

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

Dallissa Katharine Ribeiro Rodrigues de Souza

**GESTÃO DE RESÍDUOS ELETRÔNICOS NO BRASIL: DESAFIOS E
OPORTUNIDADES NA PERSPECTIVA DA ECONOMIA CIRCULAR**

São Carlos

2025

GESTÃO DE RESÍDUOS ELETRÔNICOS NO BRASIL: DESAFIOS E OPORTUNIDADES NA PERSPECTIVA DA ECONOMIA CIRCULAR

Trabalho de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Fábio Bentes Freire

São Carlos

2025

RESUMO

A gestão de resíduos eletrônicos tem se consolidado como um dos maiores desafios ambientais da contemporaneidade, sobretudo em países em desenvolvimento como o Brasil. Com o aumento expressivo do consumo de equipamentos eletroeletrônicos e a rápida obsolescência tecnológica, cresce o volume de lixo eletrônico descartado de forma inadequada, gerando impactos socioambientais significativos. Nesse contexto, a economia circular surge como uma alternativa estratégica à lógica linear tradicional, promovendo o reaproveitamento de recursos, a redução de resíduos e a valorização de materiais críticos. O presente estudo teve como objetivo analisar, por meio de revisão de literatura, os principais desafios e oportunidades associados à gestão de resíduos eletrônicos no Brasil sob a perspectiva da economia circular. Os resultados revelaram que, embora a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) tenha representado um marco legal importante, sua efetiva implementação ainda encontra barreiras, como ausência de fiscalização, baixa conscientização da população e limitada infraestrutura para a coleta seletiva e reciclagem. Por outro lado, iniciativas de remanufatura, mineração urbana, uso de tecnologias digitais e atuação de cooperativas têm mostrado potencial para otimizar a cadeia reversa e impulsionar a circularidade. A pesquisa evidenciou ainda a importância da articulação entre governo, setor produtivo e sociedade civil para o fortalecimento de práticas sustentáveis. Conclui-se que a transição para a economia circular na gestão de resíduos eletrônicos no Brasil demanda avanços normativos, investimentos em inovação tecnológica, programas de educação ambiental e incentivos à responsabilidade compartilhada. Somente por meio de uma abordagem integrada será possível minimizar os impactos ambientais, promover inclusão social e fomentar um modelo de desenvolvimento mais sustentável.

Palavras-chave: Resíduos eletrônicos. Economia circular. Logística reversa. Sustentabilidade.

ABSTRACT

The management of electronic waste has become one of the greatest environmental challenges of contemporary times, especially in developing countries such as Brazil. With the significant increase in the consumption of electrical and electronic equipment and the rapid pace of technological obsolescence, the volume of improperly discarded e-waste has grown, generating considerable socio-environmental impacts. In this context, the circular economy emerges as a strategic alternative to the traditional linear model, promoting resource reuse, waste reduction, and the valorization of critical materials. This study aimed to analyze, through a literature review, the main challenges and opportunities related to electronic waste management in Brazil from the perspective of the circular economy. The results revealed that, although the National Solid Waste Policy (PNRS) represented an important legal milestone, its effective implementation still faces barriers such as lack of inspection, low public awareness, and limited infrastructure for selective collection and recycling. On the other hand, initiatives in remanufacturing, urban mining, the use of digital technologies, and the role of cooperatives have shown potential to optimize the reverse chain and boost circularity. The research also highlighted the importance of articulation among government, the productive sector, and civil society to strengthen sustainable practices. It is concluded that the transition to a circular economy in the management of electronic waste in Brazil requires regulatory advances, investments in technological innovation, environmental education programs, and incentives for shared responsibility. Only through an integrated approach will it be possible to minimize environmental impacts, promote social inclusion, and foster a more sustainable development model.

Keywords: Electronic waste. Circular economy. Reverse logistics. Sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Previsão da geração global de resíduos eletrônicos (MMT) de 2019 a 2030.....

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Composição e classificação dos resíduos eletroeletrônicos.....

Quadro 2 – Principais impactos do descarte inadequado de resíduos eletroeletrônicos.....

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
REEE	Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
PEVs	Pontos de Entrega Voluntária
EPIs	Equipamentos de Proteção Individual
ACV	Análise do Ciclo de Vida
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
IoT	Internet das Coisas (<i>Internet of Things</i>)
LEDs	Diodos Emissores de Luz (<i>Light Emitting Diodes</i>)
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
PCI	Placa de Circuito Impresso
NBR	Norma Brasileira
EPIs	Equipamentos de Proteção Individual

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	7
2. OBJETIVOS	9
2.1 OBJETIVO GERAL.....	9
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
3. METODOLOGIA.....	10
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
4.1 RESÍDUOS ELETRÔNICOS: CARACTERIZAÇÃO E IMPACTOS.....	11
4.1.1 Composição e classificação dos resíduos eletroeletrônicos	13
4.1.2 Impactos ambientais e à saúde humana do descarte inadequado.....	16
4.2 PANORAMA DA GESTÃO DE RESÍDUOS ELETRÔNICOS NO BRASIL	19
4.2.1 Legislação brasileira e políticas públicas aplicáveis.....	21
4.2.2 Desafios estruturais e operacionais da coleta e reciclagem	23
4.3 PRINCÍPIOS DA ECONOMIA CIRCULAR APLICADOS AO <i>E-WASTE</i>	26
4.3.1 Conceitos de economia circular e ciclo de vida do produto	27
4.3.2 Modelos circulares para eletroeletrônicos: reutilização, remanufatura e reciclagem...	30
4.4 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO E VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS ELETRÔNICOS	32
4.4.1 Técnicas de reciclagem mecânica, térmica e química.....	34
4.4.2 Recuperação de metais raros e valiosos	37
4.5 OPORTUNIDADES SOCIOECONÔMICAS E SUSTENTÁVEIS DA GESTÃO CIRCULAR	39
4.5.1 Geração de emprego e inclusão social por cooperativas e <i>startups</i>	41
4.5.2 Redução da pegada ambiental e inovação sustentável	43
5. DISCUSSÃO.....	46
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
6.1 Trabalhos Futuros.....	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49

1. INTRODUÇÃO

Lixo eletrônico, ou e-waste, refere-se a dispositivos e componentes eletrônicos ultrapassados, indesejados ou quebrados que não são mais utilizados. Isso inclui itens do dia a dia, como smartphones, laptops, TVs e tablets, além de eletrodomésticos como geladeiras, máquinas de lavar e micro-ondas. Também abrange equipamentos de escritório, como impressoras, scanners e aparelhos de fax, e partes menores, como cabos, baterias e placas de circuito. A poluição por lixo eletrônico é o dano ambiental e à saúde causado pelo descarte, manuseio ou reciclagem inadequados. Quando não há uma gestão correta do lixo eletrônico, o resultado pode impactar diretamente no meio ambiente e indiretamente na saúde do ser humano.

Atualmente, muitos métodos comuns de lidar com o lixo eletrônico são inseguros e prejudiciais ao meio ambiente. Uma prática usual é o descarte em aterros sanitários, onde produtos químicos nocivos, como chumbo, mercúrio e cádmio, podem infiltrar-se no solo e contaminar os lençóis subterrâneos, representando sérios riscos aos ecossistemas e à saúde humana. Outro método é a queima a céu aberto, usada para recuperar metais valiosos como o cobre. Esse processo libera vapores tóxicos e gases perigosos no ar, contribuindo para a poluição atmosférica e problemas respiratórios em comunidades próximas. Um terceiro método, conhecido como processamento por banho ácido, envolve o uso de ácidos fortes para extrair metais de placas de circuito. Embora eficaz na recuperação de materiais, essa prática produz um efluente altamente tóxico (Kumar et al., 2024).

Todos esses procedimentos informais ou não regulamentados destacam a necessidade e urgência de abordagens mais seguras e sustentáveis para o gerenciamento de lixo eletrônico. O gerenciamento adequado do lixo eletrônico é, portanto, essencial para proteger a saúde humana e o meio ambiente. Em poucas palavras, ele envolve um conjunto de ações pensadas, levadas a cabo por indivíduos, empresas e governos para garantir que o lixo eletrônico seja tratado de forma segura e sustentável. Ações simples, como o incentivo à compra de eletrônicos somente quando necessário, poderiam ser facilmente implementadas. Outros atributos evidentes de uma gestão adequada de resíduos eletrônicos seriam, só para citar alguns, a escolha por produtos mais

duráveis, reparáveis e atualizáveis, a doação ou venda de eletrônicos em funcionamento, ao invés de descartá-los, e mesmo o envio do lixo para centros de reciclagem certificados.

É correto dizer que tanto o governo quanto a indústria desempenham papéis essenciais na gestão eficaz do lixo eletrônico (e-waste). Os governos são responsáveis por criar e aplicar regulamentações, estabelecer padrões ambientais e promover a conscientização pública sobre os perigos do descarte inadequado de resíduos. Eles também podem implementar programas de coleta seletiva e fornecer infraestrutura para instituir a reciclagem como uma alternativa interessante. Ao mesmo tempo, a produção e comercialização de eletrônicos devem seguir práticas sustentáveis, como projetar produtos para facilitar a reciclagem, participar de programas de responsabilidade ambiental e investir em sistemas de coleta e processamento de resíduos eletrônico.

Conforme toda a contextualização, esse trabalho tem como objetivo geral analisar o cenário atual da gestão dos resíduos eletroeletrônicos, avaliar sobre as atuais leis e como são fiscalizadas, além de oportunidades de aprimoramento para a reciclagem e na reinserção de materiais na economia circular.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a gestão de resíduos eletrônicos no Brasil, com ênfase nos fluxos desses resíduos, nas estruturas regulatórias vigentes e nas oportunidades de melhorias para a reciclagem e reinserção dos materiais na lógica da economia circular.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar os resíduos eletrônicos quanto à sua composição, periculosidade e impactos ambientais e sanitários associados ao descarte inadequado.
- Investigar o panorama da gestão de resíduos eletrônicos no Brasil, considerando os principais entraves logísticos, operacionais e normativos.
- Examinar os princípios da economia circular aplicáveis ao setor eletroeletrônico, com foco em estratégias como reutilização, remanufatura e reciclagem.
- Identificar as tecnologias utilizadas no tratamento e na valorização de resíduos eletrônicos, incluindo métodos para recuperação de materiais críticos.

3. METODOLOGIA

Esse trabalho foi desenvolvido através de uma revisão de literatura de caráter qualitativo, com abordagem descritiva e exploratória. Essa metodologia tem como objetivo reunir, organizar e analisar criticamente as principais produções acadêmicas e científicas publicadas entre os anos de 2020 e 2025, que tratam da gestão de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) no Brasil, com ênfase nas estratégias relacionadas à economia circular. O processo metodológico iniciou-se com a definição do problema de pesquisa e delimitação temática, voltada à compreensão dos desafios operacionais, impactos ambientais e oportunidades socioeconômicas vinculadas à reutilização, remanufatura, reciclagem e valorização tecnológica dos REEE.

A busca bibliográfica foi realizada nas seguintes bases de dados científicas: SciELO, ScienceDirect, Scopus, CAPES e Google Acadêmico. Especificamente, o Scopus é a principal base de dados global de resumos e citações de literatura científica revisada por pares, equipada com ferramentas bibliométricas para monitorar, analisar e visualizar pesquisas. Desenvolvida pela Elsevier e lançada em 2004, abrange ciências exatas, tecnologia, medicina, ciências sociais, artes e humanidades. Além disso, atribui a cada autor indexado um identificador único (Author ID), garantindo catalogação precisa de suas contribuições (UNIVALI, 2022).

A pesquisa utilizou palavras-chaves alternadas e compiladas, como *“resíduos eletrônicos”*, *“economia circular”*; *“e-waste”*, *“logística reversa”*; *“gestão de resíduos”*, *“tecnologia de reciclagem”*; *“REEE”*, *“impactos ambientais”*. Os critérios de inclusão consideraram artigos completos, dissertações, capítulos de livros e documentos técnicos com foco direto nos tópicos abordados no estudo. Foram considerados materiais publicados em português, inglês e espanhol, que apresentassem interface direta com os subtemas da pesquisa e estivessem disponíveis em acesso aberto ou institucional.

