitativas completas e comparar cenários operacionais distintos, como diferentes estratégias de triagem, níveis de mecanização e modelos de logística reversa. Esse aprofundamento possibilitaria quantificar impactos ambientais evitados e avaliar de forma mais objetiva o desempenho ambiental das empresas.

Recomenda-se, ainda, a realização de pesquisas que integrem indicadores ambientais, sociais e econômicos, ampliando a análise para além dos impactos ambientais tradicionalmente avaliados pela ACV. Abordagens integradas podem contribuir para compreender os efeitos da gestão de REEE sobre geração de renda, condições de trabalho, inclusão de cooperativas e desenvolvimento regional, fortalecendo a integração entre sustentabilidade ambiental e justiça social.

Outra agenda de pesquisa relevante consiste na investigação do papel das políticas públicas em escala local e regional, especialmente no que se refere à atuação de municípios e consórcios intermunicipais na estruturação da logística reversa e na criação de incentivos para a adoção de métricas ambientais baseadas em ciclo de vida. Estudos comparativos entre diferentes contextos institucionais podem oferecer subsídios para o aprimoramento dos instrumentos regulatórios existentes.

Adicionalmente, sugere-se o aprofundamento de pesquisas voltadas à governança da informação e à integração de dados ao longo da cadeia de REEE, explorando como sistemas de rastreabilidade, digitalização de registros e compartilhamento de informações entre atores podem reduzir barreiras à aplicação da ACV e ampliar a confiabilidade das análises.

Por fim, recomenda-se que pesquisas futuras investiguem de forma mais sistemática a adaptação de métodos e bases de dados de ACV à realidade brasileira, considerando especificidades como matriz energética, informalidade operacional e diversidade regional. Esse esforço pode contribuir para reduzir a dependência de dados secundários internacionais e ampliar a aplicabilidade da ACV como instrumento de apoio à tomada de decisão em contextos locais.

Apêndice 1: Detalhamento da relação dos resultados da RSL quanto aos 12 focos analíticos encontrados

Este apêndice sintetiza a codificação qualitativa dos artigos aprovados, relacionando cada estudo às 12 áreas analíticas definidas na pesquisa. A marcação (X) indica a presença de evidência direta ou indireta em determinada área, conforme identificado nas seções de resultados, discussão e conclusões dos artigos.

Fonte	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
(Andersen e Jæger, 2021)				x			x		x		x	x
(Anić Vučinić <i>et al.</i> , 2023a)		x	x	x						x	x	
(Bhattacharjee <i>et al.</i> , 2023)	x	x		x		x	x	x	x	x		x
(Bill <i>et al.</i> , 2022)		x	x	x			x			x	x	
(Botelho Junior <i>et al.</i> , 2024)		x		x			x		x	x	x	x
(Boyden, Soo e Doolan, 2016)	x	x	x	x	x		x	x		x		x
(Bressanelli <i>et al.</i> , 2021)					x	x	x	x	x	x		
(Carvalho <i>et al.</i> , 2025)		x			x		x	x		x	x	
(Cordisco, Melloni e Botti, 2022)	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	
(Correia <i>et al.</i> , 2024)												
(Curran, 2018)				x		x	x		x	x	x	x
(Da Silva e Franz, 2025)		x		x	x	x	x	x	x	x	x	
(Da Silva Müller Teixeira <i>et al.</i> , 2021)		x	x	x	x					x	x	x
(De Souza <i>et al.</i> , 2016)		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
(Dong <i>et al.</i> , 2022)				x	x		x	x	x	x	x	
(Flygansvær, Dahlstrom e Nygaard, 2018)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
(Frantz Schneider, Aanestad e Carvalho, 2024)	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
(Gerbase e Oliveira, 2012b)		x	x	x	x			x		x	x	
(Ghiga <i>et al.</i> , 2023)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
(Ghisellini, Passaro e Ulgiati, 2023)		x	x	x	x			x	x	x	x	x
(Gonda e Degrez, 2018)	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x
(Guo, 2025)				x	x		x	x	x	x	x	
(Hämmer e Wambach, 2024)		x	x	x	x		x		x	x	x	x
(Kouloumpis <i>et al.</i> , 2023)	x	x	x	x					x	x	x	x
(Liu <i>et al.</i> , 2022)		x	x	x	x					x	x	x
(Marconi <i>et al.</i> , 2018)	x	x	x	x	x			x	x	x	x	
(Mattos e Calmon, 2023b)	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x
(Menad, Guignot e Van Houwelingen, 2013)		x	x	x				x	x	x	x	
(Messmann <i>et al.</i> , 2019)	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x
(Mosora <i>et al.</i> , 2023)	x	x			x							x
(Nikolic <i>et al.</i> , 2024)		x	x	x	x		x	x		x	x	x
(Nowakowski e Mrówczyńska, 2018)		x		x	x		x	x	x	x	x	
(Oliveira <i>et al.</i> , 2025)		x		x		x	x			x	x	
(Pirvu <i>et al.</i> , 2023)		x				x	x	x	x	x	x	
(Pollard <i>et al.</i> , 2021)	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	
(Ramteke, Varadwaj e Tiwari, 2025)		x	x		x		x		x	x	x	x
(Rittershaus, Aryan e Renner, 2025)				x	x	x	x	x	x	x	x	
(Rocha e Penteado, 2021)		x		x	x	x	x		x	x	x	

(Souza, Guarnieri e Vieira, 2025)				x	x		x	x	x	x	x	
(Vargas, Campos e Luna, 2023)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
(Mendes Campolina <i>et al.</i> , 2017)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
(Abdelmeguid e Corsini, 2026)	x			x	x	x	x	x	x	x		
(Moslehi, Sahebi e Teymouri, 2021)	x			x	x		x	x	x		x	x
(Citterio, Baiguera e Colledani, 2026)	x	x	x	x	x		x	x			x	x
(Chowdhury <i>et al.</i> , 2026)		x		x	x	x	x		x	x	x	x

Nota: 1 = Perfil da empresa; 2 = Geração e caracterização dos resíduos; 3 = Práticas de separação e triagem; 4 = Infraestrutura e tecnologia; 5 = Fluxo interno e logística externa; 6 = Pessoas, papéis e treinamento; 7 = Conformidade e documentação; 8 = Custos, receitas e contratos; 9 = Parcerias e economia circular; 10 = Barreiras e soluções; 11 = Planos e próximos passos; 12 = Uso (ou não) de ferramentas de ACV.