A metodologia adotada permitiu a identificação das principais lacunas, desafios e perspectivas relacionadas ao tema, subsidiando a análise integrada

da literatura científica recente sobre a gestão dos resíduos eletrônicos e seu alinhamento às estratégias de circularidade e sustentabilidade.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 RESÍDUOS ELETRÔNICOS: CARACTERIZAÇÃO E IMPACTOS

A caracterização dos resíduos eletrônicos envolve a análise de sua composição heterogênea, formada por materiais metálicos, plásticos, cerâmicos e compostos tóxicos, resultantes da obsolescência rápida de produtos eletroeletrônicos. O avanço da tecnologia tem reduzido o ciclo de vida útil dos dispositivos, promovendo o descarte acelerado e o acúmulo de resíduos com potencial contaminante (Reis, 2021).

Segundo o relatório Global E-Waste Monitor 2024, a geração mundial de resíduos eletrônicos alcançou 62 milhões de toneladas apenas no ano de 2022. Historicamente, países desenvolvidos como os Estados Unidos e as nações europeias lideram esse cenário como os maiores geradores de lixo eletrônico. Contudo, a China atualmente ocupa o primeiro lugar no ranking global, com uma produção anual de 7,2 milhões de toneladas, seguida pelos EUA. A Índia, por sua vez, vem registrando um crescimento expressivo nesse setor e tende a ocupar a terceira posição nos próximos anos. Estima-se que, entre 2010 e 2030, a produção global de resíduos eletrônicos aumentará aproximadamente 121%, mais do que dobrando o volume registrado no início da década. (Kumar et al., 2024). Conforme Figura 1, observa-se a projeção da geração global de resíduos eletrônicos entre 2018 à 2030, a qual a expectativa é sempre um aumento na geração.

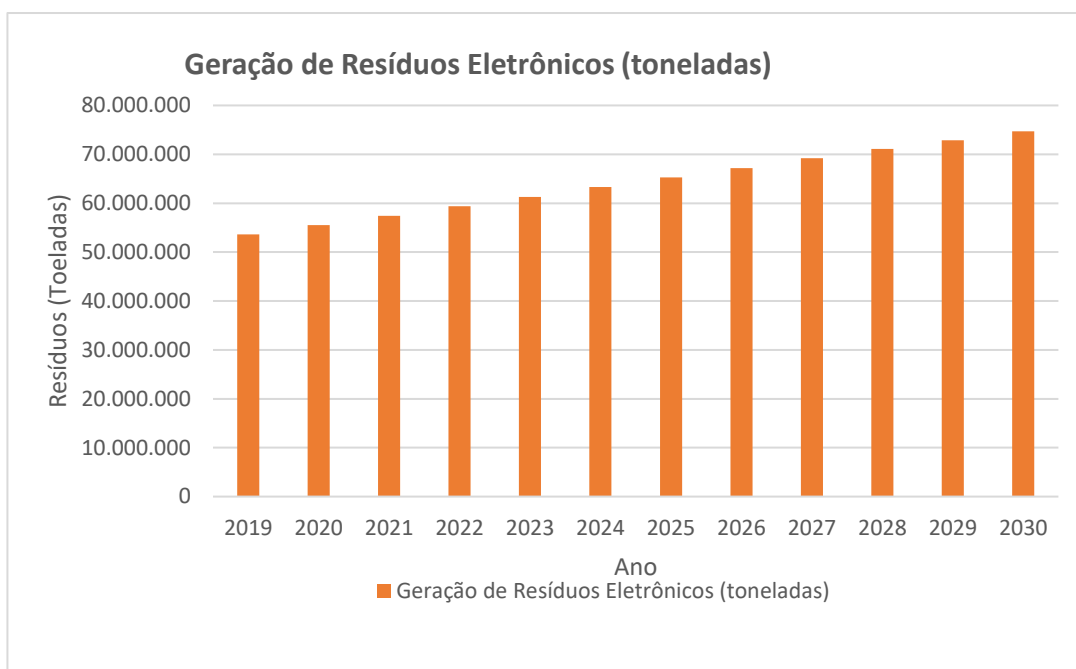


Figura 1. Previsão da geração global de resíduos eletrônicos (MMT) de 2019 a 2030 (Kumar et al., 2024).

Esses resíduos, classificados como Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE), são considerados perigosos em razão da presença de metais pesados como chumbo, mercúrio, cádmio e arsênio, substâncias com alto potencial de impacto ambiental e à saúde. Tais elementos são encontrados principalmente em placas de circuito impresso, soldas e baterias (Franco *et al.*, 2021).

A gestão ineficaz dos REEE no Brasil é agravada pela carência de centros de coleta adequados e pela ausência de ações articuladas entre governo, indústria e sociedade civil. Muitos desses resíduos são descartados de maneira incorreta, sem qualquer tratamento, acumulando-se em lixões e aterros sanitários, o que contribui para a contaminação do solo e das águas subterrâneas (Galvão *et al.*, 2021).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010, estabelece diretrizes para o gerenciamento dos REEE, incluindo a responsabilidade compartilhada entre fabricantes, distribuidores, comerciantes, consumidores e poder público. Contudo, a implementação dessa política encontra entraves logísticos, financeiros e de fiscalização, dificultando a adoção efetiva da logística reversa no setor eletroeletrônico (Duarte *et al.*, 2020).

A logística reversa é reconhecida como estratégia essencial para o reaproveitamento de materiais e para a redução de impactos ambientais. Esse sistema viabiliza o retorno dos resíduos ao ciclo produtivo, seja por meio da remanufatura, reutilização ou reciclagem. No entanto, sua aplicação ainda é limitada no Brasil, sobretudo pela falta de campanhas educativas e incentivos à participação da população e das empresas (Reis, 2021).

A informalidade é outro obstáculo na gestão de resíduos eletrônicos, uma vez que grande parte do descarte ocorre fora de canais regulamentados. Catadores e recicladores independentes operam sem equipamentos de proteção, expostos a riscos tóxicos e com baixos índices de recuperação de materiais. A formalização das cooperativas e o apoio técnico são caminhos necessários para a eficiência da chamada mineração urbana (Giese; Lins; Xavier, 2021).

A caracterização e o gerenciamento dos resíduos eletrônicos exigem, portanto, ações integradas que envolvam fiscalização, conscientização e incentivo à inovação tecnológica. A sustentabilidade na gestão desses resíduos depende da efetiva articulação entre os agentes envolvidos e do fortalecimento das estruturas de coleta, triagem e reaproveitamento em consonância com os princípios da economia circular (Galvão *et al.*, 2021).

4.1.1 Composição e classificação dos resíduos eletroeletrônicos

Os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) são originados do descarte de dispositivos como computadores, televisores, telefones celulares, impressoras, eletrodomésticos e outros produtos que dependem de energia elétrica para funcionar. Sua composição é complexa e variável, dependendo do tipo e da origem dos equipamentos. Os materiais presentes incluem metais ferrosos e não ferrosos, plásticos, cerâmicas, borracha e compostos tóxicos, que tornam seu gerenciamento desafiador (Reis, 2021).

A presença de metais valiosos como cobre, alumínio, ouro, prata, paládio e platina é uma característica relevante dos REEE. Esses metais são utilizados principalmente em placas de circuito impresso, conectores, fios e componentes internos. Além de serem economicamente atrativos, esses elementos são

estratégicos para diversas indústrias tecnológicas, o que torna sua recuperação técnica e financeiramente viável (Giese; Lins; Xavier, 2021).

Por outro lado, os REEE também contêm substâncias perigosas que requerem tratamento especial. Metais pesados como chumbo, cádmio e mercúrio estão presentes em baterias, monitores, tubos de raios catódicos e interruptores. Esses elementos são altamente tóxicos e podem causar sérios danos à saúde e ao meio ambiente se descartados de maneira inadequada. A lixiviação desses metais pode contaminar o solo, os lençóis freáticos e os corpos d'água (Franco *et al.*, 2021).

Os resíduos eletrônicos são classificados, segundo sua natureza e composição, como resíduos perigosos, conforme definido pela NBR 10004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Essa classificação considera o potencial de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade dos resíduos. Os REEE, por conterem materiais tóxicos e contaminantes, enquadram-se majoritariamente na classe I – perigosos (Galvão *et al.*, 2021).

Além da classificação baseada no risco, é possível categorizar os resíduos eletrônicos por tipo de equipamento. As categorias mais comuns incluem grandes eletrodomésticos (geladeiras, fogões), pequenos eletrodomésticos (liquidificadores, aspiradores), equipamentos de informática e telecomunicação (computadores, tablets, celulares), equipamentos de consumo (televisores, câmeras), ferramentas elétricas e eletrônicas, brinquedos eletrônicos e dispositivos médicos (Reis, 2021).

O ciclo de vida dos produtos eletroeletrônicos influencia diretamente na composição dos resíduos gerados. Muitos dispositivos possuem vida útil reduzida devido à obsolescência programada ou à evolução tecnológica acelerada, o que resulta em descarte precoce. Além disso, o baixo custo de novos equipamentos, aliado à ausência de programas de troca e de incentivo à devolução, contribui para o aumento da geração de resíduos (Duarte *et al.*, 2020).

A classificação e segregação correta dos REEE são etapas essenciais para a gestão eficiente. Essa prática permite separar os componentes com valor de reaproveitamento dos materiais contaminantes, otimizando os processos de desmontagem, triagem e reciclagem. Contudo, a infraestrutura nacional para

realizar essa separação ainda é incipiente, com baixa taxa de reaproveitamento dos resíduos coletados (Galvão *et al.*, 2021).

A composição dos REEE também varia entre países desenvolvidos e em desenvolvimento. No Brasil, a maior parte dos resíduos eletrônicos é composta por equipamentos de pequeno porte e itens de informática. A presença de dispositivos importados com diferentes padrões tecnológicos dificulta a padronização dos processos de separação e tratamento. Esse fator contribui para a informalidade no setor, onde grande parte do descarte ocorre sem controle técnico (Giese; Lins; Xavier, 2021).

A composição química dos resíduos também influencia nos riscos ocupacionais enfrentados por trabalhadores envolvidos na coleta, desmontagem e reciclagem. A exposição contínua a poeiras metálicas e vapores tóxicos, sem uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs), pode provocar distúrbios neurológicos, doenças respiratórias e alterações hepáticas. A informalidade das atividades agrava esse cenário, principalmente em cooperativas não formalizadas (Franco *et al.*, 2021).

A ausência de normas técnicas claras sobre a caracterização detalhada dos resíduos e a falta de incentivos à rastreabilidade dificultam o desenvolvimento de estratégias de valorização dos REEE. A classificação inadequada pode levar à perda de materiais de alto valor e ao tratamento incorreto de substâncias perigosas. Assim, a padronização e o investimento em tecnologias de separação e análise são etapas urgentes para a eficiência da cadeia de gestão (Reis, 2021).

O avanço da mineração urbana, conceito que visa à recuperação de metais e componentes de resíduos urbanos, está diretamente ligado ao conhecimento aprofundado sobre a composição dos resíduos. Os REEE se configuram como fontes alternativas de matéria-prima para a indústria, reduzindo a necessidade de extração de recursos naturais e o impacto ambiental da mineração convencional. No entanto, essa perspectiva ainda encontra limitações operacionais e econômicas no Brasil (Giese; Lins; Xavier, 2021).

A composição dos REEE representa simultaneamente uma ameaça e uma oportunidade. Quando tratados adequadamente, esses resíduos podem ser reinseridos no ciclo produtivo, promovendo economia de recursos e sustentabilidade. Para tanto, é essencial investir em pesquisa, padronização de

métodos e estruturação de centros de triagem e processamento, além da conscientização dos geradores sobre a importância da classificação e descarte correto (Duarte *et al.*, 2020).

Quadro 1: Composição e classificação dos resíduos eletroeletrônicos.

Categoria de REEE	Principais Materiais	Exemplos de Componentes
Grandes Eletrodomésticos	Metais ferrosos, plásticos rígidos	Geladeiras, fogões
Pequenos Eletrodomésticos	Plásticos, metais não ferrosos	Liquidificadores, aspiradores
Informática e Telecomunicação	Plástico ABS, ouro, cobre, metais de terras raras	Computadores, celulares, roteadores
Painéis e Monitores (CRT/LCD/LED)	Vidro, baterias, chumbo (em CRT), retardantes de chama	TVs, monitores de computador
Cabos e Baterias	Cobre, alumínio, lítio, chumbo	Cabos USB, baterias de lítio
Lâmpadas	Mercúrio, fósforo, metais pesados, LEDs	Lâmpadas fluorescentes e LED

Fonte: Acervo pessoal.