Apêndice 2: Detalhamento da conexão dos estudos elencados em relação ao proposto neste estudo

Autor (ano)	Relação do artigo com o proposto no presente estudo
Andersen e Jæger (2021)	Evidencia que a circularidade de EEE e a viabilidade de instrumentos analíticos como a ACV dependem de estruturas de governança da informação, coordenação entre atores e maturidade organizacional, tratando a tecnologia digital como meio habilitador e não como solução operacional isolada.
Bhattacharjee et al. (2023)	Identifica fatores críticos de sucesso e barreiras organizacionais à economia circular no setor de REEE, evidenciando que aspectos humanos, financeiros e gerenciais condicionam a adoção de ferramentas analíticas como a ACV.
Guo (2025)	Propor um modelo matemático de apoio à decisão para a economia circular de resíduos eletrônicos, focado na otimização de redes de logística reversa, custos e eficiência sistêmica, porém, em seu modelo, não considera práticas operacionais reais de recicladoras nem a aplicação empírica da ACV em contextos empresariais.
Oliveira Neto et al. (2025)	Oliveira Neto et al. (2025) enquadra-se no bloco organizacional e gerencial por analisar, a partir de especialistas, as inter-relações entre barreiras tecnológicas, organizacionais e institucionais à recuperação de materiais de REEE no Brasil
Pollard et al. (2021)	Pollard et al. (2021) enquadra-se no bloco organizacional por propor um framework de inovação de modelos de negócio circulares para fabricantes de EEE, focando em governança, valor e processos decisórios, sem tratar a ACV como ferramenta operacional integrada.
Rittershaus, Aryan e Renner (2025)	Rittershaus et al. (2025) integra o bloco organizacional ao sistematizar barreiras, facilitadores e interdependências para adoção da economia circular no setor de eletrônicos, com forte enfoque em valor, governança e coordenação, sem aplicação prática da ACV.
Cordisco, Melloni e Botti (2022)	Análise do desempenho, eficiência e entraves estruturais de sistemas de gestão de REEE, tratando a tecnologia e os fluxos como capacidades organizacionais e não como processos operacionais detalhados.
Dong et al. (2022)	Aborda barreiras econômicas, logísticas e institucionais à gestão de REEE em nível sistêmico, enfatizando decisões estratégicas e condições estruturais que antecedem a aplicação de instrumentos ambientais como a ACV.
Moslehi et al. (2021)	Serve para mostrar a distância entre modelos ideais e a realidade das recicladoras.
Anić Vučinić et al. (2023)	Viabilidade química e laboratorial da recuperação de metais críticos a partir de REEE, discutindo processos e rendimentos técnicos sem considerar restrições organizacionais, econômicas ou operacionais de recicladoras reais.
Bill et al. (2022)	Caracteriza detalhadamente a composição e o comportamento de plásticos provenientes de REEE em instalações de tratamento, priorizando aspectos analíticos e regulatórios do material em detrimento da gestão interna e da tomada de decisão organizacional.
Da Silva Müller Teixeira et al. (2021)	Analisa criticamente a aplicabilidade metodológica da ACV a sistemas de REEE, com foco em dados técnicos, limites de inventário e desafios metodológicos, sem avançar para a operacionalização da ACV em contextos empresariais concretos.
Gerbase e De Oliveira (2012)	A evidência dominante está em caracterização do resíduo, rotas tecnológicas e entraves técnico-econômicos da recuperação de metais, com pouca ou nenhuma discussão gerencial e sem ACV.

Ghisellini, Passaro e Ulgiati (2023)	Evidencia uma orientação teórico-metodológica baseada em ACV e avaliação sistêmica para a reciclagem de REEE.
Hämmer e Wambach (2024)	A evidência dominante é técnica e metodológica, com foco em caracterização de materiais, processos de separação, infraestrutura de reciclagem e cálculo de reciclabilidade, sem análise organizacional, econômica ou empírica de recicladoras reais.
Kouloumpis et al. (2023)	Apesar de utilizar dados reais de centros de triagem, Kouloumpis et al. (2023) permanece no bloco técnico-material porque a ACV é aplicada como instrumento avaliativo ambiental, sem integrar a ferramenta aos processos decisórios, econômicos ou gerenciais das organizações analisadas.
Liu et al. (2022)	Nos resultados e na discussão, Liu et al. demonstram que o desempenho ambiental da reciclagem de plásticos provenientes de REEE é altamente sensível à qualidade da separação. A ACV comparativa evidencia que cenários com maior recuperação mássica, mas com mistura de polímeros, podem apresentar benefícios ambientais inferiores aos cenários com menor recuperação total, porém maior pureza.
Menad, Guignot e Van Houwelingen (2013)	Menad et al. (2013) fornece evidência predominantemente técnico-material, focada em caracterização de REEE, separação, recuperação e viabilidade técnica de processos, sem análise organizacional específica, econômica ou aplicação de ACV.
Nikolic et al. (2024)	Apesar de incorporar dados reais de fabricantes e sistemas de take-back, Nikolic et al. (2024) permanece no bloco técnico-material, pois utiliza a ACV como ferramenta avaliativa para comparar estratégias de fim de vida
A knowledge-based method	Dialoga diretamente com recicladoras pequenas e médias e Mostra como decisões operacionais são tomadas antes da ACV.
Botelho Junior et al. (2024)	Analisa a evolução de políticas públicas, marcos regulatórios e tecnologias de reciclagem em países emergentes, evidenciando como o contexto normativo condiciona a organização da cadeia de REEE antes mesmo do nível empresarial.
Bressanelli et al. (2021)	A evidência dominante é macro-institucional e sistêmica, com foco em governança, políticas públicas, modelos de negócio circulares e diretrizes estratégicas para empresas e formuladores de políticas, sem análise operacional de recicladoras.
Correia et al. (2024)	Avalia práticas de economia circular na cadeia reversa de REEE no Brasil sob a ótica de políticas, acordos setoriais e arranjos institucionais
Curran (2018)	No contexto da sua pesquisa, a contribuição central do artigo está em explicitar um entrave estrutural e invisível à aplicação prática da ACV em recicladoras de REEE: mesmo quando há interesse metodológico, a ausência de dados regionais e específicos limita a operacionalização da ferramenta. Esse achado dialoga diretamente com a área 10 (barreiras) e sustenta, em nível metodológico, por que muitas análises permanecem conceituais ou dependentes de bases secundárias genéricas.
Da Silva e Franz (2025)	Propõe um framework de políticas públicas para países do BRICS, focando em governança, instrumentos regulatórios e diretrizes estratégicas para a gestão de REE.
Marconi et al. (2018)	Marconi et al. (2018) enquadra-se no bloco institucional por propor uma abordagem sistêmica para promover simbiose industrial no setor de REEE, focando na articulação entre oferta e demanda de materiais em nível interorganizacional.
Mattos e Calmon (2023)	O tipo de evidência dominante é institucional e sistêmica, com foco em arranjos de logística reversa, governança, PNRS e avaliação de sustentabilidade em nível macro, ainda que com uso parcial de ACV.

Nowakowski e Mrówczyńska (2018)	O tipo de evidência dominante é sistêmico e institucional, focado em modelagem da logística reversa, políticas de coleta, custos e emissões em nível territorial, com forte conexão à governança da economia circular, mas sem aplicação operacional de ACV
Pîrvu et al. (2023)	Pîrvu et al. (2023) insere-se no bloco institucional por analisar o desempenho dos países da União Europeia frente às metas regulatórias de REEE, enfatizando conformidade legal, indicadores macro e planejamento futuro
Ramteke, Varadwaj e Tiwari (2025)	Nos resultados, o artigo apresenta uma avaliação sistêmica da gestão de REEE sob a ótica da economia circular, analisando cenários, fluxos e indicadores ambientais e/ou econômicos associados às diferentes configurações de gestão. A análise não se concentra em empresas específicas, mas sim no desempenho global do sistema, considerando coleta, tratamento e destinação final.
De Souza et al. (2025)	Discute entraves à economia circular no setor de REEE brasileiro a partir da coordenação entre atores, políticas públicas e instrumentos regulatórios, destacando limitações estruturais que extrapolam o controle das empresas individuais.
Exploring barriers in the transition toward	Fornece evidência organizacional e institucional real, essencial para legitimar suas categorias de barreiras.
Battery waste management: Tackling environmental	Oferece evidência predominantemente sistêmica e regulatória, utilizando a Avaliação do Ciclo de Vida como instrumento de comparação tecnológica e suporte a políticas pública
De Souza et al 2016	Este artigo é fundamental para o seu arcabouço: integra ACV + MCDA para apoiar decisões de política pública em WEEE no Brasil. Embora não analise recicladoras individuais, cobre de forma robusta fluxos, logística, custos, conformidade e barreiras institucionais.
Boyden, Soo e Doolan (2016)	O artigo analisa recicladoras reais, descreve processos, custos, logística, exigências regulatórias e utiliza ACV para comparação de cenários, evidenciando a fragmentação da cadeia e limitações práticas de dados.
Carvalho et al. (2025)	Analisa a recuperação de materiais a partir de REEE em contexto brasileiro real, evidenciando simultaneamente potencial econômico, limitações tecnológicas e ausência de instrumentos ambientais integrados, como a ACV, na prática das recicladoras.
Flygansvær, Dahlstrom e Nygaard (2018)	O artigo analisa cadeias reversas reais, descreve processos operacionais, contratos, governança, logística e barreiras práticas, evidenciando a fragmentação da cadeia e a ausência de ACV operacional.
Frantz Schneider et al. (2024)	Investiga recicladoras formais brasileiras por meio de estudos de caso, revelando barreiras operacionais, organizacionais e econômicas que explicam por que a ACV permanece pouco aplicada no cotidiano do setor.
Ghiga et al. (2023)	O estudo analisa operações reais, descreve processos de coleta, triagem, logística, parcerias, barreiras práticas e aplica ACV a cenários concretos, evidenciando a fragmentação da cadeia e limites operacionais
Gonda e Degrez (2018)	O artigo analisa cadeias reais, descreve processos de coleta, triagem, logística, papéis organizacionais, parcerias, barreiras institucionais e aplica ACV comparativa a cenários concretos, evidenciando a fragmentação da cadeia e os limites práticos da gestão de REEE
Messmann et al. (2019)	Embora o estudo não analise recicladoras privadas, ele investiga operações reais de gestão de resíduos em pontos de coleta municipais, descrevendo processos, fluxos, danos, barreiras e soluções práticas. O artigo apresenta evidência empírica rica, mas fragmentada, e não aplica ACV de forma operacional

Rocha e Penteado (2021)	Rocha & Penteado oferecem evidência empírica direta sobre a realidade brasileira da reciclagem de REEE, descrevendo processos reais, atores, fluxos, barreiras sociais e organizacionais, mas sem aplicação de ACV e com análise econômica limitada
Vargas, Campos e Luna (2023)	Vargas et al. (2024) insere-se no bloco empírico por analisar, via estudo de caso, a estrutura formal da logística reversa de REEE no Brasil, evidenciando articulação entre atores, conformidade legal e fluxos operacionais reais, mas sem uso da ACV como ferramenta de gestão.
Campolina et al 2017	É um dos raríssimos estudos com ACV aplicada em recicladora real, alinhando operação, dados primários e impactos ambientais.

Apêndice 3: Instrumento de coleta de dados

1. Perfil da empresa

- Q1. O que a empresa produz e em que etapas surgem mais resíduos?
- Q2. Qual é o tamanho da operação (pessoas, turnos) e volume médio de produção?
- Q3. Há sazonalidade que muda o tipo/quantidade de resíduo?

2. Geração e Caracterização dos Resíduos

- Q4. Quais são os principais resíduos que aparecem e em que quantidade aproximada?
- Q5. Quais resíduos são mais difíceis de separar? Por quê?
- Q6. Existe mistura entre resíduos limpos e sujos? Em que situações isso acontece?

3. Práticas de separação e triagem

- Q7. A separação acontece no posto ou vai para uma área de triagem depois?
- Q8. Quais recipientes e áreas existem para separar e guardar os resíduos de forma correta até que sejam separados?
- Q9. Durante a triagem e a separação dos resíduos, vocês usam equipamentos (balança, prensa, triturador, esteira, separadores)? Quais e para quê?