4.1.2 Impactos ambientais e à saúde humana do descarte inadequado

O descarte inadequado de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) constitui uma das principais fontes de contaminação ambiental urbana. Quando descartados em locais inapropriados, como lixões, terrenos baldios ou cursos d'água, esses resíduos liberam substâncias tóxicas que se acumulam no solo e infiltram nos lençóis freáticos, prejudicando a qualidade da água consumida pela população (Franco *et al.*, 2021).

Os metais pesados presentes nos REEE são os principais responsáveis pelos danos ambientais. O chumbo, comum em monitores antigos e soldas, apresenta alta toxicidade e persistência no ambiente. Sua liberação pode comprometer a fauna, a flora e os organismos aquáticos, alterando a biodiversidade e os ciclos ecológicos locais. A bioacumulação dessas substâncias afeta as cadeias alimentares e atinge inclusive seres humanos por meio da alimentação (Franco *et al.*, 2021).

O mercúrio, utilizado em lâmpadas fluorescentes e em alguns tipos de interruptores, é outro elemento altamente nocivo. Quando exposto ao ambiente, transforma-se em metilmercúrio, composto ainda mais tóxico, capaz de atravessar a barreira hematoencefálica. A liberação de mercúrio em regiões

úmidas ou pantanosas é particularmente perigosa, pois facilita sua metilação e amplificação dos efeitos deletérios sobre o ecossistema (Franco *et al.*, 2021).

A incineração informal dos resíduos eletrônicos, prática comum em locais sem coleta especializada, representa um agravante. Quando os REEE são queimados para extração manual de cobre ou outros metais, liberam gases tóxicos como dioxinas, furanos e compostos orgânicos voláteis. Essas substâncias afetam diretamente a qualidade do ar e estão associadas ao aumento de doenças respiratórias, neoplasias e danos imunológicos (Reis, 2021).

Os impactos à saúde humana se manifestam de forma aguda ou crônica, dependendo do tempo e da intensidade da exposição. Trabalhadores informais envolvidos com a separação de componentes eletrônicos sem o uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) estão sujeitos à absorção dérmica e inalatória de substâncias químicas tóxicas. A ausência de ventilação adequada e a manipulação direta dos resíduos ampliam os riscos ocupacionais (Franco *et al.*, 2021).

Entre os efeitos clínicos identificados, destacam-se distúrbios neurológicos, problemas renais, alterações hepáticas, desordens reprodutivas e doenças hematológicas. Crianças expostas a ambientes contaminados por resíduos eletrônicos apresentam maior risco de déficits cognitivos, hiperatividade e comprometimento no desenvolvimento neuropsicomotor. A contaminação pode ocorrer por contato direto ou por ingestão de alimentos cultivados em solos poluídos (Franco *et al.*, 2021). O Quadro 2 traz o compilado dos agentes poluentes, exemplos de onde encontrá-los e os impactos ambientais e para a saúde humana.

Quadro 2: Principais impactos do descarte inadequado de REEE.

Agente Poluente	Fonte	Impacto Ambiental	Impacto à Saúde Humana
Chumbo	Monitores CRT, soldas	Contaminação de solo e água	Danos neurológicos, problemas renais
Mercúrio	Lâmpadas fluorescentes, interruptores	Metilmercúrio em ambientes úmidos	Neurotoxicidade, comprometimento cognitivo
Dioxinas e Furanos	Queima a céu aberto de plásticos	Poluição do ar, deposição em solos	Doenças respiratórias, câncer
Cádmio	Baterias, componentes eletrônicos	Bioacumulação em cadeias alimentares	Lesões renais, osteoporose
Compostos Orgânicos Voláteis	Plásticos queimados	Emissão de gases tóxicos	Irritação pulmonar, doenças crônicas

Fonte: Acervo pessoal.

O descarte incorreto também representa uma ameaça à segurança sanitária de comunidades periféricas. Em muitas regiões brasileiras, os resíduos eletrônicos são depositados em áreas urbanas próximas a habitações, expondo a população ao contato contínuo com materiais tóxicos. A ausência de programas públicos de coleta seletiva contribui para a normalização desse tipo de descarte (Galvão *et al.*, 2021).

Do ponto de vista ambiental, o acúmulo de resíduos eletrônicos agrava a degradação dos recursos naturais. A extração primária de metais, incentivada pela baixa taxa de reciclagem, demanda grandes volumes de energia, água e áreas mineradas. Ao não reaproveitar os componentes descartados, o ciclo produtivo perpetua a pressão sobre os ecossistemas, aumentando os níveis de emissão de carbono e a escassez de recursos minerais estratégicos (Giese; Lins; Xavier, 2021).

A informalidade da reciclagem, apesar de representar uma fonte de renda para muitos trabalhadores, expõe milhares de pessoas a riscos ambientais e sanitários. Nas cooperativas não regulamentadas, é comum a separação manual de componentes sem controle técnico. A inexistência de planos de manejo e a falta de treinamento adequado resultam na disposição incorreta de rejeitos contaminantes, como carcaças metálicas, baterias e placas danificadas (Reis, 2021).

A gestão ineficiente dos impactos do lixo eletrônico compromete, ainda, o cumprimento das metas ambientais internacionais assumidas pelo Brasil. A Convenção de Basileia, por exemplo, estabelece diretrizes para o controle dos movimentos transfronteiriços de resíduos perigosos e sua disposição final. No entanto, o país ainda enfrenta dificuldades em rastrear e regular a entrada de resíduos eletrônicos oriundos de outras nações, o que intensifica os riscos ambientais locais (Galvão *et al.*, 2021).

A logística reversa, prevista pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), surge como mecanismo para mitigar esses impactos. Entretanto, sua aplicação no setor eletroeletrônico enfrenta desafios estruturais e de conscientização. A população desconhece, em grande parte, os pontos de coleta e os riscos do descarte doméstico inadequado. Ao mesmo tempo, os fabricantes nem sempre cumprem suas obrigações com os sistemas de devolução e reaproveitamento (Duarte *et al.*, 2020).

O fortalecimento da logística reversa exige a integração entre políticas públicas, incentivos fiscais, fiscalização eficiente e campanhas educativas. Além disso, é necessário investir em centros de triagem ambientalmente seguros, com infraestrutura adequada para o tratamento dos resíduos e controle dos agentes tóxicos liberados. Essas medidas podem reduzir significativamente os impactos negativos à saúde e ao ambiente, promovendo a sustentabilidade do setor (Reis, 2021).

A destinação inadequada dos resíduos eletrônicos representa, portanto, um risco sistêmico que compromete a saúde pública e a integridade dos ecossistemas. A superação desses impactos passa por uma transformação estrutural no modo como os REEE são percebidos, tratados e reaproveitados, em consonância com os princípios da economia circular e da responsabilidade ambiental compartilhada (Franco *et al.*, 2021).

4.2 PANORAMA DA GESTÃO DE RESÍDUOS ELETRÔNICOS NO BRASIL

A gestão dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) no Brasil enfrenta limitações estruturais, normativas e culturais, dificultando a consolidação de um modelo eficaz e sustentável. Apesar da previsão legal da

logística reversa, sua aplicação no setor ainda é parcial e marcada por falhas operacionais que comprometem os resultados ambientais esperados (Souza; Junior, 2024).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) estabeleceu diretrizes importantes, como a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, prevendo a participação de fabricantes, distribuidores, comerciantes, consumidores e poder público. No entanto, a operacionalização dessas diretrizes esbarra na falta de mecanismos de monitoramento, fiscalização e incentivo à adesão dos atores envolvidos (Contador; Freire; Xavier, 2021).

Nos municípios brasileiros, especialmente os de médio e pequeno porte, a gestão dos REEE é limitada por estruturas precárias de coleta seletiva, ausência de pontos de entrega voluntária (PEVs) e carência de recursos humanos e financeiros. A falta de integração entre os consórcios intermunicipais e as indústrias responsáveis dificulta a viabilidade econômica da logística reversa (Moraes *et al.*, 2021).

A informalidade também é um entrave persistente, com cooperativas e trabalhadores independentes operando sem capacitação técnica ou equipamentos adequados. Esse cenário compromete tanto a segurança dos envolvidos quanto a eficiência do reaproveitamento dos materiais coletados, gerando perdas econômicas e riscos ambientais. A formalização desses agentes é uma demanda urgente para o avanço da mineração urbana (Contador; Freire; Xavier, 2021).

As iniciativas de gestão ainda não alcançam de forma eficaz o consumidor final, que desconhece as obrigações legais e os impactos do descarte incorreto. A ausência de campanhas de educação ambiental, somada à inexistência de infraestrutura acessível para a devolução de aparelhos, contribui para o acúmulo de REEE em residências ou seu descarte comum no lixo doméstico (Abreu; Silva; Ribeiro, 2021).

A mensuração do desempenho da gestão de resíduos eletrônicos pode ser feita com base em indicadores de sustentabilidade, como a taxa de coleta, o índice de reaproveitamento de componentes e a redução das emissões associadas à destinação inadequada. No entanto, a ausência de um sistema nacional unificado de dados sobre REEE dificulta o acompanhamento e a avaliação das políticas públicas (Silva *et al.*, 2023).

Assim, a gestão dos REEE no Brasil se encontra em estágio de transição, entre a normatização legal e a efetiva execução de estratégias de logística reversa e economia circular. O avanço dependerá da articulação intersetorial, do fortalecimento da infraestrutura municipal e do engajamento dos consumidores, com vistas à construção de uma cadeia de gestão integrada, eficiente e ambientalmente segura (Souza; Junior, 2024).

4.2.1 Legislação brasileira e políticas públicas aplicáveis

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010, representa o principal marco regulatório brasileiro para a gestão de resíduos, incluindo os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE). Essa legislação estabelece o conceito de responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, atribuindo obrigações aos fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, consumidores e ao poder público para garantir a destinação ambientalmente adequada dos resíduos (Souza; Junior, 2024).

Entre os instrumentos previstos pela PNRS, destaca-se a logística reversa, definida como um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e restituição dos resíduos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos. Embora a lei estabeleça essa obrigatoriedade, sua efetivação prática no Brasil é limitada, especialmente no setor eletroeletrônico, que possui uma cadeia de descarte difusa e com baixa rastreabilidade (Contador; Freire; Xavier, 2021).

O Decreto nº 10.240/2020 regulamenta especificamente a logística reversa de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico. Esse decreto define metas graduais de coleta e estabelece obrigações mínimas de estruturação para as empresas envolvidas, como a instalação de pontos de entrega voluntária (PEVs) e a contratação de operadores logísticos licenciados. No entanto, a descentralização das obrigações e a ausência de fiscalização efetiva dificultam o cumprimento pleno das metas previstas (Souza; Junior, 2024).

As políticas públicas de gestão de REEE devem também ser compreendidas no contexto federativo, em que estados e municípios possuem autonomia para legislar sobre resíduos sólidos, respeitando as diretrizes

nacionais. Contudo, muitos municípios carecem de regulamentações específicas sobre os resíduos eletrônicos, o que gera disparidades regionais na implementação de políticas ambientais e na efetivação da logística reversa (Moraes *et al.*, 2021).

Nos estados mais estruturados, como São Paulo, observa-se a criação de programas e diretrizes complementares à PNRS, que buscam apoiar tecnicamente os municípios e fomentar parcerias com o setor privado. Ainda assim, a ausência de incentivos fiscais e financeiros direcionados à cadeia de reaproveitamento limita a adesão de empresas, sobretudo micro e pequenas, às exigências legais (Moraes *et al.*, 2021).

Outro desafio identificado na efetividade da legislação está na fiscalização. Os órgãos ambientais, como o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e os órgãos estaduais, nem sempre possuem estrutura técnica e recursos humanos suficientes para monitorar o cumprimento das obrigações legais por parte das empresas. Essa fragilidade compromete o alcance das metas nacionais de coleta e reciclagem (Silva *et al.*, 2023).

O cumprimento das normas legais também está diretamente ligado ao grau de conhecimento e engajamento da população. Pesquisas demonstram que grande parte dos consumidores não conhece a PNRS nem os seus direitos e deveres no processo de descarte adequado dos equipamentos eletroeletrônicos. A baixa adesão às práticas de devolução voluntária reflete a carência de campanhas de comunicação ambiental eficazes e contínuas (Abreu; Silva; Ribeiro, 2021).

Ainda que a legislação brasileira preveja sanções administrativas e civis para o descumprimento das obrigações ambientais, a aplicação dessas penalidades no setor de resíduos eletrônicos é pouco frequente. A fragilidade na fiscalização, somada à morosidade dos processos administrativos e à falta de transparência nos relatórios das empresas, favorece a inércia na implementação plena da logística reversa (Souza; Junior, 2024).