4. Infraestrutura e Tecnologia

- Q10. A empresa utiliza tecnologias digitais (IA, big data, automação) em alguma etapa do tratamento de resíduos?
- Q11. Como é a infraestrutura das instalações da recicladora?
- Q12. Quais tecnologias de recuperação de materiais são aplicadas pela empresa?
- Q13. Quais materiais de interesse são recuperados pela empresa?

5. Fluxo interno e logística externa

- Q14. Como a empresa organiza sua logística reversa (canais, rotas, pontos de coleta)?
- Q15. Depois de separar, como o resíduo circula até o armazenamento/expedição?
- Q16. Para onde vai cada tipo de resíduo (destino final ou compradores)?

6. Pessoas, papéis e treinamento

- Q17. Quem é o responsável oficial pelos resíduos? E quem faz no dia a dia?
- Q18. Que treinamentos existem sobre os processos realizados pela empresa? Com que frequência?
- Q19. Há manutenção e alguém responsável pelos equipamentos?

7. Conformidade e documentação

Q20. Quais são os principais desafios regulatórios e institucionais enfrentados?

Q21. Como a empresa lida com riscos ambientais e cumprimento regulatório?

Q22. Há práticas de inovação, pesquisa ou integração com políticas públicas?

Q23. Há metas internas (% reciclado, redução de aterro) ou auditorias?

8. Custos, receitas e contratos

Q24. Como a empresa adquire os REEE para tratamento? Como é a formação do preço?

Q25. Existem contratos com cooperativas e/ou empresas? O que está combinado?

Q26. Quais os principais custos da recicladora?

9. Parcerias e economia circular

Q27. Com quem vocês parceirizam (cooperativas, recicladores, logística reversa)?

Q28. Recebem feedback de qualidade de quem compra? O que pedem para melhorar?

Q29. A empresa participa de políticas públicas ou possui integração em programas de logística reversa/circularidade?

10. Barreiras e Soluções

Q30. Quais os maiores obstáculos para separar melhor?

Q31. O que já funcionou bem aqui que você recomendaria a outras empresas?

Q32. Quais são os resíduos mais difíceis de tratar? Eles representam uma barreira ao aumento da lucratividade da empresa?

11. Planos e próximos passos

Q33. Se pudesse mudar uma coisa no processo de separação amanhã, o que seria?

Q34. Há planos futuros (novos recipientes, prensa, área dedicada, metas)?

12. Uso (ou não) de ferramentas de ACV

Q35. Vocês já ouviram falar de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV/LCA)? Como entendem esse conceito?

Q36. A empresa já tentou ou pensou em utilizar algum software de ACV (ex.: SimaPro, OpenLCA, GaBi)? Qual foi a experiência?

Q37. Quais seriam as principais dificuldades que impedem o uso de ferramentas de ACV aqui? (ex.: custo, tempo, falta de dados, falta de equipe treinada).

Q38. Vocês acham que esses softwares realmente ajudariam a tomar melhores decisões sobre resíduos e sustentabilidade? Por quê?

Q39. Se houvesse uma versão simplificada ou gratuita, a empresa teria interesse em usar? O que seria essencial para funcionar na prática?

Q40. Na opinião de vocês, quem deveria apoiar ou financiar esse tipo de iniciativa?

Referências bibliográficas

Abdelmeguid, A. e Corsini, L. (2026) “Barriers and Enablers of Circular Economy in Electrical and Electronic Equipment: A Systematic Literature Review”, *Business Strategy and the Environment*, p. bse.70559. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/bse.70559>.

ABREMA (2024) *Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2024*. Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA). Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2024/12/panorama-dos-residuos-solidos-no-brasil-2024.pdf> (Acesso em: 14 de outubro de 2025).

Adrian, S. et al. (2020) *Authors: Vanessa Forti, Cornelis Peter Baldé, Ruediger Kuehr, Garam Bel*. Bonn / Geneva / Rotterdam: UNU / UNITAR / ITU / ISWA. Disponível em: <https://www.globalewaste.org>.

Agrawal, S. et al. (2024) “Analysis and recommendation system-based on PRISMA checklist to write systematic review”, *Assessing Writing*, 61, p. 100866. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.asw.2024.100866>.

Aldairi, J., Khan, M.K. e Munive-Hernandez, J.E. (2017) “Knowledge-based Lean Six Sigma maintenance system for sustainable buildings”, *International Journal of Lean Six Sigma*, 8(1), p. 109–130. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/IJLSS-09-2015-0035>.

Aminoff, A. e Sundqvist-Andberg, H. (2021) “Constraints leading to system-level lock-ins—the case of electronic waste management in the circular economy”, *Journal of Cleaner Production*, 322, p. 129029. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129029>.

Andersen, T. e Jæger, B. (2021) “Circularity for Electric and Electronic Equipment (EEE), the Edge and Distributed Ledger (Edge&DL) Model”, *Sustainability*, 13(17), p. 9924. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su13179924>.

Andersson, R., Eriksson, H. e Torstensson, H. (2006) “Similarities and differences between TQM, six sigma and lean”, *The TQM Magazine*. Organizado por S. Mi Dahlggaard-Park, 18(3), p. 282–296. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/09544780610660004>.

Anić Vučinić, A. et al. (2023a) “Indium Recycling from Waste Liquid Crystal Displays: Is It Possible?”, *Processes*, 11(6), p. 1662. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pr11061662>.

Anić Vučinić, A. et al. (2023b) “Indium Recycling from Waste Liquid Crystal Displays: Is It Possible?”, *Processes*, 11(6), p. 1662. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pr11061662>.

Baldé, C.P. et al. (2017) *The global e-waste monitor 2017: quantities, flows, and resources*. Geneva: International Telecommunication Union.

Barboza, L.L. et al. (2022) “VALORES ORGANIZACIONAIS COMO SUPORTE PARA A ECONOMIA CIRCULAR E A SUSTENTABILIDADE”, *Revista de Administração de Empresas*, 62(5), p. e2021-0331. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0034-759020220509x>.

Bechara, E. e Galli, A. (org.) (2013) *Aspectos relevantes da política nacional de resíduos sólidos: Lei nº 12,305/2010*. São Paulo: Editora Atlas S.A.