Um aspecto relevante da legislação ambiental é a promoção da economia circular, conceito que visa à reinserção contínua de materiais na cadeia produtiva. Embora a PNRS dialogue com essa perspectiva, a ausência de mecanismos legais específicos que incentivem práticas como remanufatura,

reuso e prolongamento da vida útil dos produtos dificulta a transição do modelo linear para um sistema mais sustentável (Contador; Freire; Xavier, 2021).

A efetividade das políticas públicas relacionadas aos REEE depende da articulação entre diferentes níveis de governo, setor empresarial e sociedade civil. A ausência de governança integrada, com metas claras, financiamento adequado e mecanismos de controle social, compromete o avanço das estratégias nacionais. Modelos mais participativos e descentralizados, com envolvimento direto dos municípios e das cooperativas, podem promover maior capilaridade na gestão (Moraes *et al.*, 2021).

O arcabouço legal brasileiro oferece diretrizes relevantes para a gestão dos resíduos eletrônicos, mas sua aplicabilidade encontra entraves operacionais e estruturais. A superação dessas barreiras requer a revisão das metas legais, a criação de incentivos financeiros e fiscais para os agentes envolvidos, o fortalecimento institucional dos órgãos ambientais e a ampliação das campanhas de educação ambiental, com foco na mudança de comportamento do consumidor (Silva *et al.*, 2023).

Dessa forma, a legislação ambiental brasileira dispõe de um conjunto normativo robusto no campo dos resíduos sólidos, mas ainda distante da realidade operacional de grande parte do território nacional. A lacuna entre teoria e prática revela a necessidade de um novo pacto institucional e social que viabilize a gestão efetiva, sustentável e integrada dos resíduos eletroeletrônicos em consonância com os princípios da economia circular e da justiça ambiental (Souza; Junior, 2024).

4.2.2 Desafios estruturais e operacionais da coleta e reciclagem

A operacionalização da coleta e reciclagem dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) no Brasil enfrenta múltiplos entraves estruturais e logísticos que comprometem a efetividade da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Apesar da existência de marcos legais, a infraestrutura disponível para executar as diretrizes ainda é insuficiente e desarticulada, especialmente nos municípios de menor porte (Moraes *et al.*, 2021).

A coleta seletiva de REEE é um dos maiores gargalos enfrentados no país. A maioria dos municípios brasileiros ainda não dispõe de programas específicos para esse tipo de resíduo. Mesmo onde há coleta seletiva tradicional, ela não contempla, na maioria das vezes, os eletroeletrônicos, que são descartados junto ao lixo comum ou abandonados em locais impróprios, como calçadas e terrenos baldios (Silva *et al.*, 2023).

A escassez de Pontos de Entrega Voluntária (PEVs) e de centros de triagem apropriados agrava esse cenário. Os consumidores que desejam realizar o descarte correto encontram dificuldades logísticas para acessar locais autorizados. Além disso, a ausência de regulamentação municipal clara quanto à responsabilidade pela instalação e manutenção desses pontos enfraquece a logística reversa (Souza; Junior, 2024).

A cadeia de reciclagem de REEE é altamente dependente de tecnologias específicas e mão de obra qualificada para desmontagem, triagem e separação de componentes. No entanto, grande parte dos processos ainda é realizada de maneira manual e informal, o que reduz a eficiência e eleva os riscos de contaminação ambiental e ocupacional. Essa informalidade compromete o aproveitamento dos materiais e a rastreabilidade dos resíduos (Contador; Freire; Xavier, 2021).

A capacitação técnica dos agentes envolvidos, especialmente em cooperativas, é limitada. Muitos trabalhadores não possuem conhecimento sobre os riscos associados à manipulação de resíduos contendo metais pesados e compostos tóxicos. A falta de equipamentos de proteção individual (EPIs) e de processos padronizados também contribui para a baixa eficiência das operações e o aumento da exposição a substâncias perigosas (Silva *et al.*, 2023).

Além disso, a coleta e reciclagem de resíduos eletrônicos requerem a utilização de tecnologias capazes de separar materiais complexos com precisão. No entanto, essas tecnologias são escassas no Brasil, principalmente fora dos grandes centros urbanos. A ausência de incentivos para inovação e de linhas de financiamento para pequenas e médias empresas dificulta o acesso a soluções modernas e sustentáveis (Moraes *et al.*, 2021).

Outro desafio estrutural importante é a falta de integração entre os diversos atores da cadeia, como fabricantes, importadores, comerciantes, recicladores e consumidores. A ausência de sistemas digitais de rastreamento,

controle de inventário e comunicação entre os elos do ciclo de vida dos produtos dificulta a gestão eficiente e a contabilização de metas (Souza; Junior, 2024).

As dificuldades logísticas também impactam negativamente o custo-benefício das operações de coleta e reciclagem. O transporte de resíduos eletrônicos, por serem volumosos e de difícil empilhamento, demanda infraestrutura especializada, o que encarece o processo. Em áreas remotas ou com infraestrutura urbana deficiente, o escoamento dos REEE se torna economicamente inviável sem apoio público ou incentivos fiscais (Abreu; Silva; Ribeiro, 2021).

O comportamento do consumidor final também representa uma barreira operacional. Muitos usuários armazenam por longos períodos os aparelhos fora de uso, por falta de informações sobre os riscos do acúmulo ou da existência de canais de devolução. O apego emocional, o receio de vazamento de dados e a falta de campanhas educativas efetivas contribuem para a baixa adesão à logística reversa (Abreu; Silva; Ribeiro, 2021).

O modelo econômico baseado em extração, consumo e descarte rápido ainda predomina no Brasil. A transição para a economia circular exige mudança cultural, investimentos em infraestrutura e desenvolvimento de novos modelos de negócio baseados em reutilização, remanufatura e reciclagem. Contudo, a ausência de políticas públicas integradas e de estratégias regionais sustentadas impede o avanço significativo dessa transição (Contador; Freire; Xavier, 2021).

As desigualdades regionais também se refletem na capacidade de resposta à gestão dos resíduos eletrônicos. Enquanto alguns municípios mais estruturados já avançaram na implementação de sistemas de coleta seletiva e parcerias público-privadas, outros sequer possuem plano de gerenciamento de resíduos sólidos. Essa disparidade territorial exige um olhar mais atento das instâncias estaduais e federais para apoio técnico e financeiro aos entes locais (Moraes *et al.*, 2021).

A superação dos desafios estruturais e operacionais na coleta e reciclagem de REEE depende de ações coordenadas entre poder público, setor produtivo e sociedade civil. Entre as estratégias viáveis estão a ampliação da rede de PEVs, o estímulo à formalização e capacitação das cooperativas, o fomento à pesquisa tecnológica e a criação de incentivos tributários para empresas que atuem na cadeia circular de resíduos (Souza; Junior, 2024).

Os obstáculos que envolvem a coleta e reciclagem de resíduos eletrônicos não se limitam à infraestrutura física, mas abrangem também aspectos normativos, sociais e econômicos. Enfrentá-los exige uma abordagem sistêmica e colaborativa, com compromisso intersetorial e foco na sustentabilidade da gestão desses resíduos em todo o território nacional (Silva *et al.*, 2023).

4.3 PRINCÍPIOS DA ECONOMIA CIRCULAR APLICADOS AO E-WASTE

A economia circular representa uma ruptura com o modelo linear de produção, baseado nas lógicas de extração, consumo e descarte. Em seu lugar, propõe-se um sistema regenerativo, no qual os recursos são reutilizados, remanufaturados ou reciclados de forma contínua, prolongando o ciclo de vida dos produtos e reduzindo a geração de resíduos (Martins; Leitão; Guarnieri, 2023).

Aplicada aos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE), a economia circular busca transformar o lixo eletrônico em insumo para novas cadeias produtivas. Isso implica a adoção de estratégias como design ecológico, modularidade dos produtos, reparabilidade e uso de materiais recicláveis ou de fácil separação, o que facilita a reinserção dos componentes no sistema produtivo (Massi; Santos; Reis, 2024).

Um dos pilares para viabilizar a circularidade no setor eletroeletrônico é o fortalecimento da logística reversa, especialmente no que se refere à coleta, desmontagem, separação e reprocessamento dos REEE. Esses processos exigem tecnologias apropriadas e políticas de incentivo que estimulem tanto as empresas quanto os consumidores a participar da cadeia circular (Neto *et al.*, 2023).

A remanufatura e a reutilização de componentes eletrônicos são alternativas viáveis dentro desse modelo. Equipamentos devolvidos ou obsoletos podem ser restaurados, substituindo apenas as peças danificadas, e retornando

ao mercado com garantia funcional. Essa prática contribui para a economia de recursos e energia, além de reduzir os impactos ambientais da extração de matérias-primas (Brito *et al.*, 2022).

A mineração urbana, entendida como a recuperação de materiais valiosos presentes nos REEE, é uma estratégia essencial na transição para a circularidade. O reaproveitamento de metais como cobre, ouro e lítio reduz a pressão sobre a mineração tradicional e contribui para a segurança de recursos estratégicos, especialmente em países com baixa produção mineral (Giese; Lins; Xavier, 2021).

O avanço da economia circular no setor eletrônico também requer o redesenho dos produtos. A integração de heurísticas de design sustentável favorece a desmontagem, a rastreabilidade dos materiais e a separação eficiente de componentes. Esse processo deve ser iniciado já na fase de projeto dos equipamentos, prevendo seu ciclo completo de vida útil (Massi; Santos; Reis, 2024).

A adoção plena da economia circular exige uma articulação entre regulação, inovação e conscientização. Barreiras como o custo elevado de tecnologias de reciclagem, a baixa adesão dos consumidores e a falta de padronização nos processos ainda limitam sua implementação em larga escala. Superar esses desafios requer políticas públicas integradas, estímulo à pesquisa e a adoção de modelos de negócio mais sustentáveis (Ali; Shirazi, 2023).

Nesse contexto, a economia circular surge como uma alternativa promissora para a gestão de resíduos eletrônicos, promovendo eficiência econômica, proteção ambiental e justiça social ao longo de toda a cadeia produtiva (Sarkhoshkalat *et al.*, 2024).

4.3.1 Conceitos de economia circular e ciclo de vida do produto

A economia circular propõe uma mudança sistêmica no modelo de produção e consumo, que visa reduzir ao máximo o desperdício, reintegrando os resíduos ao ciclo produtivo como recursos. Ao contrário da lógica linear — baseada em extrair, produzir, consumir e descartar — a economia circular atua pela regeneração contínua dos fluxos técnicos e biológicos, estendendo o ciclo

de vida dos produtos e promovendo a eficiência do uso de materiais (Martins; Leitão; Guarnieri, 2023).

O ciclo de vida do produto, nesse contexto, passa a ser um conceito estratégico para avaliar e planejar o impacto ambiental de bens de consumo, incluindo os eletroeletrônicos. Esse ciclo compreende todas as fases, desde a extração de matéria-prima, fabricação, distribuição, uso, até o descarte e possível reinserção do produto no sistema. A análise do ciclo de vida (ACV) permite identificar pontos críticos de geração de impactos e oportunidades de melhoria em cada etapa (Pajunen; Holuszko, 2022).

No setor de equipamentos eletroeletrônicos, a transição para a economia circular exige a adoção de práticas como o design sustentável, que privilegia a modularidade, a durabilidade, a facilidade de desmontagem e o uso de materiais recicláveis. Produtos desenhados sob essa lógica são mais fáceis de reparar, atualizar ou remanufaturar, aumentando seu tempo de vida útil e reduzindo a geração de resíduos (Massi; Santos; Reis, 2024).

A implementação de ciclos fechados de materiais é central na economia circular. Isso envolve, por exemplo, a coleta e reprocessamento de metais e plásticos contidos em dispositivos eletrônicos descartados. Tais materiais podem ser reutilizados na fabricação de novos equipamentos, evitando a extração de recursos virgens. Esse fluxo reverso também contribui para a redução das emissões de carbono associadas à mineração e ao transporte de matérias-primas (Sarkhoshkalat *et al.*, 2024).

O conceito de remanufatura é outro pilar importante no modelo circular. Ao invés de simplesmente reciclar os materiais, a remanufatura propõe a restauração funcional de um equipamento usado, substituindo componentes defeituosos ou desatualizados. Essa estratégia, quando aliada à rastreabilidade e à garantia de qualidade, pode gerar produtos com desempenho equivalente aos novos, mas com menor impacto ambiental (Brito *et al.*, 2022).