Belyamani, I. *et al.* (2025) "Life cycle analysis of mechanical recycling vs. conventional incineration for brominated acrylonitrile butadiene styrene (ABS) derived from WEEE", *Environmental Pollution*, 386, p. 127196. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.127196>.

Bhattacharjee, P. *et al.* (2023) "Critical success factors for circular economy in the waste electrical and electronic equipment sector in an emerging economy: Implications for stakeholders", *Journal of Cleaner Production*, 401, p. 136767. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136767>.

Bill, A. *et al.* (2022) "Characterizing plastics from large household appliances: Brominated flame retardants, other additives and density profiles", *Resources, Conservation and Recycling*, 177, p. 105956. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105956>.

Botelho Junior, A.B. *et al.* (2024) "Electronic waste in emerging countries: current scenario of generation, policies, and recycling technologies regarding the coronavirus pandemic", *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(1), p. 1121–1140. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13762-023-05128-9>.

Boyden, A., Soo, V.K. e Doolan, M. (2016) "The Environmental Impacts of Recycling Portable Lithium-Ion Batteries", *Procedia CIRP*, 48, p. 188–193. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.100>.

Brasil (2020) *Decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020, Presidência da República*. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/decreto/d10240.htm (Acesso em: 3 de novembro de 2025).

Bressanelli, G. *et al.* (2021) "Enablers, levers and benefits of Circular Economy in the Electrical and Electronic Equipment supply chain: a literature review", *Journal of Cleaner Production*, 298, p. 126819. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126819>.

Carvalho, M.C.N.D. *et al.* (2025) "Management and recovery of critical and strategic raw materials from E-Waste: A case study in Brazil with a focus on printed circuit boards", *Journal of Hazardous Materials Advances*, 17, p. 100544. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2024.100544>.

Cerchione, R. *et al.* (2025) "A critical analysis of the integration of life cycle methods and quantitative methods for sustainability assessment", *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 32(2), p. 1508–1544. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/csr.3010>.

Chowdhury, C.R. *et al.* (2026) "Battery waste management: Tackling environmental, health, and resource challenges from growing waste", *Chemical Engineering Journal Advances*, 25, p. 101033. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2026.101033>.

Ciccarelli, A. *et al.* (2025) "E-Waste Collection Under Recycling Hub Demand and Partial Information: The Benchmark Solution in a Pilot Case", em M. Dassisti, K. Madani, e H. Panetto (org.) *Innovative Intelligent Industrial Production and Logistics*. Cham: Springer Nature Switzerland (Communications in Computer and Information Science), p. 219–237. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-031-80775-6_16.

Citterio, P., Baiguera, F. e Colledani, M. (2026) "A knowledge based method for estimating the material content value of end of life PCBs", *Resources, Conservation and Recycling*, 224, p. 108561. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108561>.

- Cordisco, A., Melloni, R. e Botti, L. (2022) "Sustainable Circular Economy for the Integration of Disadvantaged People: A Preliminary Study on the Reuse of Lithium-Ion Batteries", *Sustainability*, 14(13), p. 8158. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su14138158>.
- Correia, A.J.C. et al. (2024) "Evaluation of circular economy practices for management of the reverse chain of electronic waste in Brazil", *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 26(6), p. 3699–3713. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10163-024-02071-w>.
- Curran, M.A. (2018) "Life Cycle Assessment—Theory and Practice: Springer, 2018", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(7), p. 1517–1519. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1461-9>.
- Da Silva, C.L. e Franz, N.M. (2025) "A Framework for Public Policy Development in BRICS Countries to Support Circular Economy Development in the WEEE Value Chain", *Recycling*, 10(1), p. 7. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/recycling10010007>.
- Da Silva Müller Teixeira, F. et al. (2021) "A Review on the Applicability of Life Cycle Assessment to Evaluate the Technical and Environmental Properties of Waste Electrical and Electronic Equipment", *Journal of Polymers and the Environment*, 29(5), p. 1333–1349. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01966-7>.
- Dabo, A.-A.A. e Hosseinian-Far, A. (2023) "An Integrated Methodology for Enhancing Reverse Logistics Flows and Networks in Industry 5.0", *Logistics*, 7(4), p. 97. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/logistics7040097>.
- Daub, C.-H. (2007) "Assessing the quality of sustainability reporting: an alternative methodological approach", *Journal of Cleaner Production*, 15(1), p. 75–85. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2005.08.013>.
- De Souza, R.G. et al. (2016) "Sustainability assessment and prioritisation of e-waste management options in Brazil", *Waste Management*, 57, p. 46–56. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.034>.
- Di Vaio, A. et al. (2022) "Corporate social performance and non-financial reporting in the cruise industry: Paving the way towards UN Agenda 2030", *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 29(6), p. 1931–1953. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/csr.2292>.
- Dong, D. et al. (2022) "Assessing China's potential for reducing primary copper demand and associated environmental impacts in the context of energy transition and 'Zero waste' policies", *Waste Management*, 144, p. 454–467. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.04.006>.
- European Commission. Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability. (2010) *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: general guide for life cycle assessment: detailed guidance*. LU: Publications Office. Disponível em: <https://data.europa.eu/doi/10.2788/38479> (Acesso em: 13 de novembro de 2025).
- Ferreira, R.A. (2024) *A Transdisciplinaridade na sociedade de consumo: desafios ambientais e consumo consciente*. São Paulo, SP: Editora Dialética.
- Ferronato, N. et al. (2020) "Application of a life cycle assessment for assessing municipal solid waste management systems in Bolivia in an international cooperative framework",

Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy, 38(1_suppl), p. 98–116. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0734242X20906250>.

Flygansvær, B., Dahlstrom, R. e Nygaard, A. (2018) “Exploring the pursuit of sustainability in reverse supply chains for electronics”, *Journal of Cleaner Production*, 189, p. 472–484. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.014>.

Frantz Schneider, A., Aanestad, M. e Carvalho, T.C. (2024) “Exploring barriers in the transition toward an established e-waste management system in Brazil: a multiple-case study of the formal sector”, *Environment, Development and Sustainability* [Preprint]. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05188-y>.

Gaustad, G. *et al.* (2018) “Circular economy strategies for mitigating critical material supply issues”, *Resources, Conservation and Recycling*, 135, p. 24–33. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.002>.