A circularidade também depende da integração entre as etapas produtivas e logísticas. A logística reversa, por exemplo, é responsável por recolher os produtos ao fim de sua vida útil e direcioná-los aos canais apropriados de reaproveitamento. No Brasil, apesar da previsão legal, sua aplicação enfrenta dificuldades operacionais, como a baixa adesão dos consumidores, ausência de

pontos de coleta e fragilidade na articulação com o setor produtivo (Neto *et al.*, 2023).

O desenvolvimento de cadeias produtivas sustentáveis requer também a aplicação de indicadores de circularidade, que permitam mensurar o desempenho ambiental e a eficiência no uso de materiais. Esses indicadores avaliam, entre outros aspectos, a taxa de reuso, a proporção de materiais reciclados nos produtos, o tempo médio de vida útil dos equipamentos e a quantidade de resíduos reaproveitados (Ali; Shirazi, 2023).

Para além dos aspectos técnicos, a economia circular envolve também uma dimensão cultural e comportamental. A relação do consumidor com os produtos precisa ser ressignificada, passando do consumo descartável para o uso consciente e prolongado. A prática do reuso, a busca por reparos em vez de substituição e o engajamento na logística reversa são atitudes que fortalecem o modelo circular (Massi; Santos; Reis, 2024).

A digitalização e o uso de tecnologias inteligentes podem auxiliar na implementação da circularidade. O rastreamento de componentes por meio de *blockchain*, o uso de sensores para monitorar o desgaste de equipamentos e os sistemas automatizados de triagem e separação de materiais são recursos que ampliam a eficiência da gestão de resíduos e viabilizam novas estratégias de reaproveitamento (Sarkhoshkalat *et al.*, 2024).

A adoção da economia circular no setor eletrônico pode também ser impulsionada por políticas públicas de incentivo, como subsídios para a inovação tecnológica, linhas de crédito específicas para empresas do setor de reuso e reciclagem, além da exigência de rotulagem ambiental e responsabilidade estendida do produtor. Tais instrumentos criam um ambiente regulatório mais favorável à circularidade (Martins; Leitão; Guarnieri, 2023).

Em escala internacional, países que lideram a adoção da economia circular no setor eletrônico adotam mecanismos de retorno obrigatório dos produtos, metas de reciclagem ambiciosas e certificações de produtos sustentáveis. Essas experiências indicam que a combinação entre regulação firme, incentivos financeiros e conscientização da sociedade é essencial para consolidar o modelo circular (Pajunen; Holuszko, 2022).

Compreender o ciclo de vida dos produtos eletroeletrônicos é essencial para planejar intervenções em pontos críticos da cadeia produtiva, promovendo

maior eficiência e menor impacto ambiental. A economia circular, ao integrar os conceitos de reparabilidade, durabilidade e reinserção dos materiais, oferece um caminho estratégico para transformar os resíduos eletrônicos em recursos, alavancando a sustentabilidade do setor (Brito *et al.*, 2022).

4.3.2 Modelos circulares para eletroeletrônicos: reutilização, remanufatura e reciclagem

A aplicação de modelos circulares no setor de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) busca reinserir esses materiais nos ciclos produtivos por meio de estratégias como reutilização, remanufatura e reciclagem. Essas práticas têm como objetivo prolongar a vida útil dos produtos, reduzir a necessidade de extração de matérias-primas e minimizar os impactos ambientais associados ao descarte inadequado (Martins; Leitão; Guarnieri, 2023).

A reutilização consiste na destinação de produtos ou componentes ainda funcionais para novos ciclos de uso, sem que passem por processos industriais complexos. Equipamentos como computadores, celulares e eletrodomésticos podem ser reaproveitados integralmente ou em partes, desde que estejam em bom estado de conservação. Essa abordagem depende da triagem eficiente e da disponibilidade de canais logísticos que viabilizem a coleta e redistribuição (Ali; Shirazi, 2023).

A remanufatura é um processo mais elaborado que a reutilização, pois envolve o desmonte do produto, substituição de peças danificadas, testes de qualidade e posterior recomercialização. No setor eletrônico, essa prática tem sido aplicada com sucesso em impressoras, servidores, monitores e outros dispositivos corporativos. Os produtos remanufaturados possuem desempenho semelhante ao original e geram impactos ambientais significativamente menores que os produtos novos (Brito *et al.*, 2022).

A eficiência da remanufatura depende do design dos produtos e da disponibilidade de componentes padronizados. Produtos modulares e com fácil desmontagem são mais adaptáveis a essa estratégia. Além disso, é necessário garantir que os resíduos retornem à cadeia produtiva em tempo hábil, o que

reforça a importância da logística reversa como elo entre o consumidor final e o fabricante (Neto *et al.*, 2023).

A reciclagem, por sua vez, refere-se ao processo de transformação de materiais contidos nos equipamentos descartados, como plásticos, metais e vidros, em insumos para a fabricação de novos produtos. Essa estratégia é especialmente importante para a recuperação de metais preciosos como ouro, prata, paládio e cobalto, presentes em placas de circuito impresso, conectores e baterias (Sarkhoshkalat *et al.*, 2024).

No entanto, a reciclagem de REEE enfrenta desafios técnicos e econômicos. A heterogeneidade dos materiais, a presença de substâncias perigosas e a dificuldade de separação mecânica limitam a eficiência dos processos. Tecnologias mais avançadas de separação, lixiviação seletiva e recuperação térmica têm sido desenvolvidas, mas seu custo ainda é elevado para a realidade brasileira (Giese; Lins; Xavier, 2021).

A informalidade na cadeia de reciclagem também compromete os resultados. Muitos resíduos eletrônicos são tratados por cooperativas e trabalhadores autônomos sem capacitação técnica, equipamentos de proteção ou tecnologias adequadas. Essa realidade reduz a taxa de recuperação de materiais, expõe os trabalhadores a riscos e resulta em impactos ambientais negativos (Martins; Leitão; Guarnieri, 2023).

O fortalecimento das cooperativas de catadores, aliado a programas de capacitação e investimento em infraestrutura, pode aumentar significativamente a eficiência dos modelos circulares. A criação de redes regionais de reciclagem, com apoio técnico e articulação com indústrias recicladoras, representa uma alternativa viável para ampliar a escala da economia circular no Brasil (Giese; Lins; Xavier, 2021).

A integração entre os modelos de reutilização, remanufatura e reciclagem depende da existência de um sistema logístico robusto, capaz de coletar, transportar, classificar e destinar adequadamente os equipamentos descartados. O envolvimento dos fabricantes na estruturação desses sistemas, conforme previsto na responsabilidade compartilhada da Política Nacional de Resíduos Sólidos, é essencial para garantir a circularidade dos fluxos (Neto *et al.*, 2023).

O uso de tecnologias digitais, como sistemas de rastreamento por *blockchain*, sensores inteligentes e plataformas de logística colaborativa, pode

otimizar os processos e ampliar a transparência das operações. Essas inovações permitem identificar a origem dos resíduos, monitorar os fluxos de entrada e saída e avaliar o desempenho dos operadores em termos de volume reciclado e impacto ambiental (Sarkhoshkalat *et al.*, 2024).

Outra estratégia relevante é o desenvolvimento de modelos de negócio baseados em serviços, como o aluguel ou *leasing* de equipamentos eletrônicos, que favorecem a reintegração dos produtos ao fabricante após o uso. Essa lógica facilita a manutenção, atualização e remanufatura dos equipamentos, promovendo o uso mais eficiente dos recursos ao longo do tempo (Ali; Shirazi, 2023).

Do ponto de vista regulatório, é necessário que o poder público estabeleça diretrizes claras e metas específicas para cada tipo de modelo circular, estimulando sua aplicação por meio de incentivos fiscais, subsídios à inovação e programas de certificação ambiental. A exigência de rotulagem quanto à reciclabilidade e durabilidade dos produtos também pode orientar o consumidor na escolha de equipamentos mais sustentáveis (Pajunen; Holuszko, 2022).

A articulação entre academia, setor produtivo e sociedade civil também é fundamental para ampliar a escala dos modelos circulares. Projetos de pesquisa e desenvolvimento, parcerias com incubadoras e estímulo à criação de *startups* voltadas à remanufatura e reciclagem podem acelerar a adoção de práticas sustentáveis e gerar empregos de qualidade em toda a cadeia de valor (Massi; Santos; Reis, 2024).

Os modelos circulares voltados aos resíduos eletrônicos oferecem múltiplas oportunidades para reduzir a pressão sobre os recursos naturais, diminuir os impactos ambientais e gerar benefícios socioeconômicos. A sua consolidação no Brasil exige o fortalecimento da logística reversa, o incentivo à inovação e a criação de políticas públicas que promovam a circularidade como estratégia estruturante para o setor (Brito *et al.*, 2022).

4.4 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO E VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS ELETRÔNICOS

A valorização tecnológica dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) tem se tornado estratégica diante da crescente demanda por materiais críticos e do esgotamento de reservas minerais naturais. Os REEE contêm metais de alto valor, como ouro, paládio, cobre e terras raras, cuja recuperação por métodos avançados permite sua reinserção nas cadeias produtivas, fortalecendo a economia circular e a segurança de suprimentos (Cenci *et al.*, 2025).

As abordagens tecnológicas de tratamento incluem processos físicos, químicos e termoquímicos. A separação física, baseada em trituração, peneiramento e separação densimétrica ou eletrostática, é utilizada para concentrar frações metálicas e plásticas. Essa etapa prepara os materiais para tratamentos subsequentes com maior seletividade (Bhattacharjee *et al.*, 2025).

Entre os métodos químicos, destaca-se a lixiviação, que permite a extração seletiva de metais por meio de soluções ácidas ou alcalinas. Técnicas recentes utilizam reagentes menos agressivos e mais eficientes, como solventes verdes, reduzindo os riscos ambientais associados à geração de resíduos líquidos contaminantes (Vishwakarma; Hait, 2024).

A pirólise e o plasma térmico são alternativas termoquímicas emergentes para o tratamento de componentes plásticos e compostos orgânicos presentes nos REEE. Esses processos, ao decompor os materiais a altas temperaturas, permitem a recuperação de metais associados e geram subprodutos com potencial energético ou industrial (Elgarahy *et al.*, 2024).

O avanço da engenharia química tem impulsionado a inovação na recuperação de elementos de difícil separação. Métodos como eletroextração, biolixiviação com microrganismos e sistemas hidrometalúrgicos multietapas têm demonstrado eficiência na recuperação de metais raros em escala laboratorial e semi-industrial, com promissora viabilidade econômica (Kwon *et al.*, 2024).

Além das técnicas de recuperação, a valorização dos REEE passa também pela sua integração em cadeias de valor tecnológico. A aplicação de materiais reciclados em setores como microeletrônica, baterias e ligas metálicas sofisticadas amplia o valor agregado do resíduo e reduz a dependência de matérias-primas importadas (Cenci *et al.*, 2025).

Para viabilizar a disseminação dessas tecnologias, é necessário superar barreiras como o alto custo de implantação, a escassez de infraestrutura

industrial e a ausência de políticas públicas voltadas à inovação sustentável. A criação de centros de triagem e processamento com capacidade tecnológica avançada é uma etapa essencial para consolidar a circularidade na cadeia eletroeletrônica (Kwon *et al.*, 2024).

A aplicação de tecnologias de tratamento e valorização dos resíduos eletrônicos constitui um pilar técnico para a transição à economia circular, permitindo transformar passivos ambientais em ativos econômicos e estratégicos para a indústria e a sustentabilidade global (Elgarahy *et al.*, 2024).

4.4.1 Técnicas de reciclagem mecânica, térmica e química

As técnicas de reciclagem aplicadas aos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) são classificadas em três principais categorias: mecânica, térmica e química. Cada abordagem apresenta características distintas quanto à eficiência de recuperação, à complexidade operacional e ao tipo de material alvo. A escolha da técnica depende da composição do resíduo, do nível de contaminação e da viabilidade econômica da operação (Cenci *et al.*, 2025).

A reciclagem mecânica envolve processos físicos de fragmentação, separação e classificação dos materiais contidos nos REEE. Inicialmente, os resíduos passam por trituração e moagem, etapas que visam reduzir o tamanho das partículas e expor as interfaces entre metais, plásticos e cerâmicas. Em seguida, são aplicados métodos de separação magnética, eletrostática, gravimétrica ou por densidade, que permitem a extração de frações relativamente puras (Bhattacharjee *et al.*, 2025).

A principal vantagem da reciclagem mecânica está no seu baixo custo operacional e na menor geração de efluentes, pois não utiliza produtos químicos agressivos. No entanto, essa técnica possui limitações quanto à seletividade, especialmente em resíduos complexos, como placas de circuito impresso (PCI), onde metais e polímeros estão fortemente associados. A separação incompleta reduz a pureza dos materiais recuperados, comprometendo seu reaproveitamento industrial direto (Kwon *et al.*, 2024).

A reciclagem térmica, por sua vez, utiliza calor para decompor os materiais orgânicos presentes nos REEE e facilitar a extração dos metais. A pirólise é um dos métodos mais estudados nesse grupo. Consiste no aquecimento dos resíduos em ambiente sem oxigênio, promovendo a decomposição de plásticos e borrachas em gases, óleos e carbono sólido. Os metais permanecem na fração residual e podem ser recuperados posteriormente (Elgarahy *et al.*, 2024).

Outra técnica térmica utilizada é a incineração controlada, com captação de calor e posterior tratamento dos gases gerados. Apesar de eficiente na redução do volume de resíduos, esse método apresenta riscos de emissão de compostos tóxicos, como dioxinas e furanos, exigindo sistemas avançados de filtragem e controle ambiental. Por isso, sua aplicação em países em desenvolvimento ainda é limitada por custos e questões regulatórias (Vishwakarma; Hait, 2024).

O plasma térmico é uma tecnologia emergente que opera com temperaturas acima de 3.000 °C, promovendo a fusão e vitrificação dos resíduos. Essa técnica é eficaz na destruição de substâncias perigosas e na recuperação de metais com elevado grau de pureza. Entretanto, seu alto consumo energético e os elevados investimentos iniciais ainda restringem sua aplicação em larga escala (Kwon *et al.*, 2024).

A reciclagem química, também chamada de hidrometalurgia, é baseada na dissolução seletiva dos metais por meio de reações com solventes. A lixiviação ácida é o método mais comum, utilizando reagentes como ácido sulfúrico, ácido nítrico ou cianeto para solubilizar cobre, ouro, prata e outros elementos de interesse. Os metais são posteriormente precipitados, eletrodepositados ou extraídos por solventes orgânicos (Cenci *et al.*, 2025).

Apesar de altamente eficiente, a lixiviação convencional gera resíduos líquidos contaminantes e gases tóxicos, exigindo tratamento complexo dos efluentes. Por esse motivo, pesquisas têm sido direcionadas ao desenvolvimento de técnicas mais sustentáveis, como a lixiviação com solventes verdes (como tiosulfato de sódio) ou com agentes biológicos. A biolixiviação, por exemplo, utiliza bactérias ou fungos capazes de oxidar metais, promovendo sua solubilização de maneira ambientalmente mais segura (Vishwakarma; Hait, 2024).

O uso de solventes orgânicos e complexantes em processos de extração por solvente é outra vertente da reciclagem química. Esses compostos são capazes de separar seletivamente metais presentes em misturas complexas, mesmo em concentrações baixas. Essa técnica é particularmente útil na recuperação de terras raras, que apresentam características físico-químicas semelhantes e exigem separações altamente seletivas (Bhattacharjee *et al.*, 2025).

A escolha entre as técnicas depende da infraestrutura disponível, da composição dos resíduos, dos requisitos ambientais e do valor de mercado dos materiais a serem recuperados. Em geral, combinações entre processos mecânicos, térmicos e químicos são aplicadas em linhas integradas, permitindo a recuperação sequencial e eficiente de diferentes materiais. Essa abordagem, chamada de processamento híbrido, vem ganhando destaque por sua flexibilidade e alta taxa de reaproveitamento (Elgarahy *et al.*, 2024).

No contexto brasileiro, a aplicação dessas técnicas ainda é incipiente e concentrada em poucas unidades com capacidade tecnológica avançada. A maioria das operações realiza apenas a triagem manual e o desmonte parcial dos resíduos, vendendo as frações metálicas brutas para indústrias estrangeiras que operam com tecnologias mais sofisticadas. Esse modelo resulta em perdas econômicas e dependência tecnológica externa (Cenci *et al.*, 2025).

A superação desse cenário exige investimentos públicos e privados na modernização da cadeia de reciclagem, com foco em inovação e capacitação técnica. A implantação de centros de excelência em processamento de REEE, a regulamentação de padrões de pureza para os materiais reciclados e o incentivo à pesquisa em tecnologias limpas são medidas prioritárias para consolidar a valorização tecnológica no setor (Kwon *et al.*, 2024).

As técnicas de reciclagem mecânica, térmica e química representam alternativas complementares para a recuperação de materiais críticos e estratégicos contidos nos resíduos eletrônicos. Seu uso adequado, combinado com critérios de sustentabilidade e eficiência econômica, pode transformar um passivo ambiental em fonte relevante de insumos industriais e contribuir para a consolidação da economia circular (Vishwakarma; Hait, 2024).

4.4.2 Recuperação de metais raros e valiosos

A recuperação de metais raros e valiosos a partir dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) representa uma estratégia crítica para a sustentabilidade econômica e ambiental da indústria tecnológica. Elementos como ouro, prata, paládio, platina, cobalto e terras raras estão presentes em pequenas quantidades em placas de circuito impresso, baterias, conectores e semicondutores. A sua extração eficiente reduz a dependência da mineração convencional e fortalece os princípios da economia circular (Cenci *et al.*, 2025).

Os metais preciosos, especialmente o ouro, são altamente valorizados por sua condutividade elétrica, resistência à corrosão e aplicações em microeletrônica. Embora representem apenas uma fração da massa total dos resíduos eletrônicos, sua recuperação é economicamente vantajosa devido ao elevado valor de mercado. Técnicas como a lixiviação ácida e a extração por solventes são frequentemente utilizadas para separar esses metais de matrizes complexas (Vishwakarma; Hait, 2024). Porém, é necessário refletir que essas alternativas para extração de metais preciosos podem acarretar impactos ambientais. Assim, o que seria uma solução para um problema pode gerar diversos outros.

A lixiviação cianetada é uma das metodologias mais empregadas na extração de ouro e prata. No entanto, o uso de cianeto apresenta riscos ambientais significativos, exigindo monitoramento rigoroso e tratamento adequado dos efluentes. Alternativas mais sustentáveis, como o uso de tiosulfato, tiouréia ou soluções à base de halogênios, têm sido estudadas com o objetivo de reduzir a toxicidade dos processos sem comprometer a eficiência (Kwon *et al.*, 2024).

A recuperação de metais do grupo da platina, como paládio e platina, é ainda mais desafiadora, pois esses elementos são utilizados em quantidades extremamente reduzidas e em ligas complexas. Técnicas de extração seletiva com ligantes orgânicos ou sistemas de membranas seletivas têm mostrado resultados promissores, mas sua aplicação ainda é limitada a laboratórios e instalações-piloto (Bhattacharjee *et al.*, 2025).

O cobalto, por sua vez, tem ganhado relevância estratégica com a crescente demanda por baterias recarregáveis, especialmente aquelas utilizadas

em veículos elétricos e dispositivos móveis. A presença de cobalto em baterias de íons de lítio torna os REEE uma fonte secundária promissora desse metal. Técnicas hidrometalúrgicas, como a lixiviação com ácidos sulfúrico e nítrico, permitem sua recuperação com alto grau de pureza (Elgarahy *et al.*, 2024).

As chamadas terras raras, grupo de 17 elementos químicos essenciais para a produção de ímãs permanentes, LEDs, telas planas e catalisadores, também estão presentes em componentes eletrônicos de alto desempenho. No entanto, sua recuperação é complexa devido à similaridade química entre os elementos e à necessidade de separações altamente seletivas. Processos baseados em extração por solventes, troca iônica e cristalização seletiva vêm sendo aprimorados para atender a essa demanda (Cenci *et al.*, 2025).

O uso da biotecnologia na recuperação de metais raros também tem sido explorado. A biolixiviação, utilizando bactérias como *Acidithiobacillus ferrooxidans*, promove a solubilização de metais a partir de materiais sólidos sem o uso de reagentes agressivos. Essa alternativa é considerada ambientalmente mais segura, embora ainda enfrente limitações quanto à velocidade do processo e à adaptação em larga escala industrial (Vishwakarma; Hait, 2024).

Outro desafio está relacionado à separação eficiente de metais valiosos em misturas complexas. Em muitos casos, os REEE apresentam alto grau de heterogeneidade, dificultando a extração seletiva. O desenvolvimento de tecnologias de pré-tratamento, como a separação eletrostática, flotação e classificação granulométrica, tem contribuído para a melhoria do rendimento dos processos de recuperação (Bhattacharjee *et al.*, 2025).

A recuperação desses metais estratégicos não apenas contribui para a redução dos impactos ambientais associados ao descarte dos REEE, mas também cria oportunidades econômicas significativas. Países com baixa produção mineral podem, por meio da mineração urbana, reduzir sua vulnerabilidade geopolítica e fortalecer a indústria nacional de tecnologia. No Brasil, essa abordagem ainda é incipiente, mas apresenta elevado potencial (Cenci *et al.*, 2025).

Para tornar essa cadeia viável, é fundamental estruturar políticas públicas que incentivem o desenvolvimento tecnológico e a criação de infraestrutura adequada. Isso inclui centros de triagem especializados, laboratórios de análise metalúrgica e parcerias entre universidades, empresas e cooperativas. Linhas

de crédito, incentivos fiscais e marcos regulatórios específicos também são instrumentos necessários para fomentar essa indústria (Kwon *et al.*, 2024).

A rastreabilidade dos resíduos e a transparência na gestão são igualmente essenciais para garantir que os metais recuperados atendam aos padrões de qualidade e não estejam associados a práticas insustentáveis. A implementação de sistemas digitais de monitoramento, como *blockchain*, pode assegurar o controle de origem, volume e destino dos materiais processados (Elgarahy *et al.*, 2024).

Dessa forma, a recuperação de metais raros e valiosos a partir dos resíduos eletrônicos representa não apenas uma solução ambiental, mas também uma oportunidade estratégica para reindustrialização verde e economia circular. Ao transformar resíduos em recursos, o setor eletroeletrônico pode se tornar mais resiliente, eficiente e sustentável, contribuindo para a transição energética e tecnológica global (Vishwakarma; Hait, 2024).

4.5 OPORTUNIDADES SOCIOECONÔMICAS E SUSTENTÁVEIS DA GESTÃO CIRCULAR

A implementação de práticas circulares na gestão dos resíduos eletrônicos oferece oportunidades relevantes de transformação socioeconômica, especialmente em países com grandes centros urbanos e elevado consumo de tecnologia. A lógica da economia circular permite não apenas reduzir impactos ambientais, mas também promover inclusão social, geração de renda e inovação produtiva a partir de resíduos antes considerados descartáveis (Sarkhoshkalat *et al.*, 2024).

No contexto da gestão de resíduos, as cooperativas de catadores e as organizações de economia solidária assumem papel central. Essas estruturas, muitas vezes invisibilizadas no modelo linear, podem ser formalizadas e integradas à cadeia circular como agentes técnicos especializados na triagem, desmontagem e separação dos REEE. Com apoio institucional e capacitação, essas iniciativas fortalecem a justiça social e a equidade econômica (Rahman, 2025).

A transição para a economia circular exige um novo paradigma de governança e inclusão. Isso implica ampliar o acesso a oportunidades, recursos e informações, principalmente para populações historicamente marginalizadas do mercado formal. O redesenho de políticas públicas com foco em diversidade e participação social pode ampliar os benefícios econômicos e sociais gerados pelas cadeias de reciclagem e remanufatura (Liu *et al.*, 2023).

Além do potencial de inclusão, a gestão circular contribui para a diversificação econômica. A recuperação de metais raros, a reindustrialização baseada em materiais reciclados e a criação de novos modelos de negócio, como o aluguel de equipamentos eletrônicos, fortalecem economias locais e reduzem a dependência de importações. Essa abordagem também favorece a resiliência diante de crises de suprimento global (Sarkhoshkalat *et al.*, 2024).

No âmbito ambiental, a gestão circular dos REEE pode reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa, associadas à extração e transporte de matérias-primas virgens. Essa redução é fundamental para que países cumpram seus compromissos climáticos e avancem na agenda dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). A prevenção da poluição marinha por resíduos plásticos e eletrônicos é uma das metas possíveis com essa abordagem (Fadeeva; Van Berkel, 2021).

O uso de tecnologias digitais para monitorar, rastrear e otimizar os fluxos urbanos de materiais também representa uma oportunidade estratégica. Plataformas integradas de logística, inteligência artificial e Internet das Coisas (IoT) podem ampliar a eficiência do metabolismo urbano, garantindo o retorno mais rápido e preciso dos resíduos eletrônicos para a indústria (D'Amico *et al.*, 2021).