Gerbase, A.E. e Oliveira, C.R.D. (2012a) “Reciclagem do lixo de informática: uma oportunidade para a química”, *Química Nova*, 35(7), p. 1486–1492. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422012000700035>.

Gerbase, A.E. e Oliveira, C.R.D. (2012b) “Reciclagem do lixo de informática: uma oportunidade para a química”, *Química Nova*, 35(7), p. 1486–1492. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422012000700035>.

Gestão Ambiental: Avaliação Do Ciclo De Vida: Princípios E Estrutura (2009a). Abnt.

Gestão Ambiental: Avaliação Do Ciclo De Vida: Princípios E Estrutura (2009b). Abnt.

Gestão Ambiental: Avaliação Do Ciclo De Vida: Requisitos E Orientações (2009). Abnt.

Ghiga, S.C. *et al.* (2023) “Comparative Analysis of Three WEEE Management Scenarios Based on LCA Methodology: Case Study in the Municipality of Iasi, Romania”, *Processes*, 11(5), p. 1305. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pr11051305>.

Ghisellini, P., Passaro, R. e Ulgiati, S. (2023) “Environmental and Social Life Cycle Assessment of Waste Electrical and Electronic Equipment Management in Italy According to EU Directives”, *Environments*, 10(7), p. 106. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/environments10070106>.

Giese, E.C., Lins, F.A.F. e Xavier, L.H. (2021) “Desafios da reciclagem de lixo eletrônico e as cooperativas de mineração urbana / Challenges of e-waste recycling and urban mining cooperatives”, *Brazilian Journal of Business*, 3(5), p. 3647–3660. Disponível em: <https://doi.org/10.34140/bjbv3n5-010>.

Gil, A.C. (2002) *Como Elaborar Projetos De Pesquisa*. Atlas.

Gonda, L. e Degrez, M. (2018) “End-of-life Management of Computers in Brussels: Environmental Comparison of Two Treatment Chains”, *Procedia CIRP*, 69, p. 968–973. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.089>.

Guinée, J.B. *et al.* (2011) “Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future”, *Environmental Science & Technology*, 45(1), p. 90–96. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/es101316v>.

Guo, Y. (2025) "Circular Economy of Waste Electronic Products Based on Gompertz Model", *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 9(2), p. 667–679. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s41660-024-00477-5>.

Guzzo, D. *et al.* (2022) "Analysis of national policies for Circular Economy transitions: Modelling and simulating the Brazilian industrial agreement for electrical and electronic equipment", *Waste Management*, 138, p. 59–74. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.11.017>.

Hämmer, M. e Wambach, K. (2024) "Methodology and Database for the Quantification of the Technical Recyclability of Electrical and Electronical Equipment Demonstrated on a Smartphone Case Study", *Sustainability*, 16(19), p. 8726. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su16198726>.

Hu, X. e Yan, X. (2023) "Estimation of critical metal consumption in household electrical and electronic equipment in the UK, 2011–2020", *Resources, Conservation and Recycling*, 197, p. 107084. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107084>.

Islam, M.T. e Iyer-Raniga, U. (2023) "Life cycle assessment of e-waste management system in Australia: Case of waste printed circuit board (PCB)", *Journal of Cleaner Production*, 418, p. 138082. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138082>.

Jijun, X., Jingsi, L. e Meilian, L. (2010) "Countermeasures to cope with waste electrical and electronic equipment in Guangxi", em *2010 International Conference on Logistics Systems and Intelligent Management (ICLSIM)*. *2010 International Conference on Logistics Systems and Intelligent Management (ICLSIM)*, Harbin, China: IEEE, p. 682–686. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICLSIM.2010.5461331>.

Kawamoto, L.E. (2022) "UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA 'JÚLIO DE MESQUITA FILHO' FACULDADE DE CIÊNCIAS HUMANAS E SOCIAIS".

Korf, N. *et al.* (2019) "Multi-element chemical analysis of printed circuit boards – challenges and pitfalls", *Waste Management*, 92, p. 124–136. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.061>.

Koshta, N., Patra, S. e Singh, S.P. (2022) "Sharing economic responsibility: Assessing end user's willingness to support E-waste reverse logistics for circular economy", *Journal of Cleaner Production*, 332, p. 130057. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130057>.

Kouloumpis, V. *et al.* (2023) "Does the circularity end justify the means? A life cycle assessment of preparing waste electrical and electronic equipment for reuse", *Sustainable Production and Consumption*, 41, p. 291–304. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.08.008>.

Liu, X. *et al.* (2022) "Recycled WEEE plastics in China: Generation trend and environmental impacts", *Resources, Conservation and Recycling*, 177, p. 105978. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105978>.

Lopes Dos Santos, K. e Jacobi, P.R. (2022) "Alignments between e-waste legislation and the Sustainable Development Goals: the United Kingdom, Brazil, and Ghana case studies", *Geo: Geography and Environment*, 9(1), p. e00104. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/geo2.104>.

Lopes Silva, D.A. *et al.* (2019) “Why using different Life Cycle Assessment software tools can generate different results for the same product system? A cause–effect analysis of the problem”, *Sustainable Production and Consumption*, 20, p. 304–315. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2019.07.005>.

Malik, A. *et al.* (2024) “Industrial revolution and environmental sustainability: an analytical interpretation of research constituents in Industry 4.0”, *International Journal of Lean Six Sigma*, 15(1), p. 22–49. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/IJLSS-02-2023-0030>.

Marconi, M. *et al.* (2018) “An approach to favor industrial symbiosis: the case of waste electrical and electronic equipment”, *Procedia Manufacturing*, 21, p. 502–509. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.150>.

Mattos, F. e Calmon, J.L. (2023a) “Social Life Cycle Assessment in Municipal Solid Waste Management Systems with Contribution of Waste Pickers: Literature Review and Proposals for New Studies”, *Sustainability*, 15(2), p. 1717. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su15021717>.

Mattos, F. e Calmon, J.L. (2023b) “Social Life Cycle Assessment in Municipal Solid Waste Management Systems with Contribution of Waste Pickers: Literature Review and Proposals for New Studies”, *Sustainability*, 15(2), p. 1717. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su15021717>.