A gestão circular dos resíduos eletrônicos apresenta-se como vetor de desenvolvimento sustentável ao conjugar crescimento econômico, inclusão social e responsabilidade ambiental. A construção de um ecossistema favorável a essa transformação requer articulação intersetorial, políticas públicas eficazes e engajamento coletivo para consolidar um novo modelo produtivo baseado na regeneração e no reaproveitamento de recursos (Liu *et al.*, 2023).

4.5.1 Geração de emprego e inclusão social por cooperativas e *startups*

A gestão circular dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) apresenta grande potencial para fomentar a inclusão produtiva e a geração de emprego, especialmente em contextos urbanos marcados por desigualdade social. A reutilização, remanufatura e reciclagem desses resíduos demandam mão de obra diversificada e descentralizada, criando oportunidades para cooperativas, pequenas empresas e *startups* inovadoras inserirem-se em cadeias produtivas sustentáveis (Sarkhoshkalat *et al.*, 2024).

As cooperativas de catadores desempenham papel estratégico na economia circular ao atuar na coleta, triagem e pré-processamento dos resíduos eletrônicos. No entanto, sua atuação frequentemente ocorre em condições precárias, com acesso limitado a infraestrutura, financiamento e capacitação técnica. A formalização dessas cooperativas, aliada a políticas públicas de apoio, pode transformar o trabalho informal em ocupação qualificada, com segurança e valorização profissional (Rahman, 2025).

A inclusão das cooperativas nos arranjos produtivos locais também favorece a descentralização da gestão de resíduos, ampliando a capilaridade da logística reversa e contribuindo para o desenvolvimento regional. Além disso, promove o protagonismo de grupos vulnerabilizados, como mulheres, jovens e trabalhadores de baixa escolaridade, que passam a integrar uma economia baseada na regeneração e no reaproveitamento de recursos (Liu *et al.*, 2023).

Para que essas oportunidades se concretizem, é necessário investir na formação continuada dos cooperados. Cursos de capacitação em desmontagem segura, separação de componentes, identificação de materiais valiosos e operação de equipamentos podem elevar a produtividade e a qualidade do serviço prestado. A certificação de competências também contribui para o reconhecimento profissional e para a inserção desses trabalhadores em cadeias formais de suprimento (Fadeeva; Van Berkel, 2021).

Além das cooperativas, as *startups* têm se destacado como agentes de inovação na gestão dos REEE. Essas empresas, geralmente formadas por jovens empreendedores, desenvolvem soluções tecnológicas e modelos de negócio baseados em princípios de circularidade. Exemplos incluem aplicativos de coleta agendada, plataformas de rastreamento de resíduos, serviços de

aluguel de eletrônicos e sistemas automatizados de separação e reciclagem (D'Amico *et al.*, 2021).

As *startups* atuam como catalisadoras da transformação digital do setor e são capazes de conectar diferentes elos da cadeia de valor. Sua flexibilidade organizacional e capacidade de adaptação às demandas do mercado favorecem a criação de serviços sob medida, com foco na sustentabilidade, eficiência e impacto social. Muitas dessas iniciativas também adotam princípios de inovação social, priorizando a geração de valor coletivo em vez de apenas lucro financeiro (Rahman, 2025).

O ecossistema de inovação circular deve ser apoiado por políticas públicas que garantam acesso a crédito, incubação de ideias, mentorias e espaços de experimentação. A articulação entre universidades, centros de pesquisa, governo e setor privado pode fomentar ambientes favoráveis à criação e consolidação de negócios de impacto voltados à economia circular. A contratação pública sustentável é outro mecanismo eficaz para estimular essas iniciativas (D'Amico *et al.*, 2021).

A integração entre cooperativas e *startups* pode gerar sinergias importantes para a estruturação de redes locais de gestão de resíduos. *Startups* fornecem tecnologia, métodos de gestão e canais de mercado, enquanto as cooperativas oferecem capilaridade territorial e conhecimento empírico do território. Essa colaboração pode fortalecer o sistema de logística reversa e ampliar o volume e a qualidade dos materiais recuperados (Sarkhoshkalat *et al.*, 2024).

A geração de empregos na cadeia circular de REEE também deve ser analisada sob a ótica da transição justa. Isso significa garantir que os trabalhadores da economia linear, especialmente os mais vulneráveis, não sejam deixados para trás. A criação de programas de requalificação e recolocação profissional é essencial para assegurar que a transição para o modelo circular seja inclusiva e equitativa (Liu *et al.*, 2023).

A digitalização dos processos, se bem aplicada, pode aumentar a produtividade sem excluir os trabalhadores. Tecnologias como inteligência artificial, sensores de classificação automática e plataformas de gestão digital podem ser incorporadas ao cotidiano das cooperativas e pequenas empresas, desde que acompanhadas de treinamento e adaptação gradual. Assim, evita-se

o risco de aprofundamento das desigualdades tecnológicas (Fadeeva; Van Berkel, 2021).

A valorização das profissões ligadas à circularidade dos REEE também passa por uma mudança cultural. É necessário reconhecer a importância ambiental e econômica do trabalho desses agentes, combatendo o estigma associado à atividade de coleta e reciclagem. Campanhas públicas de conscientização, reconhecimento institucional e políticas de remuneração justa podem contribuir para esse processo (Rahman, 2025).

A economia circular aplicada aos resíduos eletrônicos oferece um campo fértil para a geração de empregos verdes e a inclusão social. A combinação entre tecnologias emergentes, inovação social e fortalecimento das cooperativas pode criar cadeias produtivas mais justas, resilientes e sustentáveis. O engajamento multissetorial será determinante para ampliar esses benefícios e consolidar um novo paradigma de desenvolvimento (Sarkhoshkalat *et al.*, 2024).

4.5.2 Redução da pegada ambiental e inovação sustentável

A adoção da economia circular na gestão de resíduos eletrônicos tem potencial significativo para reduzir a pegada ambiental associada à produção, uso e descarte de equipamentos eletroeletrônicos. A pegada ambiental refere-se ao conjunto de impactos causados por atividades humanas ao meio ambiente, incluindo emissões de gases de efeito estufa, consumo de recursos naturais e geração de poluição. A minimização desses impactos é uma das principais vantagens do modelo circular em oposição à lógica linear de extração, uso e descarte (Sarkhoshkalat *et al.*, 2024).

Os resíduos eletrônicos contêm substâncias tóxicas como chumbo, cádmio, mercúrio e retardantes de chama bromados, que, se descartados de maneira inadequada, contaminam o solo, a água e o ar. O reprocessamento adequado desses resíduos, por meio da reciclagem, remanufatura ou reutilização, impede a liberação desses poluentes no ambiente, contribuindo para a preservação dos ecossistemas e da saúde pública (Fadeeva; Van Berkel, 2021).

A redução da pegada de carbono é outro benefício direto da gestão circular. A extração e beneficiamento de matérias-primas, especialmente os metais, são atividades altamente intensivas em energia. A recuperação de materiais contidos em equipamentos eletrônicos consome significativamente menos energia do que sua produção a partir de recursos virgens. A reciclagem de alumínio, por exemplo, pode economizar até 95% da energia necessária para sua produção primária (Sarkhoshkalat *et al.*, 2024).

A inovação sustentável desempenha papel central nesse processo, oferecendo soluções técnicas e organizacionais que viabilizam a circularidade e aumentam a eficiência ambiental. A aplicação de tecnologias limpas nos processos de tratamento de resíduos, como a biolixiviação, a pirólise e os sistemas híbridos de separação, permite recuperar materiais com menor impacto ambiental. Essas tecnologias, além de promoverem a valorização dos resíduos, reduzem a emissão de poluentes e a geração de rejeitos (D'Amico *et al.*, 2021).

A digitalização é outro vetor de inovação sustentável na gestão de resíduos eletrônicos. O uso de sensores inteligentes, sistemas de rastreamento em tempo real, inteligência artificial e *blockchain* permite monitorar o ciclo de vida dos produtos, otimizar rotas de coleta, garantir a rastreabilidade dos materiais e reduzir desperdícios. Essas tecnologias também facilitam a integração entre diferentes agentes da cadeia, promovendo maior transparência e colaboração (D'Amico *et al.*, 2021).

O conceito de ecodesign é um componente fundamental da inovação circular. Projetar produtos com foco em durabilidade, modularidade e facilidade de desmontagem contribui para o aumento do tempo de vida útil dos equipamentos e para a eficiência dos processos de reuso e reciclagem. O desenvolvimento de componentes padronizados e materiais recicláveis também reduz a complexidade técnica e energética da recuperação (Liu *et al.*, 2023).

As inovações no modelo de negócio também são relevantes. A substituição da venda de produtos pelo fornecimento de serviços, como aluguel, compartilhamento e *leasing* de eletrônicos, estimula a manutenção preventiva, o retorno dos equipamentos ao fabricante e a otimização do uso dos recursos. Esse tipo de modelo não apenas reduz a geração de resíduos como também cria incentivos econômicos para a inovação contínua (Rahman, 2025).

A adoção da economia circular pode ainda contribuir para o cumprimento das metas climáticas e ambientais globais, como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e os compromissos do Acordo de Paris. Ao reduzir emissões, conservar recursos e estimular práticas produtivas mais limpas, a gestão circular dos REEE fortalece o papel das cidades e das empresas na transição ecológica (Fadeeva; Van Berkel, 2021).

A promoção da inovação sustentável, no entanto, depende de um ecossistema favorável composto por políticas públicas, instrumentos econômicos e investimentos em pesquisa e desenvolvimento. Incentivos fiscais, linhas de crédito verde, programas de compras públicas sustentáveis e marcos regulatórios atualizados são essenciais para viabilizar a adoção de novas tecnologias e modelos de produção (Sarkhoshkalat *et al.*, 2024).

Além disso, é necessário promover a cultura da sustentabilidade entre consumidores, empresas e instituições públicas. Campanhas de educação ambiental, programas de rotulagem ecológica, certificações de processos e produtos circulares são estratégias que informam, sensibilizam e incentivam comportamentos alinhados com os princípios da economia circular. A construção de consciência coletiva é indispensável para consolidar a inovação sustentável como prática cotidiana (Liu *et al.*, 2023).

A inovação no campo dos resíduos eletrônicos também pode impulsionar setores industriais emergentes, como a indústria de tecnologia limpa, a fabricação de novos materiais reciclados e os serviços digitais ambientais. Essa diversificação econômica pode gerar empregos de maior qualidade, fortalecer cadeias produtivas locais e aumentar a competitividade industrial com base em critérios ambientais e sociais (D'Amico *et al.*, 2021).

Dessa forma, a redução da pegada ambiental associada aos resíduos eletrônicos está diretamente conectada à capacidade de inovar de forma sustentável. A combinação entre eficiência tecnológica, novos modelos de negócio e mudanças culturais permite transformar desafios ambientais em oportunidades de desenvolvimento. A gestão circular, nesse sentido, deve ser compreendida como estratégia de transição para um futuro mais resiliente, regenerativo e justo (Rahman, 2025).

5. DISCUSSÃO

A literatura analisada evidencia um intenso esforço acadêmico voltado à gestão de resíduos eletroeletrônicos sob a ótica da sustentabilidade e da economia circular. Reis (2021) posiciona a logística reversa não apenas como um instrumento legal, mas como uma estratégia ambiental essencial; contudo, a persistência de barreiras logísticas, culturais e econômicas sinaliza a necessidade de aprofundar estudos sobre modelos operacionais que integrem, de forma sinérgica, atores públicos e privados. Complementarmente, Duarte et al. (2020) e Abreu, Silva e Ribeiro (2021) demonstram que a mera existência de pontos de coleta é insuficiente se não acompanhada de ações continuadas de educação ambiental, enquanto Franco et al. (2021) reforçam que os riscos à saúde dos catadores informais escancararam lacunas nas políticas públicas de saúde, convocando pesquisas que articulem logística reversa e bem-estar social.

No âmbito da governança, a fragmentação de responsabilidades e a insuficiência de infraestrutura técnica — apontadas por Galvão et al. (2021) e Moraes et al. (2021) — delineiam um cenário em que a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) encontra dificuldades práticas de implementação. A resistência empresarial à internalização dos custos, documentada por Souza e Júnior (2024) e Neto et al. (2023), reforça o paradoxo descrito por Contador, Freire e Xavier (2021) entre interesses econômicos e ambientais. Essas constatações indicam a urgência de explorar mecanismos de governança

colaborativa, que incorporem incentivos econômicos e normativos capazes de alinhar as diferentes motivações dos agentes da cadeia reversa.