Meloni, M.A. (2019) “A Circular Economy for Consumer Electronics”, em G.H. Eduljee e R.M. Harrison (org.) *Electronic Waste Management*. 2º ed. The Royal Society of Chemistry, p. 66–100. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/9781788018784-00066>.

Menad, N., Guignot, S. e Van Houwelingen, J.A. (2013) “New characterisation method of electrical and electronic equipment wastes (WEEE)”, *Waste Management*, 33(3), p. 706–713. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.04.007>.

Mendes Campolina, J. *et al.* (2017) “A study on the environmental aspects of WEEE plastic recycling in a Brazilian company”, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(12), p. 1957–1968. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1282-2>.

Messmann, L. *et al.* (2019) “Potentials of preparation for reuse: A case study at collection points in the German state of Bavaria”, *Journal of Cleaner Production*, 211, p. 1534–1546. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.264>.

Miguel, P.A.C. (2007) “Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução”, *Production*, 17(1), p. 216–229. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-65132007000100015>.

Moraga, G. *et al.* (2022) “Resource efficiency indicators to assess circular economy strategies: A case study on four materials in laptops”, *Resources, Conservation and Recycling*, 178, p. 106099. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106099>.

Moslehi, M.S., Sahebi, H. e Teymouri, A. (2021) “A multi-objective stochastic model for a reverse logistics supply chain design with environmental considerations”, *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 12(7), p. 8017–8040. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12652-020-02538-2>.

Mosora, M.H. *et al.* (2023) “Collection of Waste Electrical and Electronic Equipment at the European Level”, *www.amfiteatruconomic.ro*, 25(62), p. 101. Disponível em: <https://doi.org/10.24818/EA/2023/62/101>.

- Naimin, H.H. *et al.* (2023) "Cleaner Power Generation: An In-depth Review of Life Cycle Assessment for Solid Oxide Fuel Cells", *Jurnal Kejuruteraan*, si6(2), p. 257–267. Disponível em: [https://doi.org/10.17576/jkukm-2023-si6\(2\)-27](https://doi.org/10.17576/jkukm-2023-si6(2)-27).
- Nikolic, M. *et al.* (2024) "Closing the loop of small WEEE – life cycle based approach for the evaluation of end-of-life strategies on the example of coffee machines", *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 23, p. 200220. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2024.200220>.
- Nowakowski, P. e Mrówczyńska, B. (2018) "Towards sustainable WEEE collection and transportation methods in circular economy - Comparative study for rural and urban settlements", *Resources, Conservation and Recycling*, 135, p. 93–107. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.016>.
- Oliveira, G. *et al.* (2025) "A REVIEW OF CADE'S CASE LAW IN THE WATER AND SANITATION SECTOR: A LACK OF CONSENSUS, THE SABESP'S CASE, AND WHAT TO EXPECT IN THE NEAR FUTURE¹", *Revista de Defesa da Concorrência*, 13(1), p. 10–35. Disponível em: <https://doi.org/10.52896/rdc.v13i1.1903>.
- Oliveira Neto, J.F.D. *et al.* (2025) "Critical barriers to material recovery from e-waste in Brazil", *Journal of Hazardous Materials Advances*, 17, p. 100562. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2024.100562>.
- Ongondo, F.O., Williams, I.D. e Whitlock, G. (2015) "Distinct Urban Mines: Exploiting secondary resources in unique anthropogenic spaces", *Waste Management*, 45, p. 4–9. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.05.026>.
- Otoni, M., Dias, P. e Xavier, L.H. (2020) "A circular approach to the e-waste valorization through urban mining in Rio de Janeiro, Brazil", *Journal of Cleaner Production*, 261, p. 120990. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120990>.
- Pan, X., Wong, C.W.Y. e Li, C. (2022) "Circular economy practices in the waste electrical and electronic equipment (WEEE) industry: A systematic review and future research agendas", *Journal of Cleaner Production*, 365, p. 132671. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132671>.
- Patouillard, L. *et al.* (2019) "Prioritizing regionalization efforts in life cycle assessment through global sensitivity analysis: a sector meta-analysis based on ecoinvent v3", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(12), p. 2238–2254. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01635-5>.
- Perez-Martinez, B.B. *et al.* (2025) "Recycling of plastic-rich streams from waste electrical and electronic equipment (WEEE) sorting plants: An in-depth study of pyrolysis potential through product characterization and life cycle assessment (LCA)", *Energy Conversion and Management*, 329, p. 119633. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.119633>.
- Pinto, C.A.S. (2020) "Knowledge management as a support for supply chain logistics planning in pandemic cases", *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, 17(3), p. 1–11. Disponível em: <https://doi.org/10.14488/BJOPM.2020.033>.
- Pîrvu, R. *et al.* (2023) "E-Waste and Responsible Consumption in EU Countries Developments and Forecasts 2025-2030", *www.amfiteatrueconomic.ro*, 25(62), p. 147. Disponível em: <https://doi.org/10.24818/EA/2023/62/147>.

Política Nacional de resíduos sólidos (2021). Câmara dos Deputados - Coordenação Edições Câmara.

Pollard, J. *et al.* (2021) “A circular economy business model innovation process for the electrical and electronic equipment sector”, *Journal of Cleaner Production*, 305, p. 127211. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127211>.

Pongérard, M., San Augustin, F. e Paredes, M. (2022) “Comparison of Tools for Simplified Life Cycle Assessment in Mechanical Engineering”, em F. Cavas Martínez *et al.* (org.) *Advances in Design Engineering II*. Cham: Springer International Publishing (Lecture Notes in Mechanical Engineering), p. 71–80. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-92426-3_9.

Prajapati, A., Narayan Vaidya, A. e Kumar, A.R. (2022) “Microplastic properties and their interaction with hydrophobic organic contaminants: a review”, *Environmental Science and Pollution Research*, 29(33), p. 49490–49512. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20723-y>.

Prodanov, C.C. (2012) *Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico*. Universidade Feevale.

Ramprasad, C. *et al.* (2022) “Strategies and options for the sustainable recovery of rare earth elements from electrical and electronic waste”, *Chemical Engineering Journal*, 442, p. 135992. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.135992>.

Ramteke, S.V., Varadwaj, P.K. e Tiwari, V. (2025) “Optimizing UAV Spraying for Sustainable Agriculture: A Life Cycle and Efficiency Analysis in India”, *Sustainability*, 17(13), p. 6211. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su17136211>.

Rittershaus, P., Aryan, V. e Renner, M. (2025) “Systematic Review on Barriers, Enablers, and Interdependencies: Sectoral Challenges and Opportunities Towards Adoption of Circular Practises in the Mobile-Phone Industry”, *WIREs Energy and Environment*, 14(2), p. e70006. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/wene.70006>.

Rocha, T.B. e Penteado, C.S.G. (2021) “Life cycle assessment of a small WEEE reverse logistics system: Case study in the Campinas Area, Brazil”, *Journal of Cleaner Production*, 314, p. 128092. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128092>.

Romanel, F.A.B. (2025) “MANUFATURA REVERSA DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS NO BRASIL: DIFICULDADES LOGÍSTICAS, INFRAESTRUTURA, VIABILIDADE ECONÔMICA, PEGADA DE CARBONO, IMPACTOS AMBIENTAIS, LEGISLAÇÃO APLICADA”, *Derecho y Cambio Social*, 22(79). Disponível em: <https://doi.org/10.54899/dcs.v22i79.193>.

Rossi, M., Germani, M. e Zamagni, A. (2016) “Review of ecodesign methods and tools. Barriers and strategies for an effective implementation in industrial companies”, *Journal of Cleaner Production*, 129, p. 361–373. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.051>.

Ruggeri, M. *et al.* (2025) “Facing the Risk of Greenwashing in the ESG Report of Global Companies: The Importance of Life Cycle Thinking”, *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 32(3), p. 4216–4234. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/csr.3178>.

Saavedra, Y.M.B. (2022) *Engenharia e Gestão do Ciclo de Vida de Produtos: Teoria e Prática*. Rio de Janeiro, RJ: Alta Books.

Sakhre, S. *et al.* (2024) "Inventory and management of E-waste: a case study of Kerala, India", *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(6), p. 588. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12739-3>.

Schiemer Vargas, K.D.F. *et al.* (2013) "A cadeia de valores e as cinco forças competitivas como Metodologia de planejamento estratégico", *REBRAE*, 6(1), p. 11. Disponível em: <https://doi.org/10.7213/rebrae.7663>.

Serpe, A. *et al.* (2025) "2002–2022: 20 years of e-waste regulation in the European Union and the worldwide trends in legislation and innovation technologies for a circular economy", *RSC Sustainability*, 3(3), p. 1039–1083. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D4SU00548A>.

Shahrasbi, A., Shokouhyar, S. e Zeidyahyae, N. (2021) "Consumers' behavior towards electronic wastes from a sustainable development point of view: An exploration of differences between developed and developing countries", *Sustainable Production and Consumption*, 28, p. 1736–1756. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.09.016>.

Singh, S., Dasgupta, M.S. e Routroy, S. (2022) "Analysis of Critical Success Factors to Design E-waste Collection Policy in India: A Fuzzy DEMATEL Approach", *Environmental Science and Pollution Research*, 29(7), p. 10585–10604. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16129-x>.

Smith, R. (2015) "Directive 2010/41/EU of the European Parliament and of the Council of 7 July 2010", em Smith, R., *Core EU Legislation*. London: Macmillan Education UK, p. 352–355. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-1-137-54482-7_33.

Sousa, R. e Miguel, P. (2012) *Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção*. Elsevier Editora Ltda.

Souza, F.R. (2024) "RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS (REEE): DESAFIOS AMBIENTAIS E SOCIAIS", *Revista Fatecnológica da Fatec-Jahu*, 18(1), p. 87–105. Disponível em: <https://doi.org/10.54628/issn2763-5600.v18.1.2024.286>.

Souza, R.S.D., Guarnieri, P. e Vieira, B.D.O. (2025) "DESAFIOS DA TRANSIÇÃO PARA A ECONOMIA CIRCULAR NO SETOR DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS NO BRASIL", *Revista de Administração de Empresas*, 65(4), p. e2024-0194. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0034-759020250401>.

Turner, A. (2018) "Black plastics: Linear and circular economies, hazardous additives and marine pollution", *Environment International*, 117, p. 308–318. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.04.036>.

Urbańska, W. e Potysz, A. (2025) "Circular raw material and waste management: a comparison of biological and chemical approaches for the recovery of metals from spent lithium-ion batteries", *Geology, Geophysics and Environment*, 51(1), p. 59–70. Disponível em: <https://doi.org/10.7494/geol.2025.51.1.59>.

Vargas, D.B., Campos, L.M.D.S. e Luna, M.M.M. (2023) "Brazil's Formal E-Waste Recycling System: From Disposal to Reverse Manufacturing", *Sustainability*, 16(1), p. 66. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su16010066>.

Wäger, P.A. e Hischier, R. (2015) “Life cycle assessment of post-consumer plastics production from waste electrical and electronic equipment (WEEE) treatment residues in a Central European plastics recycling plant”, *Science of The Total Environment*, 529, p. 158–167. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.043>.

Walter, C., Bayrhammer, E. e Nadoda, A.J. (2024) “Digital Twins to drive Robot-based Disassembly Applications: Asset Models for Autonomous Planning”, em *Proceedings of the ACM/IEEE 27th International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems. MODELS Companion '24: ACM/IEEE 27th International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems*, Linz Austria: ACM, p. 470–475. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/3652620.3688262>.

Xavier, L.H., Ottoni, M. e Lepawsky, J. (2021) “Circular economy and e-waste management in the Americas: Brazilian and Canadian frameworks”, *Journal of Cleaner Production*, 297, p. 126570. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126570>.

Yin, R.K. (2014) *Case study research: design and methods*. 5. edition. Los Angeles London New Delhi Singapore Washington, DC: SAGE.

Zhu, M. *et al.* (2022a) “Study on complex dynamics for the waste electrical and electronic equipment recycling activities oligarchs closed-loop supply chain”, *Environmental Science and Pollution Research*, 29(3), p. 4519–4539. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15979-9>.

Zhu, M. *et al.* (2022b) “Study on complex dynamics for the waste electrical and electronic equipment recycling activities oligarchs closed-loop supply chain”, *Environmental Science and Pollution Research*, 29(3), p. 4519–4539. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15979-9>.