Do ponto de vista tecnológico, os avanços em métodos de recuperação e em ecodesign sugerem caminhos complementares para ampliar a circularidade. Kwon et al. (2024), Vishwakarma e Hait (2024) e Bhattacharjee et al. (2025) apresentam soluções termoquímicas, hidro metalúrgicas e biotecnológicas promissoras, mas que ainda demandam esforços de padronização e redução de custos para escala industrial. Paralelamente, a remanufatura reversa — conforme demonstrado por Brito et al. (2022) — e as estratégias de modularidade e extensão de vida útil propostas por Martins, Leitão e Guarnieri (2023) reforçam a importância de integrar abordagens de prolongamento de ciclo de vida ao portfólio tecnológico.

Ao confrontar essas teorias, torna-se claro que o avanço da economia circular em resíduos eletroeletrônicos requer uma articulação simultânea de três dimensões: inovação tecnológica, inclusão social e responsabilidade compartilhada.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Trabalhos Futuros

Considerando os limites da pesquisa realizada, recomenda-se que estudos futuros avancem sobre aspectos ainda pouco explorados e/ou demandas mais quantitativa e prática. A seguir, algumas sugestões de trabalhos futuros:

- **Estudo territorial da cadeia de logística reversa de REEE:** Pesquisas com enfoque regional e municipal podem fornecer diagnósticos mais detalhados sobre as vulnerabilidades locais, favorecendo a formulação de políticas públicas mais eficazes e adaptadas às especificidades de cidades de pequeno e médio porte.
- **Desenvolvimento e aplicação de indicadores de circularidade em equipamentos eletrônicos:** a criação de métricas específicas que avaliem durabilidade, reuso e reincorporação de materiais. Além de utilizar aplicações tecnológicas para ampliar a rastreabilidade e transparência do fluxo de resíduos.
- **Impacto de programas de educação ambiental no comportamento do consumidor:** pesquisas aplicadas em escolas, universidades ou comunidades podem avaliar a eficácia de campanhas voltadas ao descarte consciente de eletrônicos e fomentar a cultura da circularidade desde a base educacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, D. C. de; SILVA, Á. M. B. da; RIBEIRO, A. R. B. Hábitos relacionados ao descarte de celulares e sua aplicabilidade à política nacional de resíduos sólidos: um estudo em uma unidade acadêmica de Pernambuco. **Revista Livre de Sustentabilidade e Empreendedorismo**, v. 6, n. 2, p. 139-161, 2021.

Disponível em:

<https://www.relise.eco.br/index.php/relise/article/download/430/513>. Acesso em: 15 jan. 2025.

ALI, S.; SHIRAZI, F. The paradigm of circular economy and an effective electronic waste management. **Sustainability**, v. 15, n. 3, p. 1998, 2023.

Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/3/1998/pdf>. Acesso em: 28 fev. 2025.

ALÓS, J. D. S.; MILAN, G. S.; EBERLE, L. The Reverse Logistics operation of solid waste pos-consumption of electronic products for domestic use in Brazil.

Revista de Administração da UFSM, v. 16, n. 3, p. e2, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1983465974238>. Acesso em: 04 mar. 2025.

BHATTACHARJEE, J. *et al.* Recent scenario of e-waste recycling: chemical engineering. **International Journal of Chemical Reactor Engineering**, 2025.

Disponível em: <https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/ijcre-2024-0058/html>. Acesso em: 19 fev. 2025.

BRITO, J. L. R. de *et al.* Reverse remanufacturing of electrical and electronic equipment and the circular economy. **Revista de Gestão**, v. 29, n. 4, p. 380-394, 2022. Disponível em:

<https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/REG-02-2020-0011/full/pdf>. Acesso em: 09 mar. 2025.

CENCI, M. P. *et al.* Resíduos de equipamentos eletroeletrônicos como fonte secundária de materiais críticos e estratégicos. **Ambiente & Sociedade**, v. 28, p. e00203, 2025. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/asoc/a/yP8JfS8MP6HfjhXHsk8BtYn/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 03 jan. 2025.

CONTADOR, L.; FREIRE, L. S.; XAVIER, L. H. Paradoxos da logística reversa de resíduos eletroeletrônicos e a mineração urbana no Brasil. In: **Forum Internacional de Resíduos Sólidos – Anais**, 2021. Disponível em: <https://www.institutoventuri.org/ojs/index.php/FIRS/article/download/190/152>. Acesso em: 25 jan. 2025.

D'AMICO, G. *et al.* Digital technologies for urban metabolism efficiency: Lessons from urban agenda partnership on circular economy. **Sustainability**, v. 13, n. 11, p. 6043, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/11/6043>. Acesso em: 11 mar. 2025.

DUARTE, V. B. *et al.* Responsabilidade Compartilhada: o papel do consumidor no descarto do lixo eletrônico. **Revista Augustus**, v. 25, n. 50, p. 111-129, 2020. Disponível em: <https://www.academia.edu/download/81897751/279.pdf>. Acesso em: 16 jan. 2025.

ELGARAHY, A. M. *et al.* Revitalizing the circular economy: an exploration of e-waste recycling approaches in a technological epoch. **Sustainable Chemistry for the Environment**, p. 100124, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949839224000671>. Acesso em: 22 fev. 2025.

FADEEVA, Z.; VAN BERKEL, R. Unlocking circular economy for prevention of marine plastic pollution: An exploration of G20 policy and initiatives. **Journal of Environmental Management**, v. 277, p. 111457, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479720313827>. Acesso em: 07 mar. 2025.

FRANCO, A. S. *et al.* Danos causados à saúde humana pelos metais tóxicos presentes no lixo eletrônico. **Diversitas Journal**, v. 6, n. 2, p. 2025-2039, 2021. Disponível em: https://diversitas.emnuvens.com.br/diversitas_journal/article/download/1626/1367. Acesso em: 17 jan. 2025.

GALVÃO, T. W. F. B. *et al.* Cumprimento de políticas públicas ambientais e destinação de resíduos eletrônicos: uma análise dos fatores dificultadores. **Revista Eletrônica TECCEN**, v. 14, n. 1, p. 07-13, 2021. Disponível em: <https://editora.univassouras.edu.br/index.php/TECCEN/article/view/2553/1618>. Acesso em: 08 fev. 2025.

GIESE, E. C.; LINS, F. A. F.; XAVIER, L. H. Desafios da reciclagem de lixo eletrônico e as cooperativas de mineração urbana. **Brazilian Journal of Business**, v. 3, n. 5, p. 3647-3660, 2021. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJB/article/download/37950/29009>. Acesso em: 20 jan. 2025.

KWON, G. *et al.* Technical advancement in valorization of electronic waste and its contribution to establishing economic value-chain. **Chemical Engineering Journal**, p. 153154, 2024. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894724046424>. Acesso em: 12 fev. 2025.

LIU, Z. *et al.* The societal strength of transition: a critical review of the circular economy through the lens of inclusion. **International Journal of Sustainable Development & World Ecology**, v. 30, n. 7, p. 826-849, 2023. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/13504509.2023.2208547>. Acesso em: 29 jan. 2025.

MARTINS, T. S.; LEITÃO, F. O.; GUARNIERI, P. Transição da economia linear para a economia circular de equipamentos eletro-eletrônicos. **Revista Organizações em Contexto**, v. 19, n. 37, p. 329-361, 2023. Disponível em: <https://revistas.metodista.br/index.php/organizacaoemcontexto/article/download/40/42>. Acesso em: 14 mar. 2025.

MASSI, F. O.; SANTOS, A. dos; REIS, N. F. Smart clothing e resíduos eletroeletrônicos: implicações de heurísticas de design para a sustentabilidade na extensão do ciclo de vida. **Revista Transverso**, v. 1, n. 14, 2024. Disponível em: <https://revista.uemg.br/index.php/transverso/article/download/8382/5043>. Acesso em: 06 jan. 2025.

MORAES, C. S. B. de *et al.* Gestão de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos em municípios do Estado de São Paulo: caracterização e propostas de diretrizes. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 11, p. 109842-109871, 2021. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Marcelo-Campos-11/publication/356720611>. Acesso em: 02 mar. 2025.

SARKHOSHKALAT, M. M. *et al.* Circular Economy and the Recycling of E-Waste. In: **New Technologies for Energy Transition Based on Sustainable Development Goals**, Singapore: Springer Nature Singapore, 2024. p. 319-354. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-97-2527-4_16. Acesso em: 18 jan. 2025.

NETO, G. C. de O. *et al.* Reverse chain for electronic waste to promote circular economy in Brazil: a survey on electronics manufacturers and importers. **Sustainability**, v. 15, n. 5, p. 4135, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/5/4135/pdf>. Acesso em: 17 fev. 2025.

PAIXÃO, C. H. da; OLIVEIRA, A. L. Processamento de resíduos elétricos no Brasil. **Revista Interface Tecnológica**, v. 20, n. 1, p. 554-565, 2023. Disponível em: <https://revista.fatectq.edu.br/interfacetecnologica/article/download/1593/918>. Acesso em: 09 jan. 2025.

PAJUNEN, N.; HOLUSZKO, M. E. Circular Economy in Electronics and the Future of e-Waste. In: **Electronic Waste: Recycling and Reprocessing for a Sustainable Future**, p. 299-314, 2022. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9783527816392.ch13>. Acesso em: 03 mar. 2025.

PEREIRA, M. M. *et al.* Pré-tratamento e caracterização de placas de circuito impresso de computadores com ênfase no conteúdo metálico. **Química Nova**, v. 47, n. 8, p. e-20240045, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20240045>. Acesso em: 21 jan. 2025.

RAHMAN, A. Exploring the role of social enterprises in a just transition to the circular economy: A case study of waste management and recycling sector in Indonesia. **Open Research Europe**, v. 5, n. 111, p. 111, 2025. Disponível em: <https://open-research-europe.ec.europa.eu/articles/5-111>. Acesso em: 06 mar. 2025.

RAMASAMY, S. *et al.* An analysis of the durability features and strength of the E-waste concrete. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 29, n. 2, p. e20240108, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2024-0108>. Acesso em: 13 fev. 2025.

RAMIREZ-QUINTERO, D. A. *et al.* Mechanical processing and chemical leaching in the recovery of valuable elements from spent lithium batteries. **Ambiente & Sociedade**, v. 27, p. e00020, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc00201vu27L4OA>. Acesso em: 02 jan. 2025.

REIS, E. K. da S. O Uso da Logística Reversa para minimizar os Impactos Ambientais causados pelo Lixo eletrônico. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 7, n. 8, p. 843-859, 2021. Disponível em: <https://periodicorease.pro.br/rease/article/download/2020/829>. Acesso em: 01 mar. 2025.

SARKHOSHKALAT, M. M. *et al.* Circular Economy and the Recycling of E-Waste. In: **New Technologies for Energy Transition Based on Sustainable Development Goals**, Singapore: Springer Nature Singapore, 2024. p. 319-354. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-97-2527-4_16. Acesso em: 20 jan. 2025.

SCHNEIDER, E. L. *et al.* Reaproveitamento de resíduo de placas de circuito impresso como cargas em compósitos de polipropileno. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, n. 3, p. e-12832, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200003.1132>. Acesso em: 11 mar. 2025.

SILVA, R. M. G. *et al.* Indicadores de sustentabilidade para análise do gerenciamento dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 28, p. e20220220, 2023. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/ym5w67CqN5PWfPKYhXvqqzQ/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 26 fev. 2025.

SOUZA, F. R. de; JUNIOR, R. R. Política nacional de resíduos sólidos no contexto empresarial brasileiro: Estudo de caso da empresa XYZ. **REFAS: Revista FATEC Zona Sul**, v. 10, n. 5, p. 6, 2024. Disponível em: <https://periodicos.ufpa.br/index.php/pnaea/article/download/18575/12260>. Acesso em: 23 jan. 2025.

VISHWAKARMA, A.; HAIT, S. E-Waste Valorization and Resource Recovery. In: **Management of Electronic Waste: Resource Recovery, Technology and Regulation**, p. 202-233, 2024. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781119894360.ch10>. Acesso em: 08 fev. 2025.

KUMAR, Pankaj et al. **A review on e-waste contamination, toxicity, and sustainable clean-up approaches for its management**. Toxicology, [S.l.], v. 508, p. 153904, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tox.2024.153904>. Acesso em: 4 jul. 2025.